# ТЕОРИЯ И ТЕХНИКА РАДИОСВЯЗИ

Научно-технический журнал

№ 2/2018

Воронеж 2018

**Главный редактор**
докт. техн. наук, проф.
В.И. НИКОЛАЕВ

**РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:**

**Председатель**
докт. техн. наук, проф., чл.-кор. РАН
В.И. БОРИСОВ

**Зам. председателя**
докт. техн. наук, проф.
В.И. НИКОЛАЕВ

докт. физ.-мат. наук, проф.
Э.К. АЛГАЗИНОВ (г. Воронеж)
докт. техн. наук, проф., академик НАН РА
А.С. БАГДАСАРЯН (г. Москва)
докт. техн. наук, проф., академик РАН
А.С. БУГАЕВ (г. Москва)
докт. физ.-мат. наук, проф., академик РАН
Ю.В. ГУЛЯЕВ (г. Москва)
докт. техн. наук, проф.
Ю.Л. КОЗИРАЦКИЙ (г. Воронеж)
докт. техн. наук, проф., академик РАН
Н.А. КУЗНЕЦОВ (г. Москва)
докт. техн. наук, с.н.с.
И.И. МАЛЫШЕВ (г. Воронеж)
докт. физ.-мат. наук, проф.
Ю.Б. НЕЧАЕВ (г. Воронеж)
докт. техн. наук, проф.
В.Н. ПОВЕТКО (г. Воронеж)
докт. техн. наук, доцент
А.Ю. САВИНКОВ (г. Воронеж)
докт. физ.-мат. наук, проф., академик РАН
А.С. СИГОВ (г. Москва)
докт. техн. наук, проф.
Ю.С. СУХОРУКОВ (г. Воронеж)
докт. техн. наук, проф.
Н.М. ТИХОМИРОВ (г. Воронеж)
докт. техн. наук, проф.
Н.Н. ТОЛСТЫХ (г. Воронеж)
докт. техн. наук, проф.
В.А. ЦИМБАЛ (г. Серпухов)

Научно-технический журнал «Теория и техника радиосвязи» издаётся с 1966 года.

Выходит 4 раза в год.

В журнале публикуются статьи ведущих специалистов, докторантов и аспирантов АО «Концерн «Созвездие» (Воронежского НИИ связи) и отрасли по общим вопросам радиосвязи, теоретическим и экспериментальным исследованиям в области передачи непрерывных и дискретных сообщений, проблемам помехоустойчивости и методам передачи информации в условиях высокоорганизованного радиопротиводействия; особенностям построения различных видов систем связи с использованием узкополосных и широкополосных шумоподобных сигналов; вопросам разработки методов совмещения телекоммуникационных, измерительных и управляющих систем, а также другим вопросам областей исследований, соответствующих группе специальностей 05.12.00 «Радиотехника и связь» и смежным специальностям группы 05.13.00 «Информатика, вычислительная техника и управление».

Журнал входит в Перечень изданий, рекомендуемых ВАК РФ
для опубликования основных результатов диссертаций
на соискание учёной степени доктора и кандидата наук.

**Учредитель и издатель:**

**АО «Концерн «Созвездие»**

Издание зарегистрировано
в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-36740 от 1 июля 2009 г.

Подписной индекс
в Каталоге российской прессы
№ 72972

Сайт в Интернете:
www.sozvezdie.su

Набор и верстка компьютерные
Формат 60×88 ⅛. Уч.-изд. л. 12,8
Тираж 200 экз. Заказ № 224
Подписано в печать 12.04.2018

© АО «Концерн «Созвездие», 2018

**СОДЕРЖАНИЕ**

***№ 2, 2018***

Инновационное развитие АО «Концерн «Созвездие»
***А.Ю. Бочаров, В.И. Борисов*** ..... 9

Радиотехнологии для автоматизированных систем тактического звена управления
***В.И. Борисов, В.И. Николаев*** ..... 14

Автоматизированная система управления и связи. Состояние и перспективы развития
***И.В. Владимиров*** ..... 20

История и перспективы развития систем связи тактического звена управления
***А.Г. Алфёров, А.В. Мержвинский*** ..... 28

Направление совершенствования программно-технических комплексов в целях повышения командной управляемости перспективных образцов бронетанковой военной техники для ЕСУ ТЗ
***Р.А. Быстрых, Р.А. Асташов, Д.М. Уткин*** ..... 34

Носимые программно-технические комплексы
***О.А. Глазунов, А.Н. Мокроусов, Т.В. Осицкая*** ..... 39

Состояние и перспективы развития системы радиоканалов управления
***С.В. Иевлев, С.В. Кривопустов*** ..... 43

Перспективы развития систем радиосвязи комплексов ПВО-ПРО
***Д.Ю. Чаркин*** ..... 46

Тенденции и перспективы развития телекоммуникационных технологий в системах специальной связи
***В.И. Штефан, А.А. Лукьяненко*** ..... 51

Полевые радиоцентры и радиостанции стратегического, оперативного и тактического звеньев управления
***А.Г. Алферов, В.А. Долгих, Э.Н. Родионов*** ..... 56

Состояние и перспективы развития комплексов и средств радиоэлектронной борьбы
***М.Л. Артемов*** ..... 60

Конфликтное взаимодействие инфокоммуникационных систем
***В.И. Николаев, Н.Н. Толстых*** ..... 72

Способы повышения быстродействия синтезаторов частот в контексте радиоэлектронной борьбы
***С.К. Романов, Н.М. Тихомиров, В.Н. Тихомиров*** ……..…..... 85

Реализованные и потенциально возможные скорости передачи в автоматизированных системах управления и связи
***В.А. Маковий, А.Н. Голубинский*** ……. 97

Стабилизация функциональных характеристик систем связи и управления в части обеспечения режима реального времени
***А.В. Мержвинский, Б.М. Попов*** …….. 110

Ключевые направления развития гражданских радиотехнологий в АО «Концерн «Созвездие»
***В.В. Солопов*** …… 115

Уважаемые читатели!

Предлагаем вашему вниманию юбилейный выпуск журнала «Теория и техника радиосвязи», посвященный 60-летию АО «Концерн «Созвездие» – на момент основания (май 1958 года) НИИ-299.

В этом выпуске представлены работы ученых, инженеров, ведущих специалистов концерна, отражающие актуальные на сегодняшний день проблемы создания современных военных и гражданских инфокоммуникационных систем, а также результаты научной и производственной деятельности концерна.

*В статье А.Ю. Бочарова и В.И. Борисова рассматриваются вопросы инновационного развития АО «Концерн «Созвездие» в целом по всем тематическим направлениям работ предприятия в рамках перехода к 6-му технологическому укладу, получившему название «инфо-нано-био-когно» и позволяющему в долгосрочной перспективе видеть АО «Концерн «Созвездие» в рядах мировых технологических лидеров.*

Сегодня системы связи и управления выходят на передовые позиции при создании новых образцов вооружения как в зарубежных, так и в отечественной армиях. Необходимая эффективность имеющегося и вновь создаваемого оружия может быть достигнута только при наличии высоконадежных, помехозащищенных автоматизированных систем связи и управления (АСУС), обеспечивающих возможность своевременного гарантированного доведения команд управления оружием, в том числе и принципиально новым, по всей территории его дислокации, включая акваторию Мирового океана и арктические широты.

Создание таких АСУС – приоритетная задача, успешно решаемая специалистами основных направлений деятельности концерна:

1. В 2017 году завершена разработка Единой автоматизированной системы управления войсками и оружием в тактическом звене (ЕСУ). В своем выступлении на Коллегии Министерства обороны РФ начальник Генерального штаба ВС РФ В.В. Герасимов отметил, что разработанная система обеспечивает «автоматизацию процессов сбора и анализа информации об обстановке, планирования боевых действий, доведения боевых задач, управления поражением противника, а ее эффективность была подтверждена на стратегических учениях «Кавказ-2016» и «Запад-2017».

*Этапы создания ЕСУ, сравнительный анализ с зарубежными системами управления, а также прогнозные оценки ее развития рассматриваются в статьях В.И. Борисова, В.И. Николаева, И.В. Владимирова, Р.А. Быстрых, А.Г. Алферова, Т.В. Осицкой.*

2. Разрабатываются и совершенствуются особо ответственные АСУС специального назначения, в которых радиоканалы управления реализуются на принципах использования сложных сигнально-кодовых конструкций, обеспечивающих предельно возможную помехозащищенность и способность противостоять системам радиоэлектронного противодействия противника.

*Вопросы теории и практики создания АСУС специального назначения отражены в статьях С.В. Кривопустова, Д.Ю. Чаркина, В.И. Штефана, В.А. Долгих.*

3. Ведутся развернутые в концерне в соответствии с Приказом по Министерству промышленности средств связи СССР еще в 80-е годы, в период афганских событий, работы по созданию систем и средств радиоэлектронной борьбы и конфликтных воздействий на информационно-управляющие системы.

*Эта проблематика рассматривается в статьях М.Л. Артемова, Н.Н. Толстых, Н.М. Тихомирова, С.К. Романова, В.А. Маковия, А.Н. Голубинского, Б.М. Попова, А.В. Мержвинского.*

4. В соответствии с решением руководства страны доля продукции гражданского назначения к 2025 году должна быть доведена до 30–50% от общего объема выпускаемой продукции. Реализация принятого решения возможна в концерне на основе разработки и производства:

– радиосредств профессионального назначения,

– радиосредств широкополосного доступа,

– промышленного интернета вещей.

*Вопросы разработки и производства высокотехнологичной продукции гражданского назначения рассматриваются в статье В.В. Солопова.*

***Дорогие сотрудники! Позади 60 лет пройденного вами активного творческого пути. Редакционная коллегия поздравляет вас с юбилеем и желает дальнейших успехов в реализации новых проектов современных телекоммуникационных сетей и систем различного назначения.***

*С уважением,*

главный редактор В.И. Николаев

Уважаемые коллеги!

Поздравляю вас с 60-летием со дня образования АО «Концерн «Созвездие» (Воронежского научно-исследовательского института связи, научно-исследовательского института военной радиосвязи).

Журнал, который вы держите в руках, – это история развития концерна, знаменательный путь побед и достижений, пройденный в непростое для нашей страны время. Это сплетения человеческих судеб, сыгравших огромную роль в становлении и развитии научного и производственного потенциала нашего предприятия.

Воронежский научно-исследовательский институт связи (в настоящее время АО «Концерн «Созвездие») был создан в 1958 году наряду с другими промышленными НИИ и КБ для решения технологических задач: разработки и организации промышленного производства систем и средств связи, оснащения ими народного хозяйства и, прежде всего, силовых структур. При этом основной задачей в последующей деятельности института являлось создание мобильной компоненты.

В мае 1958 года из КБ завода «Электросигнал» в институт связи были переведены 86 высококвалифицированных специалистов и среди них – основатели предприятия Антон Петрович Биленко и Эвальд Альфонсович Янутан.

Необходимо отметить, что за годы деятельности в концерне сформировался большой коллектив специалистов и ученых, которые внесли значительный вклад в развитие отечественной промышленности. Коллективом разработчиков концерна в интересах тактического звена сухопутных войск и других силовых ведомств было разработано и внедрено в производство несколько поколений радиостанций. Реализуемый жизненный цикл каждого поколения составляет десять лет. Для обеспечения потребностей Вооруженных Сил промышленностью выпускалось 80–85 тысяч радиостанций в год. Каждое новое поколение отличалось от предыдущего ростом функциональных возможностей: освоением новых диапазонов частот, введением помехозащищенных режимов.

Большое внимание в концерне уделялось разработке и производству радиостанций профессионального, гражданского и двойного назначения. До начала 2000-х годов их выпускали до 400 тысяч в год, в том числе более 160 тысяч в год – для сельского хозяйства («Лен», «Маяк», «Колос»), более 60 тысяч в год – для МВД («Гранит», «Виола»),

более 50 тысяч – для МПС (РЖД) (система «Транспорт»). Впервые в нашей стране создана радиально-зоновая система общего пользования «Алтай».

С самого начала деятельности концерна проводились и проводятся до настоящего времени масштабные работы по созданию систем управления и связи в интересах ПВО-ПРО.

Отрадно сознавать, что концерн вступил в XXI столетие, сохранив все направления работ, с большим ростом численности молодежи и грандиозными планами на будущее. И мы продолжаем приумножать наши победы.

***Дорогие коллеги! От всей души желаю вам успехов, здоровья и процветания! Выражаю искреннюю благодарность составителям, авторам и издателям журнала.***

Генеральный директор
АО «Концерн «Созвездие» А.Ю. Бочаров

УДК 621.391

**ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ АО «КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»**

© Авторы, 2018

**А.Ю. Бочаров**, генеральный директор
**В.И. Борисов**, научный руководитель, e-mail: office@sozvezdie.su
АО «Концерн «Созвездие»

*Очередной этап развития человеческой цивилизации завязан на информационных технологиях. В настоящее время именно продукция этих технологий служит базой и определяет успех в инновационной деятельности, обеспечивающей переход к 6-му технологическому укладу, получившему название «инфо-нано-био-когно». Благодаря традиционно высокому уровню инновационной активности в области информационных технологий АО «Концерн «Созвездие» имеет неоспоримые достижения в реализации программно-определяемых радиосредств, внедрении элементов искусственного интеллекта в системы связи, построении самоорганизующихся mesh-сетей, создании систем управления на принципах сетецентризма. Курс на повышение инновационной активности и в долгосрочной перспективе позволяет видеть АО «Концерн «Созвездие» в рядах мировых технологических лидеров.*

***Ключевые слова:*** *информационные технологии, 6-й технологический уклад, программно-определяемое радио (ПОР), самоорганизующиеся mesh-сети, системы управления на принципах сетецентризма.*

**INNOVATIVE DEVELOPMENT OF JSC «CONCERN «SOZVEZDIE»**

© All rights reserved, 2018

**A.Yu. Bocharov**, CEO
**V.I. Borisov**, Scientific Adviser, e-mail: office@sozvezdie.su
JSC «Concern «Sozvezdie»

*The next stage in the progress of human civilization is associated with information technologies. Now, IT-based products are the key to success in innovations that ensure a transition to the 6$^{th}$ wave of innovation called «Nano-Bio-Info-Cogno Technologies» (Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science). With a traditionally high level of innovation activities in the IT field, JSC «Concern «Sozvezdie» has undeniable achievements in the implementation of Software Defined Radio solutions, integration of A.I. components into communication systems, construction of self-organizing mesh networks, and development of control systems based on network-centricity concepts. In the long term, Company's strategy to enhance innovation activities will allow JSC «Concern «Sozvezdie» to be among the world's leading companies involved in technology development.*

***Keywords:*** *information technologies, 6$^{th}$ wave of innovation, Software Defined Radio (SDR), self-organizing mesh networks, network centric control systems.*

В развитии человеческого общества выделяются три фазы (цикла) – *аграрная, промышленная и информационная* эпохи, каждой из которых соответствуют особые модели стратегии. Этим эпохам строго соответствуют социологические понятия *премодерн*, *модерн* и *постмодерн*. Информационная эпоха – это период постмодерна, начало которого относится к 1980–1985 годам. На протяжении всей своей истории человечество овладевало веществом, энергией и информацией. Целые эпохи в развитии человечества получили название по имени наиболее передовой технологии этой эпохи. Так, «каменный век» – это эпоха технологии обработки камня для получения орудий труда, «бронзовый век» – эпоха овладения технологией обработки металла. Ещё 20–30 лет назад говорили, что наступил «атомный век». Сейчас все чаще можно слышать о «веке информации». Более того, считается, что сегодня мир переживает информационный бум. Если в средние века удвоение количества информации происходило за 100 лет, в начале 20-го века – за 10 лет, то, начиная с 1980 года, удвоение количества информации в мире происходит ежегодно [1].

Информационные технологии имеют решающее влияние на процесс глобализации мировой

экономики. Уже сегодня реально существует мировая экономика, международное разделение труда, резко возрастают транспортные и информационные потоки между континентами, странами, а также внутри каждой страны. Глобальная экономика порождает глобальное информационное общество, в котором производство и потребление информации являются важнейшими видами деятельности. Информация признается наиболее значимым ресурсом, а информационная среда наряду с социальной и экономической – средой обитания человека.

Важнейшим научно-техническим достижением прошлого столетия, качественно изменившим образ жизни человечества, было создание электронно-вычислительной техники и высокопроизводительных систем обработки, хранения, передачи и отображения информации. Облегчение доступа к информации стало мощным стимулом для формирования рынка информационных услуг. Развитие инфокоммуникационных технологий (ИКТ) привело к созданию информационной индустрии, на базе которой сформировался информационный сектор экономики, в который из материального производства произошла перекачка до 75% трудовых ресурсов, что позволило повысить качество жизни путем создания более комфортной среды обитания и замены физического труда на интеллектуальный. Следует отметить, что при этом сократились потребности в рабочей силе.

*С каждым годом усиливается конкурентная борьба на рынке информационных технологий, её можно сравнить с гонкой вооружений, основной деятельностью которой является истощение противника. Для того чтобы оторваться от конкурентов, захватить новые сегменты рынка, фирмы многократно увеличивают расходы на НИОКР. При этом крупные наукоемкие компании стремятся осуществить у себя полный цикл инновационного процесса, обеспечивая таким образом его непрерывность в долгосрочной перспективе.*

Для выживания в этих условиях первостепенная роль принадлежит инновационной деятельности, позволяющей обеспечивать непрерывное обновление технической и технологической базы производства, осваивать и выпускать новую конкурентоспособную продукцию, проникать на мировые рынки товаров и услуг.

Группа стран – мировых технологических лидеров, обладающих динамично развивающимся *научно-технологическим сектором*, а также *образованием* и *промышленностью*, выход из кризиса видят в переводе своих экономик на 6-й технологический уклад, основу которого составляют: информационно-коммуникационные технологии, когнитивные технологии, нанотехнологии, биотехнологии (ИНФО, БИО, НАНО, КОГНО).

Аналогичный путь инновационного развития принят в АО «Концерн «Созвездие». Наиболее общие составляющие инновационного развития АО «Концерн «Созвездие» приведены на рис. 1. Это:

• образование, ориентированное на подготовку *творцов;*

• развитая *наука* как главный ресурс развития;

• способность обеспечить реализацию полного инновационного цикла «наука-технологии-массовое производство-реализация».

Рис. 1.

Исключительно важная роль в развитии инновационной деятельности отводится высшим учебным заведениям. Наряду с подготовкой специалистов высшей квалификации, они успешно проводят научно-исследовательские работы, а многие из них способны разрабатывать конкурентоспособную продукцию.

В качестве количественной оценки инновационной активности предлагается отношение (в процентах) объема конкурентоспособных работ на мировом уровне к общему объему работ. В АО «Концерн «Созвездие», в силу того что сохранился коллектив ученых-разработчиков, уровень инновационной активности за 2016 год составил 61,5% (в США – 62%; в Японии – 95%) [2, 3].

На рис. 2 приведены базовые технологии 6-го технологического уклада, реализация которых должна привести к повышению инновационной активности АО «Концерн «Созвездие», в том числе:

• Технология программно-определяемых радиосредств (ПОР; Software defined Radio – SDR), позволяющая с помощью программного обеспечения устанавливать или изменять рабочие радиочастотные параметры, включая, в частности, диапазон частот, тип модуляции, выходную мощность, скорость передачи цифровой информации. Программным путем, не меняя оборудования, можно реализовать различные стандарты. Для операторов SDR – это прежде всего возможность быстрого и относительно экономичного запуска новых сервисов (сегодня, как правило, для этого приходится приобретать и новое дорогостоящее оборудование). Использование СБИС с высокой степенью интеграции наряду с повышением быстродействия приводит к снижению потребляемой мощности, резкому уменьшению габаритов и снижению её стоимости. Это позволяет реализовать негласный телекоммуникационный закон: рост функциональных свойств радиооборудования не должен приводить к росту цен.

• Технология когнитивного радио (внедрение элементов искусственного интеллекта в радиосистемы). Понятие «когнитивный» означает свойство радиосредства или сети связи, выражающееся в способности автономно и динамически изменять свою топологию, корректировать эксплуатационные параметры, перераспределять сетевые ресурсы в соответствии с ранее накопленными знаниями о состоянии сети и политиках обслуживания пользователей. Когнитивные сети обеспечивают автоматическое принятие решений об изменении технических характеристик и поддерживают механизм машинного обучения для обеспечения наиболее эффективных и целесообразных решений при установлении, поддержке и завершении сеансов связи пользователей.

• Технология построения самоорганизующихся ячеистых сетей (Mesh-сети), являющаяся одним из способов перехода к сетецентрическому управлению.

Рис. 2.

Особенность концепции сетецентрических войн среди многих других состоит в её системообразующем характере, в том, что это не столько локальный научно-технический прорыв, сколько новый образ мышления в области системотехнического синтеза и применения сложных боевых систем.

Только системный подход позволяет достичь синергетического эффекта, когда возрастание эффективности возникает в результате интеграции, слияния отдельных частей в единую систему (синергия – это способность целого равняться большему, чем простая сумма его частей, т.е. система в целом достигает цели более эффективно, чем если бы её части использовались отдельно).

Более конкретно «сетецентризм» – это результат интеграции *боевых систем на поле боя*, сетей управления, вычислительной техники, средств связи и разведки; при этом боевые системы рассматриваются как своеобразные устройства, подключенные к единой сети. В зависимости от выбора сетевой архитектуры и её типа такими устройствами могут быть корабли, самолеты, средства поражения, управления, связи, разведки и наблюдения, группа военнослужащих или отдельные военнослужащие, а также комбинация и тех, и других.

Особое значение в боевых условиях, характеризующихся изменением обстановки и динамичностью ситуации, приобретает возможность формировать беспроводные сети, все функции администрирования в которых выполняют сами узловые радиостанции (узлы) без участия каких-либо элементов сетевой инфраструктуры или оператора. Сети данного типа получили название *мобильные адаптивные сети*.

В целом под мобильной адаптивной сетью понимается формируемая совокупностью мобильных узлов динамически меняющаяся сетевая конфигурация, обладающая следующими свойствами: отсутствие внешних механизмов настройки (т.е. сеть является самоконфигурируемой); сетевой узел выполняет как функции маршрутизатора, так и оконечного устройства; относительно малое время жизни сети в одной и той же конфигурации. В условиях сетецентрической организации эффективность сети подтверждена математическим законом Меткалфа, в соответствии с которым «полезность» и «эффективность» сети пропорциональны квадрату числа её узлов.

Учитывая малое *время жизни* сетевых узлов в экстремальных условиях, для обеспечения надежности управления специально вводится дополнительное количество узлов. Типовая структурная схема самоорганизующейся сети (mesh-сеть) приведена на рис. 3.

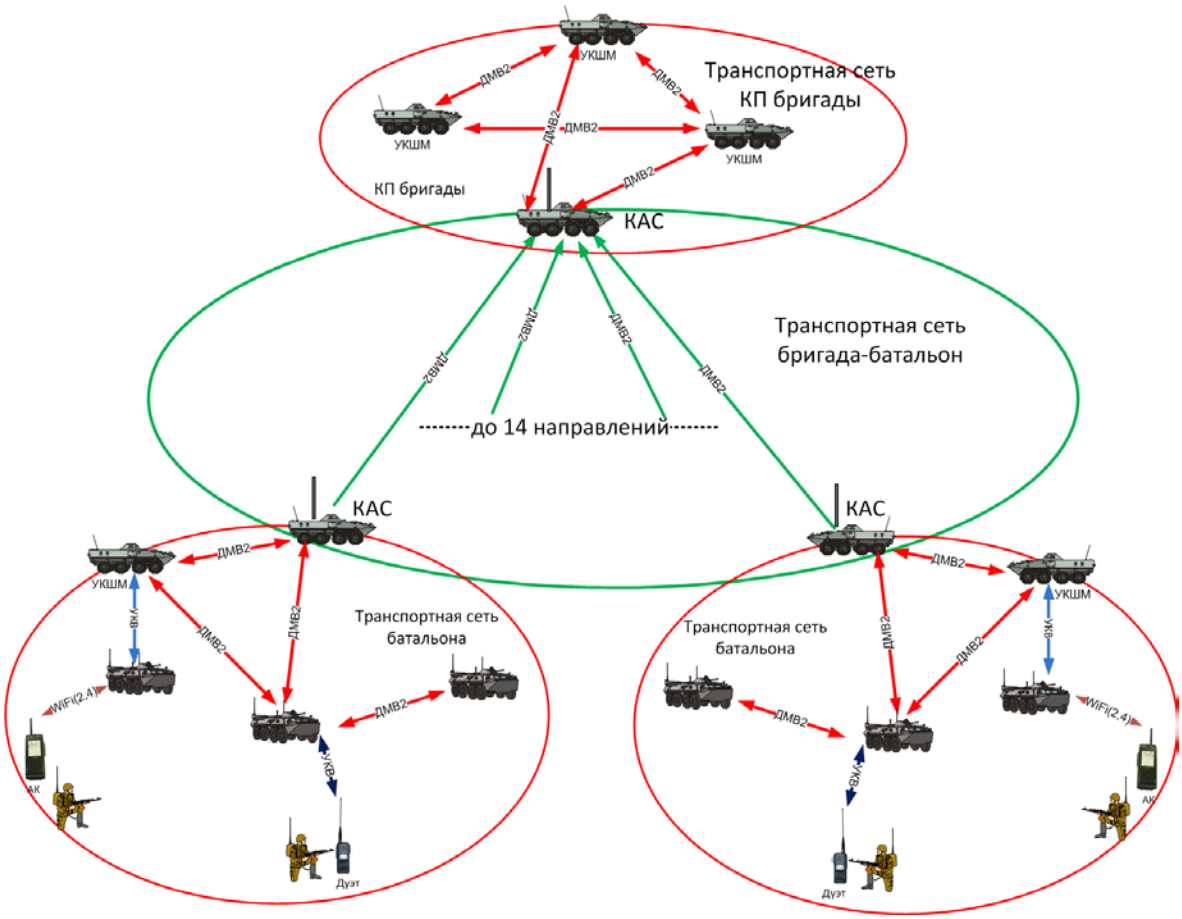



Рис. 3.

Рис. 4.

В последние годы в АО «Концерн «Созвездие» в основном все разработки проводятся с использованием технологий 6-го технологического уклада. Так, например, аппаратура «Комплекса полевых узлов связи всех звеньев управления» построена на основе SDR-технологии. Автоматизированная система управления построена на основе самоорганизующихся ячеистых сетей (mesh-сетей), что является одним из способов перехода к сетецентрическому управлению. На рис. 4 приведены данные по достигнутому уровню инновационной активности для различных направлений деятельности АО «Концерн «Созвездие». Ранее указывалось, что в настоящее время уровень инновационной активности достиг ≈ 61,5%. При организации серийного производства ЕСУ ТЗ в планируемых объемах и «Комплекса полевых узлов связи…» в ближайшие 2–3 года уровень инновационной активности может быть доведен до 80%.

***Литература***

1. *Борисов В.И.* О единстве массы, энергии и информации // Информация и космос. 2013. № 1. С. 8–10.

2. *Борисов В.И.* Помехозащищенность систем радиосвязи. Основы теории и принципы реализации. М.: Наука, 2009. 358 с.

3. *Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е., Мухин Н.П., Шестопалов В.И.* Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. М.: Радио и связь, 2000. 384 с.

Статья поступила в редакцию 13 марта 2018 года

УДК 338.987

# РАДИОТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ТАКТИЧЕСКОГО ЗВЕНА УПРАВЛЕНИЯ

© Авторы, 2018

**В.И. Борисов**, д.т.н., профессор, член.-корр. РАН, научный руководитель
**В.И. Николаев**, д.т.н., профессор, научный референт, e-mail: nikolaev@sozvezdie.su
АО «Концерн «Созвездие»

*Установлены принципы создания перспективных телекоммуникационных систем, в основу которых положены совместимость вновь создаваемых систем связи с системами, находящимися в эксплуатации, и реализация вновь создаваемых телекоммуникационных систем на принципах сетецентризма и на основе технологий 6-го технологического уклада (инфо-нано-био-когно).*

***Ключевые слова:*** *сетецентрические операции (СЦО), программно-определяемое радио (ПОР), когнитивное радио, мультимедийность.*

# RADIO COMMUNICATION TECHNOLOGIES FOR AUTOMATED TACTICAL CONTROL LEVEL SYSTEMS

© All rights reserved, 2018

**V.I. Borisov**, D.Sc. in Engineering Science, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Science, Scientific Adviser
**V.I. Nikolaev**, D.Sc. in Engineering Science, Professor, Scientific Adviser, e-mail: nikolaev@sozvezdie.su
JSC «Concern «Sozvezdie»

*This article describes the established concepts for development of telecommunication systems based on the comparability of newly developed communication systems with systems being in service, as well as the implementation of newly developed telecommunication systems based on network-centricity concepts and on the $6^{th}$ wave of innovation technologies (Nano-Bio-Info-Gogno).*

***Keywords:*** *network centric operations (NCO), Software Defined Radio (SDR), cognitive radio, multimedia technologies.*

В настоящее время одной из доминирующих тенденций в развитии средств и систем связи и информационного обмена гражданского, специального (военного), а также двойного назначения является интеграция собственно телекоммуникационных и информационно-управляющих технологий. Такая тенденция наиболее ярко проявляется в системах и средствах связи, определяемых в некоторых источниках как средства связи V и VI поколений, в которых «интеллектуальные» (процессорные, компьютерные) устройства присутствуют практически во всех функциональных и структурных элементах, решая многочисленные задачи по сбору, обработке, хранению и распределению информации.

Современные телекоммуникационные системы определяются во многих источниках как многофункциональные системы. Многофункциональность понимается в наиболее широком смысле, но определяющим является то, что, кроме традиционного речевого обмена, радиосредства, в частности, должны обеспечивать высокоскоростную передачу данных на скоростях до 150 Мбит/с и видеоинформации в реальном масштабе времени, решать задачи определения местоположения и радиоразведки, иметь интерфейсное сопряжение с компьютером, иметь встроенные средства криптозащиты передаваемой информации (режим СКЗИ), реализуя в совокупности режим АСМД – аппаратура связи, местоположения и передачи данных. В ряде случаев средства связи могут использоваться в комплекте средств, выполняющих функции опознавания.

В иностранной литературе, а также в ряде директивных документов министерств обороны ведущих зарубежных стран такой набор функциональных возможностей получил аббревиатуру $C^4I$ (Command, Control, Communication,

 ISSN 1995-7009

Computers and Intelligence). В наиболее известных зарубежных радиостанциях, разрабатываемых по программам SPEAKeasy, Bowman, реализованы встроенный приемник радионавигационной системы GPS NAVSTAR либо стык с ним, интерфейсное сопряжение с компьютером, средства криптозащиты передаваемой информации. В интегрированной системе определения местоположения, опознавания и передачи данных (EPLRS – Enhanced Position Location Reporting System) реализован разностно-дальномерный метод определения местоположения абонента по аналогии с АСМД.

Провозглашенная в 90-х гг. прошлого века доктриной № 59 президента США концепция интегрированного развития средств управления, контроля, связи и разведки $C^3I$ (Command, Control, Communication and Intelligence), позже трансформированная в концепцию $C^4I$, сегодня реализуется как концепция GMM (Global, Mobility, Multimedia). Она направлена на создание сквозного информационного пространства для всех уровней военного руководства США и стран НАТО.

Требование «глобальности» предполагает необходимость обслуживания обширных территорий и обеспечение в любое время информацией потребителей, находящихся на всем ТВД, включая акваторию Мирового океана.

В требовании «мультимедийности» заложена необходимость передачи больших массивов информации, включая передачу данных и видеоинформации в квазиреальном масштабе времени. При реализации этого требования основной акцент делается на широкомасштабное использование компьютеров и повышение пропускной способности каналов передачи данных.

Требование «мобильности» вытекает из условия высокой маневренности воинских формирований и предполагает повсеместное использование радиосвязи. С учетом необходимости обеспечения связи на больших дистанциях (до 10...16 тыс. км) значительное место отводится спутниковым СС, линиям КВ-связи и летно-подъемным ретрансляторам, в том числе на основе БПЛА.

Основополагающими принципами создания перспективных телекоммуникационных систем в США и странах НАТО, судя по информации из различных источников, являются:

– совместимость вновь создаваемых систем связи с системами, находящимися в эксплуатации;

– реализация вновь создаваемых телекоммуникационных систем на основе концепции открытых систем по технологиям программно-определяемой архитектуры;

– создание новых систем связи по единым стандартам (в том числе стандартам национальных стратегических сетей) с целью взаимной совместимости и обеспечения взаимодействия различных видов ВС;

– создание и внедрение в войска нового оборудования в реальные сроки и при минимальных финансовых затратах.

На рис. 1 [1] представлена динамика роста возможностей телекоммуникационных технологий за 30-летний период (1990–2020 гг.) по зарубежным средствам связи тактического звена управления.

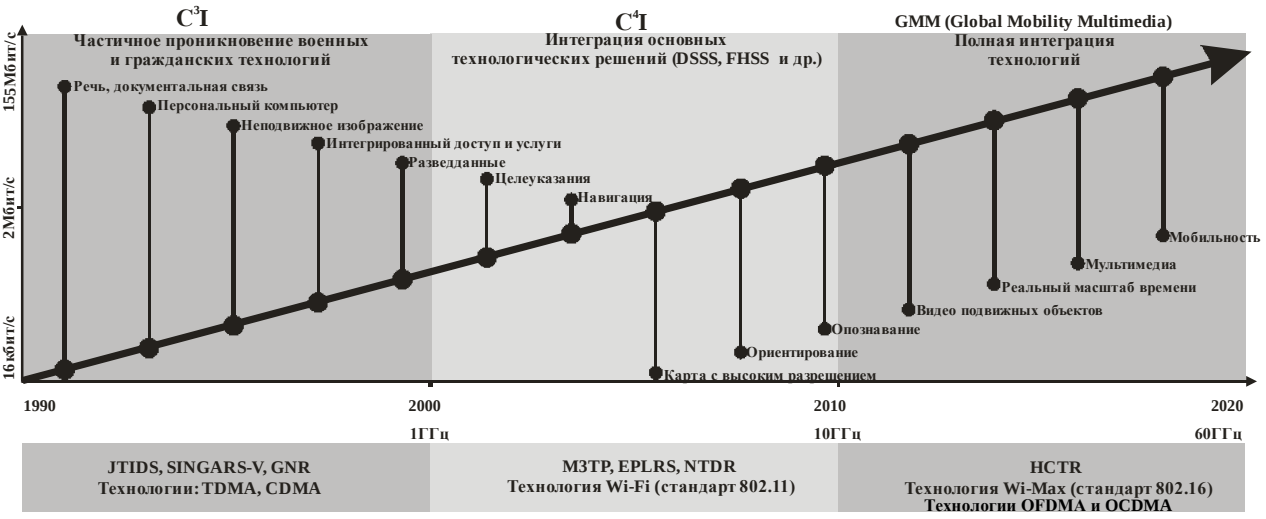



Рис. 1. Динамика роста возможностей телекоммуникационных технологий за 30-летний период (1990–2020 гг.)

Нижняя часть рисунка отражает участки частотного диапазона, используемые эксплуатируемыми и проектируемыми радиосредствами.

Функциональные возможности систем и средств первого десятилетия ограничиваются передачей речи и данных на скоростях 16...64 кбит/с, в том числе неподвижного видео, реализуются преимущественно в частотном диапазоне до 500...600 МГц, имеет место лишь частичное взаимное проникновение военных и гражданских технологий. В системах второго десятилетия (до 2010 г. включительно) наблюдается взаимная интеграция основных технологических решений, скорость передачи до ~2 Мбит/с с возможностью засекречивания информации, определения текущего местоположения абонентов сети, освоения частотного диапазона до ~10 ГГц. Прогнозные оценки развития телекоммуникационных систем до 2020 г.: цифровые методы передачи информации на скоростях до 155 Мбит/с, в том числе видеоинформации в реальном масштабе времени, освоение частотного диапазона до 60 ГГц, широкое использование технологий беспроводного доступа (технологии OFDMA и OCDMA).

По данным американских военных экспертов, в 2010 году в армии США потенциальные суточные объемы передаваемой информации достигли астрономической цифры – 270 терабит, и эта цифра сопоставима с объемами переданной информации всеми воюющими странами за годы Второй мировой войны. Представляет интерес информация о соотношении энергетических и информационных затрат на одного воюющего армии США для достижения целей в войнах XX столетия (рис. 2) [2], из которой могут быть сделаны два важных вывода: первый – имеет место почти десятикратный рост суммарных затрат на одного воюющего, второй – в последней войне (VI поколение) информационные затраты впервые превысили энергетические.

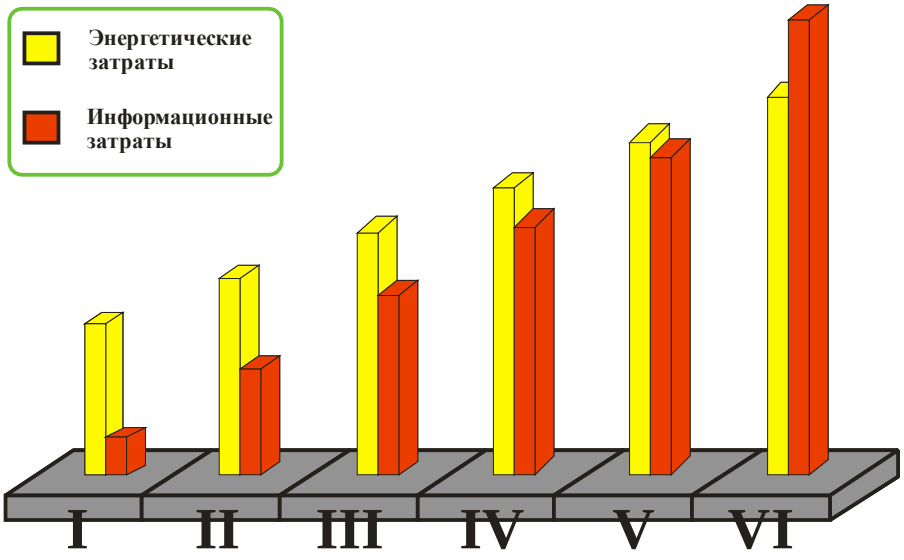



Рис. 2. Энергетические и информационные затраты для достижения целей в войнах различных поколений

Анализ путей развития зарубежных телекоммуникационных систем военного и гражданского назначения позволяет сделать также вывод о взаимном проникновении военных технологий и гражданских. Так, технология кодового разделения каналов (CDMA) произошла из сложнейших систем военного назначения, реализованных на основе шумоподобных сигналов (Qualcomm и АО «Концерн «Созвездие»). Необходимость массового производства продукции гражданского назначения по технологии CDMA побудила производителей внести существенные инвестиции в создание современной элементной базы, в т.ч. по субмикронной технологии, что позволило повысить технико-экономические и эксплуатационные характеристики аппаратуры, и прежде всего приборов цифровой обработки сигналов для абонентских терминалов, в том числе и в военной сфере.

Очевидно, еще большее взаимное проникновение технологий для продукции военного и гражданского назначения, вплоть до полной интеграции соответствующих телекоммуника-

ционных систем, предстоит наблюдать в ближайшее десятилетие. Немаловажное значение для такой интеграции приобретают экономические аспекты, поскольку создание автономной инфраструктуры для современных систем, даже для военных ведомств, является дорогостоящим вложением. Сегодня это уже имеет место в спутниковых системах связи и навигации, а также в сетях беспроводного абонентского доступа, в области создания беспроводных сетей передачи информации по технологиям Wi-Fi (стандарты IEEE 802.11) и WiMAX (стандарты IEEE 802.16). Различные опции (исполнения) указанных стандартов обеспечивают высокую помехозащищенность за счет использования сигналов DSSS, FHSS, OFDM и пропускную способность до 134 Мбит/с, имеют возможности роуминга, временной (TDD) и частотный (FDD) дуплексные режимы работы, обеспечивают гарантированную криптозащиту по стандарту IEEE 802.10 и поэтому могут с меньшим числом доработок использоваться в сетях специального назначения.

Отечественные инфокоммуникационные системы имеют аналогичные тенденции развития, ограниченные лишь возможностями электронной компонентной базы и существенно меньшими объемами инвестиций. Так, инвестиции в телекоммуникационную отрасль в 2000 г. в России составляли лишь 0.02% ВВП против 2%, например, в Китае и Эстонии. В настоящее время инвестициям в телекоммуникационную отрасль уделяется большее внимание. В частности, в соответствии с утвержденной В.В. Путиным 7 февраля 2008 г. «Стратегией развития информационного общества в Российской Федерации» к 2015 г. предусматривалось довести оснащённость населения средствами широкополосного доступа до 35%. Сегодня эта задача успешно выполняется: к 2014 г. в России было достигнуто 53,6 % оснащенности средствами широкополосного доступа [3].

Переход инфокоммуникационных систем на технологии 6-го технологического уклада: программно-определяемого радио, программно-определяемой архитектуры, когнитивного радио и сетецентрического управления (рис. 3) – создает предпосылки для внедрения накопленного научно-технического задела и существенного повышения конкурентоспособности нашей продукции.

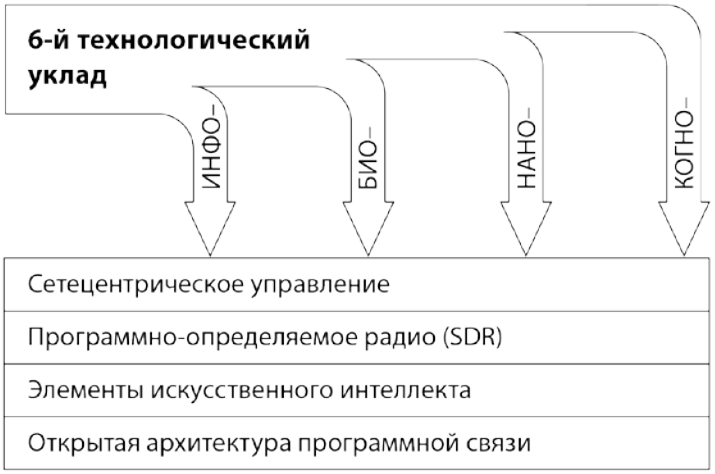



Рис. 3. Архитектура построения автоматизированных систем управления и связи тактического звена

Объем мирового рынка военной электроники, по данным консалтинговой фирмы «Фрост энд Салливан», оценивается суммой порядка $195 млрд., потребность Вооруженных Сил РФ составляет примерно 2% от мировой.

В целом, соотношение научно-технического уровня продукции, выпускаемой АО «Концерн «Созвездие» (далее по тексту – Концерн) по 6 тематическим направлениям, показывает, что научно-технический уровень продукции по автоматизированным системам управления не уступает зарубежному, а по системам управления оружием, включая ПВО, превосходит зарубежный уровень. Значительное отставание имеется по продукции гражданского сектора экономики.

Исходя из оценки конкурентоспособности нашей продукции и планов по развитию и внедрению научно-технического задела до 2020 года и на дальнейшую перспективу прогнозируется рост объемов работ:

– по направлению «Автоматизированные системы связи и управления оружием» в части поставок – до 2–3 раз;

– по направлениям «Автоматизированные системы связи и управления для ПВО» и «Автоматизированные системы и средства радиоэлектронной борьбы» – в 2 раза на последующие годы (с учетом экспортных поставок);

– по направлению «Автоматизированные системы связи и управления для тактического звена» предусмотрен рост объемов работ до 8000–15000 млн. рублей в год (рост в 2–4 раза);

– также заложен рост объемов работ и по остальным направлениям, включая продукцию гражданского назначения (системы широкополосного доступа и интернет вещей). При этом конкурентоспособность продукции гражданского назначения может быть радикально повышена за счет адаптации зарубежных технологий к территориальным и социально-экономическим особенностям нашей страны.

Прогнозируемые объемы производства предприятий Концерна позволят повысить устойчивость Концерна. Здесь уместно отметить, что работы по созданию автоматизированной системы связи и управления для тактического звена за рубежом в рамках проекта Министерства обороны США (SPEAKeasy) начались в 1991 году. В соответствии с проектом предусматривалось создание SDR-системы, включающей в себя множество перепрограммируемых стандартов радиоинтерфейсов (названных радиоприложениями). В 1997 г. МО США инициировало отдельную программу по разработке комплексной тактической системы JTRS (Joint Tactical Radio System) для обеспечения обмена текстовой, звуковой и видеоинформацией на принципах сетецентризма при ведении боевых действий на суше, море и в воздухе. Основой программы JTRS по созданию семейства перепрограммируемых радиостанций явилась открытая архитектура SCA (Software Communications Architecture).

Министерство обороны США планирует завершить создание глобальной инфокоммуникационной сети к 2020 году. На эти цели только в интересах сухопутных войск, начиная с 1990 г., уже потрачено 230 млрд долларов. Вместе с тем сегодня наблюдается поток критики в адрес апологетов концепции «сетецентрических войн». К числу проблемных вопросов противники концепции относят следующие [4]:

– слишком большое внимание к повышению скорости управления может привести к поспешным и непродуманным решениям;

– ограниченные возможности проведения противоповстанческих операций против «неявного противника»;

– огромные потоки входящей информации выявили проблему «перегрузки информацией» и создали угрозу для процесса принятия решений;

– увеличение сложности военных систем: по оценкам специалистов, требуется свыше 30 млн строк кодов компьютерных программ;

– повышение уязвимости программного обеспечения, в том числе из-за включения открытого ПО.

Обращаясь вторично к рис. 1, отметим, что в отечественных системах имеет место примерно 10-летнее отставание по срокам внедрения в эксплуатацию отдельных функциональных режимов работы. Вместе с тем, сегодня известно, что зарубежные системы управления тактического звена в период 2008–2010 годов неоднократно подвергались всесторонним испытаниям, в том числе самым дорогим в истории военных учений с бюджетом в 250 млн долларов США в 2010 году [5]. Целью этих учений (Millennium Challenge) было доказать превосходство существующей военной доктрины США. Суть доктрины в том, что США, имея самые современные средства информационной поддержки военных действий, в том числе спутниковое наблюдение, суперкомпьютерное моделирование театра военных действий, онлайновые базы данных, экспертные системы поддержки операций и т.д., могут легко победить в любой войне. Учениями Millennium Challenge руководило Объединенное командование ВС США (JFCOM), которое привлекло к этой работе несколько сотен военных аналитиков, экспертов и программистов. Во время учений «синим» (свои) противостояли «красные» (неприятель), которых возглавлял генерал Пол Ван Рипер, убежденный, что война по своей природе непредсказуема и беспорядочна, а избыточная информация – совсем не преимущество. И достаточно знать мало, чтобы на основании своих знаний и имеющегося опыта принять правильное решение.

В итоге Ван Рипер на учениях «наголову разгромил войска США», сформулировав всего два принципа:

1. Для принятия верных решений необходимо ограниченное количество исходной информации.

2. По-настоящему успешные решения опираются на баланс между сознательным и инстинктивным мышлением.

По результатам учений Millennium Challenge специальным экспертным советом, составленным из членов Правительства США, JFCOM и DARPA, была предложена новая военная доктрина – Network Centric Warfare. По этой доктрине на смену подходам, основанным на «тупом технологическом превосходстве над противником, она включает в контур управления военными действиями живых людей».

### *Краткие выводы*

1. Концепция интегрированного развития средств управления, контроля, связи и разведки с последующей интеграцией телекоммуникационных и информационных технологий сегодня взята за основу информационного обеспечения на принципах сетецентризма всех уровней общевойсковых соединений.

2. Проблемами реализации всех современных сетей связи являются уязвимость, недостаточные связность, пропускная способность и живучесть. Эти проблемы десятикратно возрастают в условиях мобильности.

3. В попытке найти оптимальные решения имеющихся проблем в армии США, в ходе масштабных учений по применению разработанной системы управления тактического звена, пришли к необходимости включения в контур управления опытных специалистов.

### *Литература*

1. *Букреев А.М., Николаев В.И., Ионов С.В.* Прогнозно-стратегическое развитие многофункциональных технологий оборонной промышленности // Теория и техника радиосвязи. № 4. 2016. С. 88–93.

2. *Хоффман Л.Д.* Информационная война / Институт инженерных и прикладных проблем. Вашингтон, 1995. 212 с.

3. Рынок фиксированного широкополосного доступа в России в сегменте частных пользователей [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.json.tv.

4. http://pentagonus.ru/publ/k_voprosu_o_kritike_koncepcii_quot_setecentricheskikh_vojn_operacii_v_amerikanskikh_smi/19-1-0-1758.

5. *Силбо Э.* Сетецентрический подход к проведению боевых операций [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://oai.dtic.mil/oai?verb= getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA477071

Статья поступила в редакцию 12 февраля 2018 года

УДК 519.8:623

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И СВЯЗИ. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**

© Автор, 2018

**И.В. Владимиров**, к.т.н., доцент, директор НТЦ, АО «Концерн «Созвездие», e-mail: viv@ sozvezdie.su

*Проведена оценка результатов работ по созданию автоматизированной системы управления и связи. Проведен аналитический обзор решенных в ходе их выполнения научно-технических задач, учитывающих требования к управлению. Сформированы основные цели и направления развития автоматизированной системы управления и связи на ближайшую и дальнейшую перспективы, определены основные пути реализации этих направлений.*

***Ключевые слова:*** *автоматизированная система управления, система связи, сетецентрическая система управления.*

**THE AUTOMATED COMMAND, CONTROL AND COMMUNICATION SYSTEM. STATEMENT AND DEVELOPMENT PERSPECTIVES**

© All rights reserved, 2018

**I.V. Vladimirov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Director of R&D Center, JSC «Concern «Sozvezdie», e-mail: viv@ sozvezdie.su

*The results of the work on the creation of the Automated Command, Control and Communication System were evaluated. Analytical review of scientific and technical problems, taking into account the requirements for control, solved during that work were provided. The main goals and directions of the Automated Command, Control and Communication System development for the immediate and further perspectives have been formulated, and the main ways of these directions implementation have been determined.*

***Keywords:*** *automated control system, communication system, network-centric control system.*

Работы по созданию автоматизированной системы управления и связи (АСУ и С) развернуты в Воронежском НИИ связи (сегодня АО «Концерн «Созвездие») с 2001 года. За период 2001–2017 гг. специалистами предприятия с привлечением широкой кооперации предприятий промышленности проведен комплекс НИОКР по созданию технической и программно-информационной основ системы управления. Разработаны, прошли все необходимые виды испытаний, приняты на снабжение Вооруженных Сил Российской Федерации более 50 отдельных образцов техники и более 150 программно-информационных изделий. Осуществлены апробация и внедрение их в войска как автономно функционирующих средств управления и связи, так и в составе автоматизированных подсистем управления.

Результаты работ позволили впервые провести интеграцию в единую автоматизированную систему управления тринадцати структурно-функциональных подсистем – командования и штаба, разведки, ракетных войск и артиллерии, противовоздушной обороны, радиоэлектронной борьбы, связи, инженерных войск, войск радиационной, химической и биологической защиты, тылового и технического обеспечения, топогеодезического обеспечения, безопасности и защиты информации. Эти подсистемы управления силами и средствами, представляющие собой взаимоувязанную по целям, задачам и способам применения совокупность программно-технических комплексов автоматизации и связи, применяемые по единому замыслу и плану, позволяют объединить в соответствующие контуры автоматизированного управления органы и пункты управления тактических воинских формирований различного уровня (дивизия, бригада, полк, батальон).

Технической основой АСУ и С являются программно-технические комплексы (ПТК) и система связи. Программно-техническими комплексы стационарного и мобильного исполнения, как взаимоувязанная совокупность средств связи, автоматизации, коммутационного оборудования и специализированных средств, обеспе-

 ISSN 1995-7009

чивают реализацию автоматизированного управления подчиненными тактическими воинскими формированиями любого уровня, организацию связи, передачи данных и автоматизированную обработку документов по управлению подразделениями, решение оперативно-тактических задач лиц оперативного состава и должностных лиц по связи и безопасности информации, работу с графическими документами и данными оперативно-тактической обстановки.

Система связи, как совокупность взаимоувязанных и согласованных по задачам, месту и времени действий узлов и линий связи различного назначения, развертываемых или создаваемых по единому плану для решения задач обеспечения управления, является многофункциональной системой обмена всеми видами информации в закрытом и открытом режимах, управление которыми осуществляется АСУ связью в масштабе времени, близком к реальному.

Программно-информационной основой АСУ и С являются программное и информационное обеспечение, которые включают в себя унифицированное общее программное и информационно-лингвистическое обеспечение, а также специальное программное и информационно-лингвистическое обеспечение для непосредственного решения органами (пунктами) управления и должностными лицами целевых задач управления.

В целом в ходе выполнения комплекса работ по созданию АСУ и С разработано более 200 новых средств – комплексов средств связи и автоматизации, программно-технических комплексов, программных и информационных изделий, обеспечивающих командирам различных уровней интеграцию функций управления, связи, разведки, РЭБ, навигации.

Для решения задачи создания автоматизированной системы управления как сложной организационно-технической системы, учитывающей специфические требования и особенности управления, проведен комплекс исследовательских работ и получены новые научно-технические решения, среди которых можно выделить следующие.

*В части технической основы системы управления:*

1. Интеграция разнородных каналов связи в единую сеть связи, объединяющую всех абонентов системы.

Необходимость обеспечения как речевого обмена, так и обмена информацией (данными) на требуемых системой управления дистанциях определила необходимость использования разнородных радио- (КВ, УКВ (метровые, дециметровые)), радиорелейных и проводных каналов связи, отличающихся как по реализуемой скорости передачи информации, так и по обеспечиваемой дальности связи.

Используемые ранее радиально-узловой и рокадно-осевой принципы построения сетей связи основывались на использовании выделенных каналов связи для передачи конкретного типа информации, конкретному абоненту на заданную дальность с организацией так называемых сетей прямых связей с закреплением прав доступа абонента к каналу. Эти принципы хорошо зарекомендовали себя в системах управления для стационарной структуры управления. В условиях нестационарности системы управления по многим параметрам их использование не позволило достигнуть требуемых характеристик устойчивости управления. Потребовались новые решения, позволяющие формировать каналы связи, образованные средствами связи различного типа, равнодоступными для любого абонента. Их реализация в системе обеспечила организацию и предоставление прямых и составных каналов различных видов связи в режимах долговременной (по плану связи) и оперативной (по запросу абонента) коммутации.

2. Обеспечение динамической маршрутизации информации с контролем состояния и качества каналов связи, учитывающей дальности связи между абонентами, количество абонентов, их мобильность, доступную скорость передачи информации.

В ходе выполнения работ проведен анализ и апробация существующих (более 20) известных алгоритмов маршрутизации. По результатам анализа возможности их реализации выявлены существенные ограничения, влияющие на их применение в интересах выполнения требований системы управления, которые связаны с количеством одновременно работающих абонентов в сети, их мобильностью, а также требуемыми для обеспечения информационного обмена скоростями передачи информации. Применение известных алгоритмов маршрутизации не позволило обеспечить в полном объеме выполнение требований к вероятностно-временным характеристикам (ВВХ) информационного обмена.

В целях решения задачи обеспечения ВВХ информационного обмена, учитывающего требования к количеству одновременно работаю-

щих абонентов, нестационарности их местоположения, а также доступным по условиям ведения связи скоростям обмена информацией, разработан комплекс новых алгоритмов, адаптированных под обеспечение мобильности абонентов, изменяющиеся во времени дальности между ними, низкие (до 2,4 кБит/с) скорости передачи информации в канале.

Этот комплекс алгоритмов позволил, например, обеспечить информационный обмен (до 5 Мбит/с) между абонентами, находящимися на расстояниях до 60 км, средствами высокоскоростной связи за счет реализации методов автоматической маршрутизации, позволяющих обеспечить до 10 ретрансляций сообщений.

3. Обеспечение масштабируемости сетей связи в зависимости от складывающихся условий.

Традиционно применяемые способы организации сетей передачи информации, использующие технические средства радио-, проводной, радиорелейной связи, определяют «жесткую» привязку адресной части абонентов к конкретному объекту управления (командно-штабной, командирской машинам, машинам управления, средствам поражения). Для организации обмена информацией требуется знание адресов всех абонентов в сети и возможных фиксированных маршрутов доведения информации. В условиях нестационарности системы управления, когда происходит деградация структуры сетей связи и объекты управления «выбывают» из системы, восстановление функционирования сети связи требует длительных перенастроек с обновлением адресов и маршрутов доведения информации, учитывая реально допустимые информационные нагрузки (трафик) по направлениям связи. Устойчивость системы управления, получаемая при этом, не обеспечивает требования к целевым и временным показателям управления. Необходимость обеспечения непрерывности управления в складывающихся условиях определила необходимость решения задачи обеспечения автоматического масштабирования сети связи в зависимости от состояния ее структуры, которая учитывает складывающуюся на текущий момент времени фактическую структуру сети и реальные информационные нагрузки по направлениям связи. В результате решения этой задачи получены результаты, которые обеспечили локализацию трафика по группе абонентов (например, абонентов из состава пунктов управления дивизией, полком, батальоном) с учетом адаптации трафика к достижимому на данный момент времени качеству каналов связи.

4. Обеспечение «бесшовности» сетей связи, образованных каналами с различной пропускной способностью.

Использование при организации связи разнородных радио- (КВ, УКВ), радиорелейных и проводных каналов связи, отличающихся как по реализуемой скорости передачи информации, так и по обеспечиваемой дальности связи, определяет необходимость объединения их в единую сеть связи, позволяющую обеспечить «бесшовность» передачи информации между абонентами различных организационных структур системы управления. Это и определило необходимость решения задачи обеспечения непрерывности информационного обмена в составном информационном канале, построенном на базе разнородных каналов связи. Решение данной задачи позволило получить решения, позволяющие обеспечить многоскачковую ретрансляцию информации при увеличении дистанций связи между крайними в маршруте абонентами и осуществить автоматический переход на промежуточных звеньях маршрута с высокоскоростных на низкоскоростные каналы связи с ограничением объема предоставляемых услуг без потери взаимообмена информацией между крайними абонентами.

5. Обеспечение автоматической адаптации сети связи к изменяющимся условиям.

В целях повышения устойчивости управления проведен анализ существующих методов автоматического доведения информации до заданного абонента с заданным качеством с учетом особенностей организационного построения системы управления и факторов, влияющих на ее структуру в процессе функционирования.

Реализация технологии QoS (качества предоставления услуг), адаптированной под требования к АСУ и С, позволила получить решения самостоятельного определения приоритета абонентом. В результате резервирование и перераспределение каналов и трактов связи между абонентами с обеспечением приоритета (по типу трафика: голос, данные, служебный, геоинформация; по типу подчиненности: старший, младший) абонентам и информации осуществляется в соответствии со сложившейся обстановкой по связи и техническим состоянием средств. Автоматическая доставка информации до требуемого абонента с учетом изменяющихся условий и заданного приоритета существенно повысила устойчивость системы управления.

6. Обеспечение автоматической реконфигурации системы связи.

Изменяющаяся во времени структура управления войсками определяет требования к непрерывности информационного обмена. Решение этой задачи с применением технологии динамической адресации абонентов позволило получить решения, обеспечивающие при выходе объекта управления из строя и переходе абонента в другой объект управления автоматическую перерегистрирацию его в системе без потери его функциональности и без дополнительных настроек системы связи.

7. Повышение мобильности и живучести системы связи.

В основе построения системы связи реализован принцип одноранговости, заключающийся в том, что в структуре системы отсутствуют так называемые «базовые станции» – узловые центры системы, определяющие механизмы распределения и предоставления различных ресурсов и услуг. Все объекты связи в АСУ и С – одноранговые. Система связи АСУ и С – это децентрализованная система связи, в которой осуществлен переход от традиционных синхронных сетей связи к асинхронным сетям. Использование высокоскоростной составляющей в системе связи позволило за счет увеличения доли служебной информации (на 10%) и уменьшения скоростной избыточности обеспечить доведение информации до заданного абонента без проведения жесткой высокоточной временной синхронизации объектов связи, находящихся на значительном удалении друг от друга. При этом скоростная избыточность компенсируется многоскачковой ретрансляцией.

*В части программно-информационной основы системы управления:*

1. Расширение уровня автоматизации задач управления.

Автоматизация управления как процесс преобразования информации о складывающейся обстановке в управляющие воздействия с минимальным участием человека определяет качество управления.

В требования к АСУ и С впервые за всю историю автоматизации в Вооруженных Силах Российской Федерации, включая создание АСУ «Маневр», были включены требования по автоматизации более 80% всех задач, решаемых должностными лицами в тактическом звене, – задач общего и специального применения, реализованных в виде программных изделий специального программного обеспечения (СПО).

Функционально задачи СПО распределены стволовым принципом по начальникам родов войск и служб (НРВиС), а практически информационно связаны через общесистемное программное обеспечение (ОСПО). Их функциональная взаимосвязь реализована через задачи специального программного обеспечения командования и штаба (КиШ).

Традиционно, в соответствии с руководящими документами, результатами работы должностных лиц (НРВиС) являются оперативные документы: донесения, приказы, справки, распоряжения, боевые распоряжения, доклады. Для обмена между должностными лицами используются неформализованные и формализованные текстовые документы, команды и сигналы управления, сообщения о положении подвижных объектов, сообщения с данными оперативно-тактической обстановки (ОТО) для отображения на электронной карте местности (ЭКМ), сообщения с документами текстовых редакторов, сообщения информационно-расчетных задач (ИРЗ), данные регламентированного обмена (результатами сбора данных обстановки (СДО)).

Объединение в единую информационно и функционально согласованную систему информационных, расчетных и управленческих задач, решаемых в интересах органов и пунктов управления на различных уровнях управления, позволило повысить уровень автоматизации.

2. Обеспечение распределенной обработки информации.

В автоматизированных системах управления, разработанных ранее, использовался метод централизованной обработки информации с выделением отдельного сервера (центра обработки информации). Это, ввиду концентрации информации в одном локализованном месте, предъявляет высокие требования к производительности средств вычислительной техники (СВТ), к информационным нагрузкам на сети связи и к обеспечению живучести системы управления.

Необходимость исключения указанных недостатков определила необходимость реализации метода децентрализованной распределенной обработки информации с локализацией исходных данных для расчетов и их результатов по объектам управления и многовариантным обменом изменениями в исходных данных между ними. Автоматизированное рабочее место каждого НРВиС сегодня представляет собой полнофункциональный объект автоматизированного управления, оптимизированный как по задачам

СПО, так и по направлениям информационного обмена. Наличие данных для решения должностным лицом задач в любой момент времени, отсутствие ограничений по запросам дополнительной информации у других НРВиС определяют отсутствие зависимости от получения информации от одного центрального источника информации.

Единство информации при распределенной обработке на разных пунктах управления (ПУ) достигается за счет единого формализованного представления автоматизируемых функций управления и унифицированных решений по информационно-лингвистическому обеспечению АСУ и С.

3. Создание единой модели данных.

В целях минимизации временных характеристик обработки и представления информации сформированы формализованные описания автоматизируемых функций управления в виде единой модели данных. Это позволило определить набор логических понятий, а также сформулировать требования к их информационному представлению и последовательности обработки при решении задач управления в едином информационном процессе на пунктах управления соединения.

Учет вычислительных и телекоммуникационных возможностей ПТК и пропускных способностей каналов передачи данных позволил решить задачу оптимизации информационного трафика для всех компонентов информационно-лингвистического обеспечения, программных изделий общесистемного и специального назначения, а также перечня, структуры и объемов информационного обмена. Полученные решения позволили обеспечить функционирование более 200 автоматизированных задач в едином информационном пространстве.

4. Реализация единства специальных задач НРВиС в алгоритме общевойскового командира.

Основным функциональным требованием к автоматизации управления в тактическом звене изначально являлось обеспечение автоматизированного режима планирования боя с разработкой полного комплекта боевых графических и текстовых документов решения на бой, включая выдачу боевых распоряжений подразделениям соединения. Для подготовки в автоматизированном режиме решения на бой разработана система поддержки принятия решения (СППР), информационно связанная со всеми задачами специального программного обеспечения начальников родов войск и служб. Для этого определены общие для всех НРВиС автоматизируемые функции управления (работа с картой, документооборот, командно-сигнальный тракт, сбор данных обстановки (СДО), навигация, обращения к БД) и реализованы в виде применяемого во всех объектах автоматизации единого программного изделия – общесистемного программного обеспечения (ОСПО). Кроме того, все задачи СПО (более 200) объединены задачей СППР, что позволило сформировать общий функциональный процесс пункта управления – подготовку решения на бой и выдачу боевых распоряжений на применение частей и подразделений.

5. Оптимизация информационной нагрузки на сети связи.

Необходимость реализации требований по гарантированной доставке сообщений определяет необходимость реализации методов последовательного квитирования сообщений на разных уровнях – физическом, канальном, сетевом, прикладном. Это приводит к существенному увеличению информационной нагрузки на сети связи, имеющие ограниченные пропускные способности, и, как следствие, к снижению оперативности решения задач управления. В целях оптимизации информационной нагрузки на сети связи разработаны алгоритмы, впервые позволяющие исключить необходимость квитирования сообщений (на прикладном уровне) при выполнении требований по гарантированному доведению информации до должностных лиц.

6. Обеспечение одновременной обработки информации большого объема.

Большое количество объектов управления в тактическом звене и необходимость одновременного обмена информацией между ними (в соответствии со структурой управления) определяют необходимость обеспечения должностных лиц в режиме времени, близком к реальному, разнотипной информацией в виде текстовых и графических документов: о местоположении взаимодействующих объектов; об изменениях обстановки по противнику; изменениях обстановки по своим войскам с отображением на электронной карте, а также командно-сигнальной информацией. Реализованные технические, программные и информационные решения позволяют обеспечить возможность единовременной обработки в системе количества информации, величина которой может составлять от 200 Мбит (для командно-сигнальных сообщений) до 800 Тбит (сообщений в виде графики).

Результаты практической апробации созданной системы позволяют сформировать основные цели развития АСУ и С на ближайшую и дальнейшую перспективы, среди которых – расширение пространства управления, сокращение временных характеристик управления, повышение качества управления.

Целевыми направлениями развития системы в ближайшей перспективе являются:

1. Увеличение дистанций между пунктами и объектами управления без изменения объемов решаемых должностными лицами задач.

2. Повышение достоверности и актуальности информации об условиях ведения боевых действий, используемой при принятии решений.

3. Сокращение времени принятия решения при увеличении количества анализируемых альтернативных вариантов.

4. Сокращение времени гарантированного доведения принятых решений до объектов управления при увеличении объемов передаваемой информации.

5. Повышение устойчивости управления при изменении обстановки на поле боя.

В настоящее время главные изменения в формах и способах ведения боевых действий связаны, прежде всего, с переходом к концепции «сетецентрической» войны, которая направлена на повышение боевой мощи тактических воинских формирований, в первую очередь, за счет превосходства над противником в информационном обеспечении и управлении войсками и оружием. Собственно концепция «сетецентрической» войны находится в постоянном совершенствовании и развитии. При этом в рамках данной концепции могут быть реализованы модели управления войсками и оружием «сетецентрического», «информационно-центрического» и «знание-центрического» типов (см. таблицу).

Таблица

Модели управления войсками и оружием

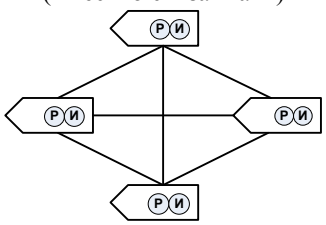
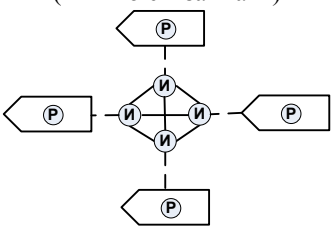
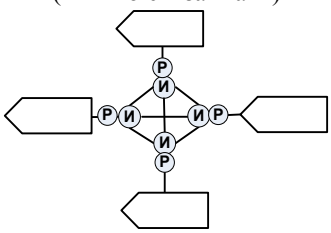
| Характеристика | Типы автоматизированных систем управления | | |
|---|---|---|---|
| | **Сетецентрическая, C4ISR** | **Информационно-центрическая, C5ISR** | **Знание-центрическая, C5ISR+** |
| Структура | Сетевая («жестко связанная»)  | Сетевая («мягко связанная»)  | Сетевая («мягко связанная»)  |
| | Автоматизированная настройка под заданную структуру ТВФ | Автоматизированная настройка (реконфигурация) под текущую обстановку на поле боя | Автоматическая настройка (реконфигурация) под текущую обстановку на поле боя |
| Функциональные сервисы | Интегрированные приложения | Приложения как сервисы | Самонастраиваемые приложения |
| Информационное обеспечение | Хранение – адресное, доступ – по запросу или по расписанию | Хранение – промежуточное ПО, доступ – на основе «публикации-подписки» | Хранение – промежуточное ПО, единая база знаний, доступ – на основе «публикации-подписки» |
| | ЕРИП (данные) | ЕРИП (интегрированная информация) | ЕРИП (знания) |

Таблица (продолжение)

| Характеристика | Типы автоматизированных систем управления | | |
|---|---|---|---|
| | **Сетецентрическая, C4ISR** | **Информационно-центрическая, C5ISR** | **Знание-центрическая, C5ISR+** |
| Информационное обеспечение | Ситуационная осведомленность в масштабе времени, близком к реальному | Ситуационная осведомленность в реальном масштабе времени | Прогнозирование развития боевой ситуации |
| | Визуализация обстановки – графический дисплей зоны боевых действий | Визуализация обстановки и интегрированных данных | Визуализация обстановки и знаний, интерфейс – «мозг-компьютер» |
| | Косвенное опознавание объекта управления по навигационной информации (по запросу) | Автоматизированная идентификация объекта управления по группе признаков | Автоматическая идентификация объекта управления |
| Сервисы связи | Единый тип сетей (самоорганизующиеся сети) | Программно-определяемые сети (самоорганизующиеся мультисервисные сети) | Когнитивные сети (самоорганизующиеся мультисервисные мультиагентные сети) |
| | Зона охвата 50×50 км | Зона охвата 100×100 км | Зона охвата 300×300 км |
| | Дополнительно – наземные ретрансляторы связи, расширенная УКВ радиосвязь | Дополнительно – воздушный сегмент (ретрансляторы связи) системы связи, спутниковая связь до батальона | Дополнительно – широкополосная спутниковая связь до солдата; интеграция с коммерческими сетями связи |
| Система поддержки принятия решений | - персональная,<br>- групповая<br>по органу управления,<br>- последовательная («сверху вниз») | - персональная,<br>- групповая,<br>- последовательно-параллельная (с делегированием прав «вниз») | - коллективная,<br>- параллельная (с сохранением принципа единоначалия |
| | Приложения, обеспечивающие деятельность ДЛ (автоматизация рутинных операций, визуализация поля боя, ситуационная осведомленность и др.) | Приложения, моделирование, обеспечивающие оперативность и качество выбора решений | Приложения, моделирование, прогнозирование за противника, обеспечивающие оперативность и качество выбора решений и упреждение противника в действиях |
| Средства реализации | Средства связи и автоматизации, программные средства | Программные средства, интегрированные сенсорные сети, сенсорные решетки, робототехника | Программные средства, нейрокомпьютеры, нейросети |

Модель «сетецентрического» типа предусматривает управление войсками и оружием на основе организации взаимодействия между управляющими органами по принципу «каждый с каждым». При этом обмен информацией между органами управления осуществляется либо «по запросу», либо «по представлению». Функции управления и информация «жестко» закреплены за управляющими органами. Модель «сетецентрического» типа обеспечивает повышение оперативности и устойчивости управления войсками и оружием за счет многократного резервирования каналов управления и сокращения циклов управления благодаря возможности «гибкого» формирования управляющих контуров под решаемые задачи. Модель «сетецентрического» типа положена в основу существующей АСУ и С.

Основное отличие модели управления «информационно-центрического» типа от модели «сетецентрического» типа состоит в изменении информационного взаимодействия между

управляющими органами, которое строится на основе технологии «публикация/подписка», обеспечивающей общий доступ органов управления к информации. Благодаря этому достигается дополнительное повышение устойчивости управления войсками и оружием в условиях деградации управляющей системы на основе «мягкой» (без реконфигурации системы управления) взаимозаменяемости источников и получателей информации. Переход к модели «информационно-центрического» управления является основной задачей развития и совершенствования АСУ и С ближайшей перспективы.

Наряду с реализацией модели управления «информационно-центрического» типа отличительной особенностью АСУ и С ближайшей перспективы будет использование унифицированных боевых платформ и помехозащищенной системы связи 6-го поколения.

АСУ и С дальнейшей перспективы планируется строить на основе модели управления войсками и оружием «знание-центрического» типа, реализующей общий доступ органов управления к информации и системе поддержки принятия решения (т.е. к знаниям) с одновременной реализацией принципов когнитивного управления на базе искусственного интеллекта и роботизированных платформ. В результате будет обеспечен дополнительный прирост оперативности и устойчивости управления войсками и оружием.

Прогнозируется, что за счет развития и совершенствования АСУ и С на основе последовательного внедрения рассмотренных выше моделей управления боевые возможности соединений Сухопутных войск могут быть увеличены в несколько раз.

В рамках планирования развития АСУ и С предлагается использовать адаптивный эволюционно-технологический подход к созданию перспективной АСУ и С, который представляет собой единый поэтапный процесс с внутренней синхронизацией программных мероприятий: НИОКР (в том числе технологических) и серийных поставок (включая модернизацию, ремонт, сервисное обслуживание и др.).

Таким образом, за прошедшие 15 лет АО «Концерн «Созвездие» разработан и практически реализован комплекс научно-технических мероприятий, который позволил впервые за новейшую историю Российской Федерации создать автоматизированную систему управления и связи, отличающуюся от известных аналогов высоким уровнем инноваций, создать научную и инженерную школы специалистов, готовых осуществлять дальнейшее развитие АСУ и С.

Статья поступила в редакцию 14 марта 2018 года

УДК 621.391.23

# ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ СВЯЗИ ТАКТИЧЕСКОГО ЗВЕНА УПРАВЛЕНИЯ

© Авторы, 2018

**А.Г. Алфёров**, к.т.н., начальник НТУ, e-mail: alferov@sozvezdie.su
**А.В. Мержвинский**, начальник отдела, e-mail: meralb@mail.ru
АО «Концерн «Созвездие»

*Рассмотрен путь поэтапного перехода от радиально-узловой системы связи тактического звена к современной системе, базирующейся на мультисервисных сетях с элементами самоорганизации. Обоснованы основные направления создания перспективной системы связи, учитывающей изменения способов ведения боевых действий в тактическом звене.*

***Ключевые слова:*** *системы управления, системы связи тактического звена управления, сети связи.*

# THE HISTORY AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF COMMUNICATION SYSTEMS FOR TACTICAL COMMAND AND CONTROL LEVEL

© All rights reserved, 2018

**A.G. Alferov**, Ph.D. in Engineering Science, Director of R&D Department, e-mail: alferov@sozvezdie.su
**A.V. Merzhvinskij,** Head of Department, e-mail: meralb@mail.ru
JSC «Concern «Sozvezdie»

*The way of step-by-step transition from the radial-nodal communication system of tactical link to the modern system based on multiservice networks with self-organization elements is considered. The article substantiates the main directions of development of advanced communications systems that reflect the changing ways of warfare at the tactical level.*

***Keywords:*** *control systems, communication systems for tactical command and control level, communication networks.*

Разработкой средств и комплексов радиосвязи для тактического звена управления ВНИИС (ныне АО «Концерн «Созвездие») занимается с момента своего основания. За время существования предприятия было разработано несколько поколений радиостанций для тактического звена. Достижения в этой области предопределили головную роль предприятия в выполнении ОКР «Созвездие-М» и «Созвездие-М2» при реализации целевой программы по созданию ЕСУ ТЗ. В процессе выполнения ОКР «Созвездие-М» и «Созвездие-М2» Концерн «Созвездие» вышел на качественно новый уровень создания систем связи для ТВФ.

Начиная с 2002 года, в период проведения ОКР «Созвездие-М» была создана система связи, охватывающая все звенья управления ТЗУ и обеспечивающая предоставление необходимых инфокоммуникационных услуг. В ходе создания системы связи использовались все самые передовые на тот момент технические решения, которые позволили создать единую транспортную сеть в ТЗУ, сети доступа и различные объекты сети (стационарные и мобильные). Система связи ЕСУ ТЗ 2005 года создавалась как цифровая система связи, состоящая из независимых сетей: сетей командной связи (СКС) и сети связи общего пользования (ССОП).

Основой системы связи стали сети командной связи (или сети прямых связей), обеспечивающие работу боевых контуров управления одиннадцати структурных подсистем, каждая из которых имеет свои особенности.

Сеть связи общего пользования разрабатывалась как цифровая сеть радиально-узловой структуры, базирующаяся на раздельных вторичных сетях с коммутацией каналов для телефонной связи и коммутацией пакетов для передачи данных.

Основные системотехнические решения были поддержаны набором базовых технических средств, таких как:

 ISSN 1995-7009

– комплекс средств радиорелейной связи «Ускорение 3» Р-419МР, Р-419МЦ, который совместно с аппаратурой каналообразования «Импульс» П-331 стали основой построения транспортной сети связи;

– коммутатор телефонной связи «Новелла» П-215, обеспечивающий развертывание автоматизированной телефонной связи как на пункте управления, так и при взаимодействии с другими узлами связи;

– коммутатор открытой телефонной связи «Поле» П-380К, позволивший увязать в единую коммутируемую телефонную сеть уровни управления от дивизии до батальона;

– аппаратура передачи данных «Сливка» Т-236, ставшая основой сети обмена данными в ЕСУ ТЗ.

Были разработаны или заимствованы подвижные объекты повышенной проходимости на колесном или гусеничном ходу, такие как станция спутниковой связи «Легенда МД» и радиостанция средней мощности КВ диапазона комплекса «Артек 0,5».

Основными средствами радиосвязи стали радиостанции КВ и УКВ диапазонов комплекса Р-168 «Акведук», разработанные на нашем предприятии. В них были реализованы одноканальный и многоканальный режимы, а также работа в режиме ППРЧ.

Основой построения транспортной сети связи и сетей доступа, а также абонентских сетей на пунктах управления дивизии стали комплексные аппаратные связи МП-1И, МП-2И, МП-3И, МП-4И, разрабатываемые в ОКР «Медногорец-М», а также КАС Н-18-23Н, разработанная в ОКР «Переселенец-5».

В качестве абонентских объектов были использованы унифицированные командно-штабные машины (УКШМ), также разработанные нашим предприятием.

Все это позволило провести в 2006 году испытания системы связи ЕСУ ТЗ. Основная доля информационного обмена приходилась на сети прямой связи между объектами, рассредоточенными по территории ответственности ТВФ, что позволяло обеспечить информационный обмен даже в условиях отсутствия инфраструктуры полевой транспортной сети.

В дальнейшем увеличение информационных потребностей системы управления ТЗУ и реализация принципов сетецентризма потребовали перехода к мультисервисным высокоскоростным сетям, которые не могли быть реализованы с использованием традиционных КВ и УКВ средств прямой связи.

В этой связи построение единой транспортной мультисервисной сети, обеспечивающей передачу комбинированного трафика с учетом необходимого качества обслуживания, стало основным направлением развития системы связи ТЗУ. Среди видов услуг связи мультисервисной системы связи ТЗУ можно выделить следующие основные: телефонная связь, обмен данными в реальном времени или близком к реальному, передача графической информации, доступ к базам данных, совместная работа и т.п.

Повышение живучести системы связи потребовало обеспечения резервирования маршрутов, что обусловило необходимость создания избыточных маршрутов и средств маршрутизации, а также обеспечения возможности построения системы связи с распределенной структурой.

Для реализации новых требований в 2009 году в рамках ОКР «Созвездие-М2» была построена система связи нового типа.

Так были практически полностью модернизированы комплексные аппаратные связи МП-1И и МП-2И, которые в настоящее время имеют обозначение МП-1ИМ и МП-2ИМ, модернизированы аппаратная ПУС-Д и командно-штабные машины Р-149 и Р-142.

Взаимодействие между всеми аппаратными в транспортной сети и между объектами в сетях пунктов управления стало осуществляться с использованием технологии построения MESH-сетей, что позволило применить алгоритмы самоорганизации в части определения оптимального маршрута доставки сообщений, приоритезации трафика, дополнительные мультисервисные услуги связи.

Основными изделиями, реализующими построение транспортной MESH-сети, стали модернизированные пакетные станции Р-168МРА-01 и Р-168МРА-02 совместно с аппаратурой внутренней связи, коммутации и управления (АВСКУ), аппаратурой Т-236В с интерфейсом Ethernet.

Таким образом, на данном этапе была создана «гибридная» система связи, которая со стороны первичных сетей базировалась на современных принципах построения мультисервисных сетей.

Тактические воинские формирования представляют наиболее динамичный вид войск. Им

свойственно постоянное обновление форм и способов подготовки и проведения войсковых операций, влекущее изменение системы управления.

Технической основой системы управления тактическими воинскими формированиями является система связи. На этом основании система связи, прежде всего, должна обеспечивать полноценную реализацию системой управления новых форм вооружённой борьбы. В современных условиях характер боевых действий все больше приобретает вид «бесконтактной» борьбы с применением высокоточного оружия по всем вскрытым объектам системы управления и связи противника, его средствам (комплексам) высокоточного оружия, объектам материально-технического обеспечения и другим важнейшим объектам. Приоритетом стало достижение информационного превосходства над противником в реальном масштабе времени. Действия тактических воинских формирований стали мобильными, а районы ответственности увеличились на порядок и более.

Обзор зарубежных источников показывает, что в армиях передовых стран, и прежде всего США, с целью поддержания соответствия изменяющимся условиям активно внедряются сетецентрические принципы управления. В [1] подчёркивается, что согласно определению Пентагона сетецентрическая война (СЦВ) направлена на перевод информационного преимущества с помощью информационных технологий в конкурентное между надежными сетями географически распределенных сил. Эта сеть в сочетании с изменениями в технологиях, организации, процессах и людском потенциале, возможно, позволит создать новые формы организационного поведения. Реализация принципов и возможностей сетецентрических операций (СЦО) является основной целью преобразований в МО США и их апологетами оценивается как существенное видоизменение тактики ведения войны и структуры вооруженных сил.

В реальности СЦО создают множество новых требований к обслуживающим сетям и информационной инфраструктуре. Техническая реализация принципов сетецентризма и достижение ожидаемых результатов представляют собой значительную техническую сложность.

Так, в работе [2] констатируется, что сеть связи для СЦО должна быть всеохватывающей, безопасной, несущей достоверную информацию, робастной, защищенной и должна иметь высокую пропускную способность. Это предполагает наличие многорежимной коммуникационной среды с динамической маршрутизацией, с применением многократной ретрансляции, с обеспечением связи вне области прямой видимости. Она должна быть также адаптивной и самоуправляемой при сбоях на узлах и линиях связи и обеспечивать качество услуг, гарантированное при данной пропускной способности, надежности, задержке, приоритете. Сеть должна использовать все достижения технологии гражданского назначения, в том числе интернет-протоколы (IP) как общий стандарт и другие стандарты и протоколы открытых систем при необходимости. Коммерческие стандарты безопасности должны использоваться для управления мобильными кодами, отказами в услугах при внутрисистемных угрозах. Управление безопасностью и риском должно рассматриваться как интегральная разработка.

Выполнение указанных требований оказывается труднодостижимым. Так, предполагается, что сеть связи следующего поколения (NGN – Next Generation Network) будет использовать все достижения технологии гражданского (коммерческого) назначения, в том числе интернет-протоколы (IP) как общий стандарт и другие стандарты и протоколы открытых систем при необходимости. В обеспечение данного подхода ещё в 2009 г. агентство DARPA подписало с корпорацией Lockheed Martin контракт на создание протокола Military Network Protocol (военный сетевой протокол, MNP). MNP должен отличаться от нынешнего «фундамента» сети – протоколов TCP/IP – «повышенной безопасностью, динамическим распределением пропускной способности и основанными на правилах уровнями приоритетов для отдельных участников и узлов сети». Вместе с тем ее удовлетворительного решения до сих пор не получено. В своё время трансфер военных технологий в гражданскую сферу проходил практически без затруднений. А вот обратный процесс – перенос современных технологий связи из гражданской сферы в военную область – требует неординарных усилий и во многих случаях, по понятным причинам, невозможен. Впрочем, в военной сфере внедрение инноваций в связи не является самоцелью, их появление актуально настолько, насколько они приводят систему связи в соответствие с новыми оперативно-тактическими требованиями к системе управления войсками и оружием в ТВФ.

Задача создания для тактического звена NGN как универсальной платформы коммутации, маршрутизации, криптозащиты и каналообразования, совместимой с сетями стационарной и полевыми системами высшего звена управления, требует коренного пересмотра всех архитектурных основ существующих систем связи вплоть до широкого внедрения в них принципов самоорганизации [3]. Но прежде всего необходимо обеспечить гибкость их логистически-материальной составляющей, к которой относятся системы передачи, оконечные средства, линии связи, узлы и всё, что касается организации производства и предоставления связных ресурсов, и виртуальной (логической) составляющей – всё, что связано с транспортировкой сообщений и коммутацией пакетов. Это предполагает выполнение ряда требований:

• *во-первых*, всю сеть необходимо строить на принципах единой унифицированной транспортной сети, позволяющей без потерь передавать трафик, генерируемый любыми оконечными устройствами;

• *во-вторых*, в идеале все элементы системы связи мобильных формирований должны поддерживать единый протокол обмена данными (например, протокол пакетной передачи IP);

• *в-третьих*, средства коммутации и маршрутизации должны реализовывать механизмы разноприоритетности передачи данных того или иного оконечного оборудования;

• *в-четвертых*, используемые средства радиосвязи должны создаваться на основе адаптивных радиотехнологий и обладать способностью изменения параметров сигналов в зависимости от помеховой обстановки и характеристик распространения радиоволн в используемых частотных диапазонах;

• *в-пятых*, коммутационное и коммуникационное оборудование должны обеспечивать адаптивное перераспределение допустимого для каждого абонента объема передаваемой информации в соответствии с заданными приоритетами и реальной полосой пропускания магистральной сети.

Создание такой сети связывают с внедрением новых и совершенствованием уже существующих технологий беспроводной передачи данных. Однако в условиях пересечённой местности, значительной удаленности создание зон сплошного информационного покрытия большой площади для данных сетей является проблематичным. Как правило, эти задачи приводят к созданию сложной наземной инфраструктуры полевой системы связи, при построении которой не удается в полном объеме устранить противоречия между устойчивостью, разведзащищенностью и мобильностью, с одной стороны, и пропускной способностью – с другой. Поэтому развитие наземной инфраструктуры мультисервисной полевой системы связи требует поддержки со стороны воздушной или космической компонент, выражающейся в использовании ретрансляторов на беспилотных летательных аппаратах (БЛА) или искусственных спутниках земли (ИСЗ).

Таким образом, создание системы связи тактического звена управления, удовлетворяющей современным требованиям информационного обеспечения ведения боевых действий, является сложной комплексной и многофакторной задачей, решение которой во многом предопределит тактические возможности подразделений на поле боя и, возможно, повлияет на характер боевых действий в целом.

В настоящее время АО «Концерн «Созвездие» ведет активную работу по дальнейшему совершенствованию системы связи тактического звена. Среди основных факторов, определяющих облик перспективной системы связи ТЗУ, можно выделить следующие:

1. Увеличение средств автоматизации, реализующих тактику «бесконтактной» вооруженной борьбы, увеличение количества источников и получателей информации, работающих как с участием человека, так и чисто автоматически. Вся эта совокупность будет в дальнейшем расширять состав сети, изменять характер информационной нагрузки, что потребует от системы связи повышения устойчивости функционирования.

2. Повышение динамики боевых действий, влекущее повышение подвижности подразделений и пунктов управления. Это требует улучшения показателей мобильности системы связи, что, в свою очередь, приведет к дальнейшему увеличению доли средств радиосвязи, сокращению использования проводных линий и средств связи, увеличению доли спутниковых средств связи.

3. Увеличение информационной нагрузки на систему связи со стороны системы управления и дальнейшее расширение перечня предоставляемых услуг связи. Это повышает требования к быстродействию средств и комплексов связи, повышению пропускной способности, совер-

шенствованию механизмов передачи информации с разными требованиями по качеству обслуживания.

4. Повышение интеграции автоматизированной системы управления ТЗУ в общую систему управления ВС РФ, что потребует повышения эффективности взаимодействия на транспортном уровне, устранения «швов» и перехода к единым техническим решениям.

5. Увеличение территории ответственности подразделений ТВФ, что приведет к повышению способности подразделений действовать автономно, в отрыве от основных сил. В этой связи потребуется пересмотр решений в части обеспечения эффективности энергопотребления, скрытности работы.

6. Повышение рациональности использования частотного ресурса и совершенствование методов повышения помехоустойчивости, связанное как с ухудшением электромагнитной обстановки вследствие роста количества собственных радиоизлучающих средств, так и с организованным радиоэлектронным противодействием.

Указанные факторы в значительной мере влияют на облик перспективной системы связи, определяют её эффективность и основные функциональные и тактико-технические характеристики боеготовности, устойчивости, мобильности, пропускной способности, разведзащищенности, реконфигурируемости [4].

Основным средством информационного обмена в тактических воинских формированиях армий всех стран, обеспечивающим необходимый уровень мобильности, была и будет радиосвязь. С учетом указанных выше особенностей совершенствование средств радиосвязи в ТЗУ является одной из важнейших задач. Должны быть реализованы технические решения, направленные на увеличение пропускной способности радиосвязи при одновременном снижении массогабаритных показателей радиостанций, повышении скрытности работы, реализации принципов качества обслуживания, динамической маршрутизации. Указанные задачи в настоящее время решаются в ходе выполнения ОКР «Аксион».

В современных условиях ведения боевых действий требуется увеличение доли использования средств спутниковой связи в общем информационном обмене ТЗУ. Повышение доступности средств спутниковой связи в ТЗУ значительным образом скажется на мобильности подразделений и повысит пространственный размах. В этой связи основные усилия должны быть направлены на увеличение возможностей группировки космических аппаратов и совершенствование наземных средств спутниковой связи. Результатом этой работы должно стать широкое применение средств спутниковой связи подразделениями ТЗУ в любой точке мира для беспрепятственного обмена всеми видами информации, включая ресурсоёмкие приложения.

В связи с объективными сложностями развития группировки космических аппаратов связи и использования их ресурса в интересах системы управления ТЗУ альтернативным вариантом расширения территориального размаха системы связи является использование беспилотных и пилотируемых летательных аппаратов как носителей комплекса радиотехнического оборудования. В настоящее время рядом предприятий промышленности ведутся ОКР по разработке комплекса ретрансляторов воздушного базирования с использованием аэростатов. Особое место также уделяется использованию малоразмерных БЛА для организации связи с удаленными районами территории ответственности. Несмотря на ограниченность функционала БЛА в сравнении с космическими аппаратами, существенным достоинством данного вида техники является дешевизна, гибкость и простота применения. В комбинации с наземными средствами связи применение ретрансляторов на БЛА при решении локальных задач не уступает по эффективности средствам космической связи.

Появление радиостанций комплекса «Аксион», увеличение доли средств спутниковой связи и применение ретрансляторов на лётно-подъемных средствах позволят кардинальным образом изменить облик системы связи ТЗУ. Значительно увеличится пространственный размах системы связи, повысится эффективность взаимодействия между подразделениями ТВФ. Одновременно с этим станет возможным проработка вопроса сокращения состава узлов связи, перераспределения состава оборудования между объектами системы связи в целом.

Кроме того, с целью расширения пространственного размаха сети связи могут быть использованы технические решения, принятые в ОКР «Антей».

Совершенствование средств первичной связи должно быть поддержано развитием и модернизацией средств и систем вторичной связи. Основное направление развития должно заклю-

чаться в создании гибридных мультисервисных устройств, обеспечивающих гибкое управление всеми видами предоставляемых услуг связи, реализацию политики QoS, управление потребляемым ресурсом транспортной сети, абонентской и сетевой маршрутизацией.

Отдельной задачей должно стать повышение эффективности комплекса управления функционированием технических средств и совершенствование вопросов автоматизированного управления связью. Актуальность этих задач уже сегодня обуславливается значительной сложностью настройки оборудования, большим объемом настроечных данных, высокими требованиями к эксплуатирующему персоналу. Ожидается, что в перспективе сложность средств и систем связи будет только возрастать. С целью исключения влияния «человеческого фактора» доля участия оператора в настройке оборудования должна поэтапно сокращаться. В перспективе должна преобладать доля автоматизации процессов настройки, своевременной диагностики, локализации и устранения аварийных ситуаций. Необходимо дальнейшее совершенствование систем контроля и управления с реализацией интеллектуальных функций самовосстановления связи и поддержки принятия решений.

Указанные направления развития должны лечь в основу большого комплекса работ по совершенствованию системы связи ТЗУ, которые способны кардинальным образом изменить облик системы связи. Часть этих работ ведутся уже в настоящее время, в частности, основой будущей системы связи ТЗУ могут стать усовершенствованные аппаратные МП-1ИМ и МП-2ИМ, которые показали свою высокую эффективность в период эксплуатации в войсках и в ходе различных учений. Построенные на передовых технических решениях, они обладают потенциалом для модернизации и после незначительной доработки вполне могут соответствовать существующим и перспективным требованиям. Работу по модернизации данных аппаратных АО «Концерн «Созвездие» проводит уже сегодня. Одновременно с аппаратными МП-1ИМ и МП-2ИМ ведутся работы по дальнейшему развитию командно-штабных, командирских машин и машин управления. По всем этим направлениям в Концерне накоплен значительный опыт работ.

Таким образом, закладываемые сегодня технические решения, которые реализуются АО «Концерн «Созвездие», позволят существенным образом изменить облик системы связи ТВФ будущего, повысить ее эффективность и улучшить по всем характеристикам и предъявляемым требованиям.

***Литература***

1. *Савин Л.В.* Сетецентрическая и сетевая война. Введение в концепцию. М.: Евразийское движение, 2011. 130 с.

2. *Alberts David S., Hayes Richard E.* Power to the Edge: Command and Control in the Information Age [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.dodccrp.org/files/Alberts_Power.pdf, 2005.

3. *Мержвинский А.В., Попов Б.М.* Технология самоактуализации сетей связи в режиме, опережающем режим реального времени системы управления // Теория и техника радиосвязи. 2018. № 1. С. 27–33.

4. *Алферов А.Г., Толстых Н.Н.* Оценка устойчивости телекоммуникационной системы в условиях информационного конфликта // Вестник Военно-авиационного инженерного училища. 2012. №2 (6). С. 217–225.

Статья поступила в редакцию 13 марта 2018 года

УДК 623.438:004.3

# НАПРАВЛЕНИЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ В ЦЕЛЯХ ПОВЫШЕНИЯ КОМАНДНОЙ УПРАВЛЯЕМОСТИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ОБРАЗЦОВ БРОНЕТАНКОВОЙ ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ ДЛЯ ЕСУ ТЗ

© Авторы, 2018

**Р.А. Быстрых**, директор НТЦ, e-mail: bra@sozvezdie.su
**Р.А. Асташов**, заместитель начальника НТУ, e-mail: astashov@sozvezdie.su
**Д.М. Уткин**, к.т.н., начальник сектора
АО «Концерн «Созвездие»

*Проведен анализ подходов к улучшению параметров командной управляемости современных образцов бронетанковой военной техники, определена роль программно-технических комплексов в модернизации образцов бронетанковой военной техники, выявлены тенденции развития перспективных систем радиосвязи, средств информационного обеспечения и навигации.*

***Ключевые слова:*** *командная управляемость, программно-технический комплекс.*

# DEVELOPMENT TREND FOR IMPROVING SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEXES TO ENHANCE COMMAND CONTROLLABILITY OF ADVANCED MODELS OF ARMORED VEHICLES FOR UNIFIED TACTICAL LEVEL CONTROL SYSTEM

© All rights reserved, 2018

**R.A. Bystrykh**, Director of R&D Center, e-mail: bra@sozvezdie.su
**R.A. Astashov**, Deputy Director of R&D Department, e-mail: astashov@sozvezdie.su
**D.M. Utkin**, Ph.D. in Engineering Science, Head of Section
JSC «Concern «Sozvezdie»

*This article describes a complete analysis for improving command controllability of modern armored vehicles, defines the role of software and hardware complexes in modernization of armored vehicles and reveals development trends for advanced radio communication systems, information support and navigation aids.*

***Keywords:*** *command controllability, software and hardware complexes.*

В последнее время в мире резко возросло количество локальных и региональных конфликтов, в которых задействуется большое количество людских и военных ресурсов. При этом не вызывает сомнения тот факт, что для получения преимущества на поле боя у противоборствующих сторон необходимо наличие современных и перспективных образцов различных типов вооружений. Как показывают события в Сирии, в подавляющем большинстве случаев обладание новейшими средствами ведения боя, в частности применение модернизированных образцов бронетанковой военной техники (БТВТ), с успехом позволяет предопределить исход военных операций. Своевременная модернизация систем вооружений изделий БТВТ, сухопутных войск и ВКС должна представлять собой единый процесс создания быстрой и мобильной целевой силы для решения кризисных ситуаций по всему миру.

К модернизируемой технике предъявляются повышенные требования в части технических характеристик. Так, например, наряду с традиционными требованиями к системам в изделиях БТВТ, таких как требования по огневой мощи, по защищенности и живучести т.д., на первый план выходит такое требование, как командная управляемость [1–3].

В общем случае под командной управляемостью понимается приспособленность подразделений и образцов БТВТ к изменению процессов своего функционирования под воздействием внешних управляющих команд в заданных условиях боевого применения.

Командная управляемость оказывает непосредственное влияние на общее время выполнения команд, где в качестве оценочного показателя командной управляемости выступает время цикла управления.

 ISSN 1995-7009

### *Этапы и направления совершенствования ПТК образцов БТВТ*

В начале двухтысячных для повышения командной управляемости изделий БТВТ предполагалось их оснащение современными многофункциональными многоканальными средствами связи, обеспечивающими открытую и маскированную радиосвязь тактического звена управления.

Для удовлетворения потребности воинских формирований в радиосвязи в качестве основного радиосредства, удовлетворяющего предъявляемым требованиям, АО «Концерн «Созвездие» были разработаны радиостанция Р-168-25У-2 и аппаратура внутренней связи коммутации и управления (АВСКУ), предназначенные для установки в объекты на колесном и гусеничном ходу.

Основные характеристики радиостанции Р-168-25У-2 и АВСКУ, формирующих комплекс средств связи (КСС) образцов БТВТ, приведены на рис. 1.

**Техническая основа КСС:**
– радиостанция «Акведук» 5-го поколения (Р-168-25У-2);
– АВСКУ.
**Функциональные возможности:**
– организация радиосвязи;
– организация внутренней связи между членами экипажа изделия ВТ.
**Технические характеристики:**
1) количество трактов приема и передачи – 2;
2) дальность связи при максимальной мощности на антенну Р-168БШДА – 20 км;
3) основные режимы работы: фиксированная частота симплекс, фиксированная частота симплекс – техническое маскирование, фиксированная частота двухчастотный симплекс, псевдослучайная перестройка рабочей частоты, адаптивная связь.

Рис. 1. Основные характеристики комплекса средств связи для образцов БТВТ

Однако при таком подходе к модернизации средств управления достаточно скоро пришли к выводу, что в части радиосвязи улучшаются только некоторые конкретные функциональные возможности изделий БТВТ. На современном же этапе при прогнозировании моделей войн будущего активно развивается концепция сетецентризма, в основе которой лежит ориентация на повышение боевых возможностей воинских формирований за счет достижения информационного превосходства, объединения участников боевых действий в интегрированную систему. Все сети сводятся в единое информационно-коммуникационное пространство, функционирующее в реальном масштабе времени, что позволяет войскам действовать намного эффективнее, быстрее и результативнее [4–6].

При этом на новый уровень необходимо выводить и командную управляемость, которую следует трактовать как способность воспринимать и реализовывать информацию, поступающую к образцу БТВТ, действующему в составе подразделения. Командная управляемость в новой концепции реализуется в процессе решения следующих задач:

– прием информации о противнике, соседних объектах, местности и преобразование ее в команды боевого управления;

– подготовка данных для ведения огня и маневра и передача их в команды на системы управления огнем и движением;

– оценка результатов огня и движения, их корректировка;

– защита информационного и речевого обмена;

– обеспечение дистанционного управления движением и огнем.

Для решения поставленных задач и оказания влияния на общее время их выполнения была принята новая концепция построения ЕСУ ТЗ, основанная на внедрении программно-технических комплексов (ПТК) в военную технику.

Можно выделить основные предоставляемые возможности ПТК:

– организация радиосвязи;

– автоматизированное управление отдельными подразделениями, отдельными изделиями военной техники (ВТ) и отдельными военнослужащими;

– решение информационных, расчетных и других задач в составе ЕСУ ТЗ в масштабе времени, близком к реальному;

– формирование и отображение оперативно-тактической обстановки на электронной карте местности (ЭКМ) на месте и в движении образцов ВТ.

Для обеспечения требований к командной управляемости образцов БТВТ потребовалось применить много новых технических решений: от модернизации радиостанции Р-168-25У-2 до введения в состав ПТК радиостанций других диапазонов, автоматизированных рабочих мест (АРМ) и аппаратуры спутниковой навигации (АСН).

Так, например, в новом разработанном варианте радиостанции Р-168-25У-2 появился радиоканал оперативно-командной связи в диапазоне ДМВ1 (390-440 МГц), используемый для речевой радиосвязи; диапазон МВ (30-108 МГц) стал использоваться преимущественно для передачи данных. Проведена модернизация радиостанции Р-168-25У-2 путем увеличения скорости передачи данных с 16 до 256 кбит/с с адаптивным автоматическим изменением скорости передачи в зависимости от дальности (помеховой обстановки). В состав ПТК введена радиостанция Р-168МРА диапазона ДМВ2 (1,5-1,75 ГГц) для обеспечения высокоскоростной передачи данных со скоростью до 11 Мбит/с на расстояниях до 3 км. Для интеграции в единую систему управления военнослужащих, действующих в пешем порядке, в современных ПТК обеспечена связь по передаче данных в диапазоне 2,4 ГГц (Wi-Fi). В состав ПТК был интегрирован блок *телекоммуникационный модуль* (ТКОМ). Данный блок обеспечивает динамическую реконфигурацию телекоммуникационных настроек путем автоматического формирования и ведения распределенного справочника абонентов, автоматический выбор оптимального канала связи для передачи информации (высокоскоростного/низкоскоростного), получение навигационных данных и времени от АСН.

Разработанные и введенные в состав ПТК АРМ и АСН позволили предоставить командиру информационное обеспечение процессов подготовки и принятия решения, планирования применения подчиненных частей (подразделений), а также постановки и доведения задач в составе автоматизированной системы управления.

Состав, функциональные возможности и технические характеристики современных ПТК представлены на рис. 2.

**Техническая основа ПТК:**
– модернизированная радиостанция «Акведук» 5-го поколения;
– АВСКУ;
– средства навигации;
– средства вычислительной техники.

**Функциональные возможности:**
– организация радиосвязи;
– автоматизированное управление отдельными подразделениями, отдельными изделиями ВТ и отдельными военнослужащими;
– решение информационных, расчетных и других задач в составе ЕСУ ТЗ в масштабе времени, близком к реальному;
– формирование и отображение оперативно-тактической обстановки на ЭКМ на месте и в движении изделия ВТ.

**Технические характеристики:**
1) количество автоматизированных рабочих мест – 1;
2) количество радиоканалов оперативно-командной связи:
– МВ диапазон (от 30 до 108 МГц) – скорость до 256 кбит/с;
– ДМВ1 диапазон (от 390 до 440 МГц) – скорость 1,2 кбит/с;
– ДМВ2 диапазон (от 1,5 до 2,4 ГГц) – канал высокоскоростной передачи данных со скоростью до 11 Мбит/с

Рис. 2. Состав, функциональные возможности и технические характеристики современных ПТК образцов БТВТ, входящих в состав ЕСУ ТЗ

Тенденции развития современных способов и средств ведения боевых действий приводят к смещению направлений роста основных характеристик и потенциальных возможностей образцов БТВТ в область автоматизации рабочих процессов по управлению огнем, движением, ситуаци-

онной осведомленности. За счет значительного усложнения различных комплексов и систем образцов БТВТ происходит повышение основных свойств боевых машин. Так, например, с ростом огневой мощи образцов БТВТ произошло усложнение комплекса управления огнем, которое проявилось в резком увеличении числа органов управления и средств отображения информации, а также операций, которые вынужден выполнять экипаж при подготовке и в процессе боевого применения вооружения БТВТ. Это же можно в полной мере отнести и к средствам связи, и к другим системам образца БТВТ.

В связи с возросшими потенциальными возможностями современных образцов БТВТ по огневой мощи, мобильности, скорости перемещения и оперативности решения боевых задач появились технические решения, позволяющие расширить физические возможности экипажа по управлению различными системами образца БТВТ и взаимодействию систем между собой на поле боя. Это, в свою очередь, определило предпосылки для дальнейшей модернизации аппаратуры ПТК для образцов БТВТ по улучшению показателей командной управляемости.

Данные тенденции отчетливо проявились при разработке образцов БТВТ на перспективных платформах «Армата», «Курганец-25», «Бумеранг» и позволили к уже имеющемуся функционалу добавить новый, а именно:

– взаимодействие с бортовыми управляющими системами объекта БТВТ;

– автоматизированное формирование и передачу вышестоящему командиру интегральных показателей о текущем состоянии изделия ВТ (огневая мощь, подвижность, защищенность).

Кроме того, использование системы самоориентирующейся совместно с автоматизированным рабочим местом (АРМ-ПТК) позволило решить такие принципиально важные для образцов БТВТ задачи, как прием и обработка внешних команд по управлению огнем и маневром танка (целе- и курсоуказания), определение ориентации корпуса, а также совместно с приборным комплексом объекта БТВТ – определение угла и дальности до цели с последующим нанесением местоположения цели на электронную карту.

В качестве перспективного задела проведены исследования по возможности реализации дистанционного управления огнем и движением образцов БТВТ. Результаты этих исследований позволяют уже сейчас говорить о значительном повышении уровня автоматизации подразделений и, как следствие, выходе командной управляемости объектов БТВТ на новый качественный уровень.

На рис. 3 приведены направления совершенствования перспективных систем управления образцов БТВТ в ЕСУ ТЗ.

**Техническая основа ПТК:**
– радиостанции 6-го поколения «Аксион»;
– АВСКУ;
– специализированный вычислитель АРМ-ПТК, предназначенный для применения в объектах БТВТ;
– система самоориентирующаяся гироскопическая.
**Добавление новых функциональных возможностей:**
– взаимодействие с бортовыми управляющими системами (БИУС) объекта БТВТ;
– автоматизированное формирование и передача вышестоящему командиру информации о текущем состоянии изделия ВТ:
– о техническом состоянии объекта БТВТ;
– об интегральных показателях систем объекта БТВТ (боевая мощь, подвижность и др.);
– о наличии боеприпасов, топлива и др.;
– взаимодействие с объектами БТВТ посредством IP-телефонии;
– возможность дистанционного управления огнем и движением образцов БТВТ.

Рис. 3. Направления совершенствования перспективных систем управления образцов БТВТ в ЕСУ ТЗ

***Заключение***

Таким образом, можно сделать вывод, что развитие программно-технических комплексов позволят значительно повысить уровень командной управляемости за счет высокой вероятности доведения команд управления, увеличения скорости передачи данных, а также решения принципиально новых расчетных и специализи-

рованных задач в составе автоматизированной системы управления. Это, в свою очередь, приводит к повышению эксплуатационных характеристик образцов БТВТ и исключению вероятности ошибочных действий экипажа.

***Литература***

1. *Парфенов Е.И.* Методология обоснования тактико-технических требований к современным образцам БТВТ // Танкостроение: Состояние и перспективы. М: Минобороны России, 2006. С. 22–33.

2. *Халитов В.* От «Терминатора» до боевых систем будущего: о главных преимуществах танковой армады России [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://tass.ru/armiya-i-opk/4687080

3. *Шевченко А.А.* Актуальные вопросы развития отечественного бронетанкового вооружения и техники и высокозащищенных военных автомобилей [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://federalbook.ru/files/OPK/Soderjanie/OPK-10/III/Shevchenko.pdf

4. *Канчуков С.* Что такое сетецентризм и как к нему прийти [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.iarex.ru/articles/44355.html

5. *Кондратьев А.* Сетецентрический фронт [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.oborona.ru/includes/periodics/maintheme/2011/0210/211255558/detail.html

6. *Савин С.В.* Сетецентрическая и сетевая война. Введение в концепцию. М.: Евразийское движение, 2011. 130 с.

Статья поступила в редакцию 23 марта 2018 года

УДК 621.396.9

**НОСИМЫЕ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ**

© Авторы, 2018

**О.А. Глазунов**, к.т.н., начальник сектора
**А.Н. Мокроусов**, руководитель проекта
**Т.В. Осицкая**, начальник отдела, e-mail: tvo@sozvezdie.su
АО «Концерн «Созвездие»

*Предложена структура управляющего устройства в системе ЕСУ ТЗ, образуемой мобильными пользователями. Комплексы, построенные на основе данной структуры, предназначены для сокращения времени на постановку задач управления за счет: применения встроенных алгоритмов информационно-расчетных задач; автоматизированного формирования ситуационной задачи в графическом и текстовом виде; передачи данных по высокоскоростному каналу; автоматизированного определения местоположения каждого пользователя.*

***Ключевые слова:*** *управляющее устройство, коммуникатор, терминал, мобильный пользователь.*

**PORTABLE SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEXES**

© All rights reserved, 2018

**O.A. Glazunov**, Ph.D. in Engineering Science, Head of Sector
**A.N. Mokrousov**, Project Manager
**T.V. Ositskaya**, Head of Department, e-mail: tvo@sozvezdie.su
JSC «Concern «Sozvezdie»

*This article offers a structure of a controller within the Unified Tactical Level Command and Control System to be formed by mobile users. Complexes based on the structure are intended to minimize the time needed for command and control mission statement through the following solutions: application of integrated algorithms of information and computing tasks; automated setting of a situational task represented in graphical and text forms; high-speed data transmission; automated identification of user's location.*

***Keywords:*** *controller, communicator, terminal, mobile user.*

Программно-технические комплексы (ПТК) являются основой систем связи. ПТК выполняют функцию системы управления, которая позволяет автоматизировать регулирование потоков информации и увеличить функциональные возможности элементов системы. Особое внимание при разработке системы управления должно уделяться носимым ПТК (НПТК), поскольку они обеспечивает повышение возможностей личного состава всего подразделения в условиях вооруженного конфликта.

В связи с этим актуальна задача разработки элементов НПТК, размещаемых на отдельном пользователе, которые позволяли бы увеличить эффективность, производительность и управляемость всего локального окружения в этих условиях. Необходимость решения этой задачи обусловлена тем, что существующая на сегодняшний день экипировка личного состава силовых структур и оснащение их специальными средствами не в полной мере соответствуют современным требованиям тактики, основанной на новых подходах к выполнению боевых типовых и специальных задач [1].

Стандартная функциональная схема системы управления изображена на рис. 1. Она состоит из следующих элементов [2]:

– чувствительные устройства (ЧУ) – для измерения подаваемых на управляющее устройство (УУ) сигналов;

– вычислительные устройства (ВУ) – для реализации алгоритма работы УУ;

– исполнительные устройства (ИУ) – для непосредственного управления объектом.

На УУ поступают три вида сигналов:

– информация о величине $X$, определяющей состояние объекта (О);

– информация о величине $X_З$, задающей цель управления;

– информация о $F$ – возмущениях, нарушающих режим работы объекта, а он сам вырабатывает сигнал управления $U$.

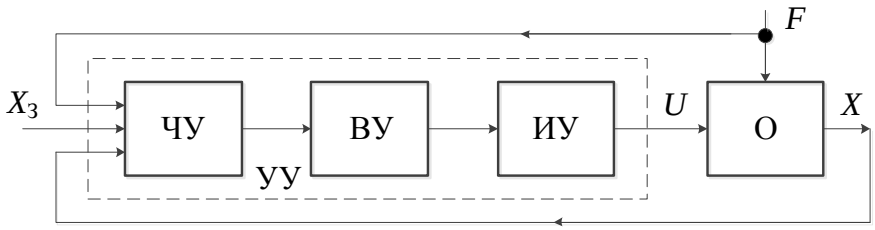



Рис. 1. Общая блок-схема системы управления

В АО «Концерн «Созвездие» разработана архитектура УУ для НПТК, конкретная реализация которой приведена на рис. 2. В данной архитектуре различают три подсистемы, каждая из которых выполняет свою роль [3]:

– *коммуникатор* выполняет роль вычислительного устройства;

– *терминал* выполняет роль чувствительного устройства;

– *радиостанция* выполняет роль исполнительного устройства.

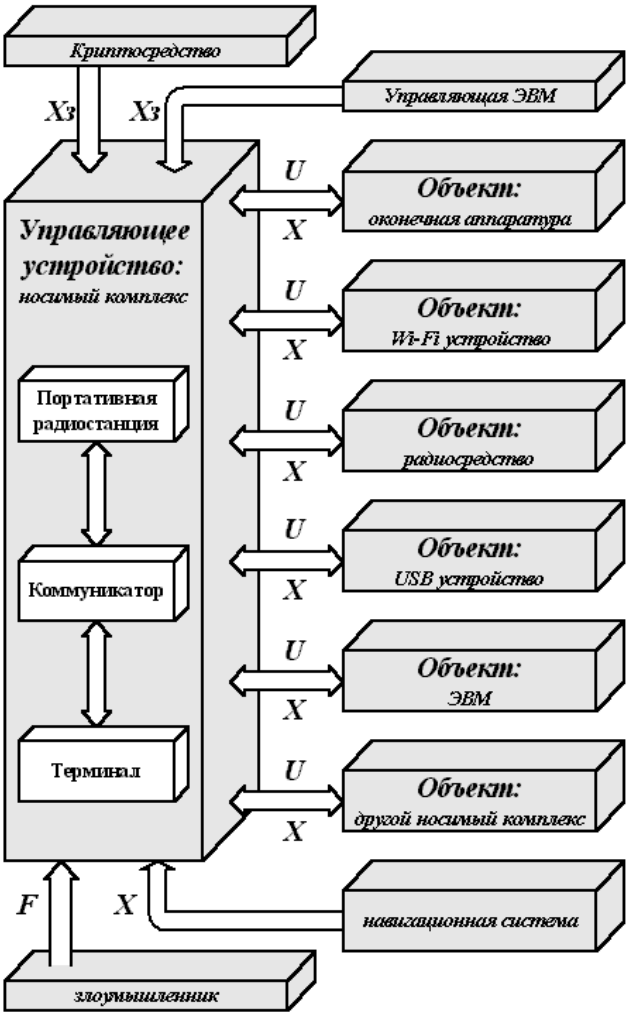



Рис. 2. Блок-схема системы управления НПТК

Подобное построение УУ позволит автоматизировать управление потоками информации, увеличить функциональные возможности и мобильность отдельных пользователей. На основе этого обеспечивается возможность взаимодействия и связи в

автоматизированном и неавтоматизированном режимах, информационная безопасность и помехозащищенность связи и передачи данных, определение местоположения и адаптивная осведомленность на всех уровнях.

Предложенная структура УУ реализована в программном обеспечении, позволяющем вместо одного высокопроизводительного процессора использовать распределенную архитектуру из нескольких более простых и менее мощных процессоров, каждый из которых выполняет только определенную часть общей задачи (маршрутизация, фильтрация, учет трафика, функции сетевого моста, работа с несколькими сетевыми интерфейсами одновременно). Данное построение программного обеспечения повышает производительность, надежность и безопасность системы управления.

Примером практической реализации УУ, представленной на рис. 2, является разработанный в АО «Концерн «Созвездие» комплект переносимый Р-175, принятый на снабжение Вооруженных Сил РФ. Комплект Р-175 представлен на рис. 3.

Рис. 3. Комплект Р-175 как пример реализации УУ

***Комплект переносимый (УНКВ-07)***

*Назначение:*

• автоматизация управления;

• повышение живучести;

• увеличение боевых возможностей и мобильности тактических групп и отдельных военнослужащих;

• является составной частью базовых комплектов ЕСУ ТЗ;

• обеспечивает должностным лицам уровня рота–взвод–отделение–военнослужащий возможность взаимодействия, управления и связи в автоматизированном и неавтоматизированном режиме.

*Технические характеристики:*

• время определения координат собственного местоположения в СНС ГЛОНАСС/GPS – не более 3 мин;

• время непрерывной работы без подзарядки аккумуляторных батарей – не менее 8 ч;

• масса 4 кг.

*Состав:*

• терминал тактический ТТ-6,5;

• коммуникатор абонентский АК-3,5;

• радиостанция Р-168-0,5УМ.

*Функциональные возможности:*

– одновременная передача речи и данных в режиме СКЗИ по УКВ радиоканалу с дальностью связи до 2,5 км;

– передача данных в режиме СКЗИ по каналу широкополосного доступа стандарта IEEE 802.11b/g;

– определение координат собственного местоположения в СНС ГЛОНАСС/GPS, отчет, хранение и индикация текущего времени;

– обмен навигационной информацией, сообщениями и документами в локальных сетях;

– отображение местоположения объектов противника и своих подразделений на фоне цифровой карты местности;

– паролевая система защиты от несанкционированного доступа;

– встроенный автоматический контроль работоспособности и диагностика технических средств;

– сенсорное управление + возможность работы с клавиатурой;

– подключение технических средств по интерфейсам RS-232, USB и Ethernet;

– обеспечение совместной работы с лазерными дальномерами, РЛС, БПЛА;

– размещение на экипировке военнослужащего.

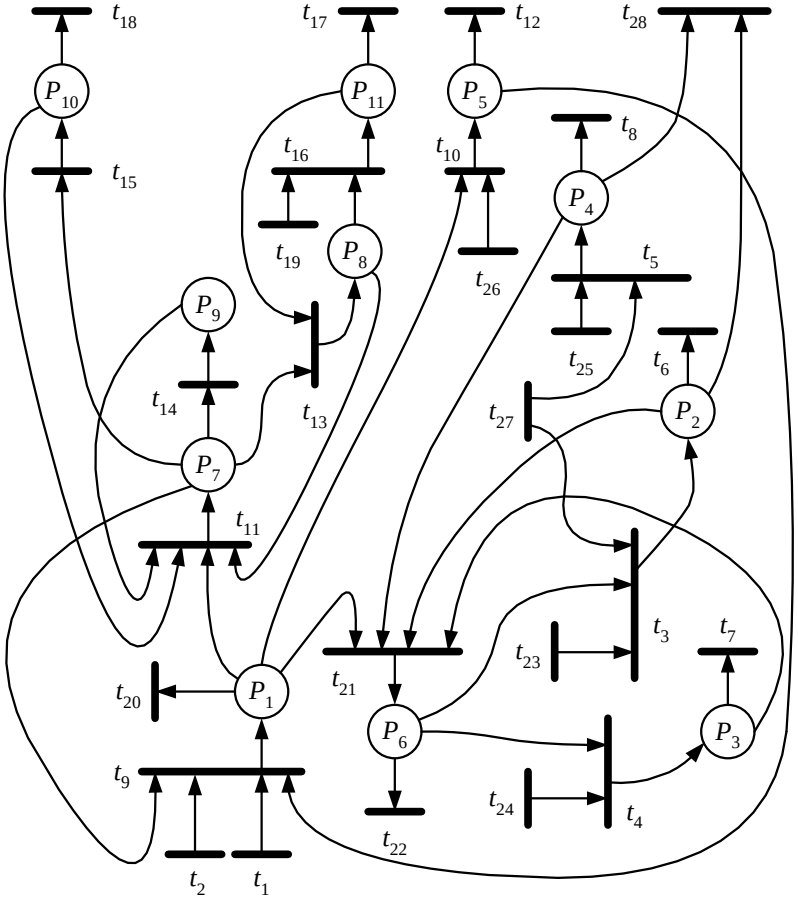



Рис. 4. Сеть Петри при функционировании вычислительного устройства (коммуникатора):
условия: $P_1$, $P_2$, ..., $P_{11}$ – обработка информации в составных частях устройства;
события: $t_1$, $t_2$, ..., $t_{28}$ – обмен информацией с оконечными устройствами

Наглядное представление функционирования подсистем Р-175 дает их описание с помощью сетей Петри [4]. Например, сеть Петри для вычислительного устройства (коммуникатор) представлена на рис. 4.

### *Заключение*

В целом, Р-175, работающий в соответствии с разработанным программным обеспечением, позволяет значительно сократить время на постановку задач управления, подключение новых или дополнительных образцов радиоэлектронного оборудования за счет открытой архитектуры электронной платформы.

Данные характеристики Р-175 дают возможность автоматизировать управление, повысить живучесть, увеличить боевые возможности и мобильность тактических групп и отдельных военнослужащих в ЕСУ ТЗ, обеспечивают должностным лицам уровня рота–взвод–отделение–военнослужащий возможность взаимодействия, управления и связи в автоматизированном и неавтоматизированном режимах.

### *Литература*

1. Руководство российской армии проявляет заметный интерес к экипировке военнослужащих нового поколения. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.arms-expo.ru/ 05505705212405 2051053051.html

2. *Юревич Е.И.* Теория автоматического управления: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Энергия, 1975. 416 с.

3. *Глазунов О.А., Мокроусов А.Н., Осицкая Т.В.* Носимый программно-технический комплекс // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10, № 12. С. 23–30.

4. *Питерсон Дж.* Теория сетей Петри и моделирование систем: пер с англ. М.: Мир, 1984.

Статья поступила в редакцию 14 марта 2018 года

УДК 621.396.9

# СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ РАДИОКАНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ

© Авторы, 2018

**С.В. Иевлев**, руководитель программ, e-mail: ievlev@yandex.ru
**С.В. Кривопустов**, директор НТЦ, e-mail: ksvksv@rambler.ru
АО «Концерн «Созвездие»

*Изложено состояние разработки АО «Концерн «Созвездие» и применения в интересах систем управления новой области техники связи и информатики – помехозащищенных радиоканалов управления. Показаны области применения этих радиоканалов, основные характеристики и пути их достижения. Рассмотрены перспективы развития системы радиоканалов, вытекающие из тенденций развития объектов и систем их управления.*

***Ключевые слова:*** *автоматизированные системы управления, программно-определяемые радиосредства, согласованные фильтры, гарантированные характеристики доведения.*

# THE STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF THE CONTROL RADIO CHANNEL SYSTEM

© All rights reserved, 2018

**S.V. Ievlev**, Program Manager, e-mail: ievlev@yandex.ru
**S.V. Krivopustov**, Director of R&D Center, e-mail: ksv@rambler.ru
JSC «Concern «Sozvezdie»

*This article describes the current state of development and application of brand-new noise-proof control radio channels for communication and IT control systems elaborated by JSC «Concern «Sozvezdie». The publication also covers applications and basic characteristics of the radio channels, including the methods needed to achieve such characteristics and prospects for development of the radio channel system based on the trends in development of controlled objects and respective control systems.*

***Keywords:*** *automated control systems, Software Defined Radio (SDR), matched filters, guaranteed communication characteristics.*

Радиоканалы управления предназначены для обеспечения устойчивого обмена информацией между территориально разнесенными звеньями автоматизированных систем управления. По этим радиоканалам доводится приоритетная информация сравнительно небольшого объема, реализующая необходимые управляющие воздействия на элементы систем в основных режимах их применения, в том числе решающих стратегические задачи и размещенных на объектах различного вида базирования (наземных, морских, воздушных).

Решаемые с помощью радиоканалов управления задачи определили следующие основные особенности их построения:

– обеспечение технологической безопасности при создании технических средств радиоканалов на основе применения исключительно отечественной элементной базы и программного обеспечения;

– высокие вероятностно-временные характеристики доведения информации;

– высокая устойчивость технических средств и каналов в целом к различного вида воздействиям, в том числе преднамеренным помехам.

Работы по созданию радиоканалов управления ведутся в АО «Концерн «Созвездие» почти 50 лет. За это время сформировалась целая область техники на основе нескольких поколений связных и информационных технологий. Концерном обеспечивается полный цикл разработки, серийного производства и обеспечения эксплуатации радиоканалов. Радиоканалы используются несколькими поколениями систем управления различного назначения.

Радиоканалы управления работают в нескольких диапазонах частот – от низкочастотных до высокочастотных, что позволяет получить высокие характеристики доведения в различных условиях применения. Высокочастотные каналы ориентированы на обеспечение доведе-

ния по всей территории обслуживания за минимальное время, малые габариты антенн этих диапазонов частот позволяют разместить технические средства радиоканалов практически на любых подвижных объектах. Низкочастотные каналы и соответствующие средства ориентированы на доведение с высокой вероятностью в условиях воздействий как на каналы, так и на объекты размещения средств. Этому способствует относительная стабильность условий распространения радиоволн с малым затуханием сигналов на больших дальностях и возможность применения в необходимых случаях подземных (защищенных) и подводных (скрытых) антенн.

Работа радиоканалов управления организуется административно-диспетчерской службой, оснащенной специальными техническими средствами и программным обеспечением и решающей задачи поддержания постоянной готовности радиоканалов к применению, ввода в модемы и кодеки текущих параметров каналов и их смены с учетом изменения условий применения каналов. В необходимых случаях организуется работа в режиме ретрансляции.

Аппаратура радиоканалов на объектах размещения не требует участия оператора в своей работе, включается по команде от смежного звена управления и функционирует в полностью автоматическом режиме.

Радиоканалы управления отличаются высокой помехозащищенностью, которая достигается применением оптимальных методов обработки широкополосных сигналов, помехоустойчивого кодирования, селекции и подавления различного рода помех.

По мере совершенствования элементной базы модемы, обеспечивающие формирование и обработку широкополосных сигналов для различных поколений разработанной аппаратуры, прошли путь от использования согласованных фильтров на аналоговых линиях задержки через аналого-цифровые корреляторы к чисто цифровым устройствам. Устройства селекции и подавления помех также начинались как прецизионные аналоговые «гребенки» фильтров, усилителей и ключей с постепенным переходом к цифровым устройствам.

Цифровая реализация модемов, кодеков и устройств подавления помех сделала возможным в ряде последних разработок использовать технологию программно-определяемых радиосредств, позволяющую проводить модернизацию средств на уровне программного обеспечения с целью быстрого и относительно экономичного запуска новых сервисов без приобретения и освоения нового дорогостоящего оборудования.

Цифровая реализация позволила также разработать и реализовать новые алгоритмы повышения помехозащищенности и уменьшения времени доведения. В ряде случаев основные характеристики радиоканалов в части степени подавления комплекса различных помех и минимизации времени доведения приблизились к теоретически достижимым пределам.

В ходе создания радиоканалов управления было решено множество задач по разработке необходимых для этого устройств и алгоритмов. Например, созданы заглубленные защищенные антенные решетки с распределенными элементами передающего центра, обеспечивающими подведение сигнала к каждому элементу решетки, усиление мощности и необходимое фазирование. Разработаны и реализованы методы излучения широкополосных сигналов узкополосными антеннами без потерь в согласующих устройствах. Разработаны типовые конструкции аппаратуры для различных условий ее эксплуатации.

Перспективы развития радиоканалов управления лежат в направлениях дальнейшего совершенствования характеристик технических средств, повышения характеристик доведения в каналах и формирования на их основе системы радиоканалов.

Актуальность формирования нового облика системы радиоканалов управления обусловлена появлением в настоящее время новых совершенных объектов управления, как правило, размещенных на мобильных объектах различного вида базирования. Данные объекты потребовали их включения в контуры управления с помощью новых модификаций систем управления. Развитие этих систем происходило обычно с использованием оригинальных алгоритмов и протоколов взаимодействия со смежными системами. Для функционирования в реальных условиях применения этим системам управления требуются радиоканалы управления с гарантированными характеристиками доведения. Поэтому необходима система радиоканалов управления, построенная на единых системных протоколах и единых протоколах взаимодействия с различными системами управления. Она позволит обеспечить доведение информации в интересах всех разрабатываемых систем управления и должна

интегрировать в себя находящиеся в эксплуатации радиоканалы управления.

Повышение характеристик доведения во вновь разрабатываемых каналах должно проводиться на основе их приближения к теоретически обоснованным пределам и реализации в том числе ранее разработанных и апробированных алгоритмов. Совершенствование технических средств при этом требует учета перспектив развития отечественной элементной базы и связанных с этим ограничений. Новая элементная база должна позволить также уменьшить массогабаритные характеристики аппаратуры и расширить возможность ее использования на различных объектах.

В настоящее время в АО «Концерн «Созвездие» ведется ряд опытно-конструкторских работ, направленных на создание нового облика аппаратуры и системы радиоканалов управления с использованием последних достижений предприятий, разрабатывающих новую отечественную элементную базу, с целью реализации намеченных путей развития.

Статья поступила в редакцию 1 марта 2018 года

УДК 621.396.4

# ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ РАДИОСВЯЗИ КОМПЛЕКСОВ ПВО-ПРО

© Автор, 2018

**Д.Ю. Чаркин**, директор НТЦ, АО «Концерн «Созвездие», e-mail: office@sozvezdie.su

*Рассматриваются особенности функционирования систем радиосвязи комплексов ПВО-ПРО. Отмечены основные факторы, снижающие помехоустойчивость систем связи. Предложены методы и квазиоптимальные алгоритмы, направленные на снижение влияния негативных факторов на работу системы связи.*

***Ключевые слова:*** *системы радиосвязи, цифровые антенные решетки, эквалайзер, гибридные ППРЧ/ШПС системы.*

# PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF RADIO COMMUNICATION SYSTEMS FOR ANTI-AIRCRAFT DEFENSE AND MISSILE DEFENSE COMPLEXES

© All rights reserved, 2018

**D.Yu. Charkin**, Director of R&D Center, JSC «Concern «Sozvezdie», e-mail: office@sozvezdie.su

*The article describes the features of functioning of radio communication systems intended for anti-aircraft defense and missile defense complexes, highlights the key factors that affect noise immunity of communication systems and offers methods and quasioptimal algorithms intended to reduce the impact of adverse factors on the performance of a communication system.*

***Keywords:*** *radio communication systems, digital phased arrays, equalizer, hybrid frequency-hopping/pseudonoise signal (FH/PNS) systems.*

В современных комплексах ПВО-ПРО организуются системы радиосвязи, использующие технологию прямой видимости. Сеть связи должна обеспечивать надежный обмен данными и информацией в реальном или близком к реальному масштабе времени между распределенными на местности батареями, вышестоящими штабами, соседними боевыми подразделениями и подразделениями поддержки. Система связи должна обладать достаточной избыточностью, с тем чтобы обеспечивать непрерывную связь. Для успешного выполнения боевых операций подразделение должно поддерживать работоспособность системы связи, которая должна обеспечивать: контроль за воздушными боями, связь командных, административных и логистических единиц с вышестоящими штабами и подчиненными им подразделениями.

С ростом потока передаваемой информации при разработке системы связи необходимо использовать сложные многопозиционные сигналы, которые для повышения помехоустойчивости требуют применения дополнительных мер, позволяющих компенсировать влияние различных негативных факторов. В работе рассматриваются различные перспективные подходы, позволяющие увеличить помехоустойчивость современных систем связи комплексов ПВО-ПРО.

## *Особенности функционирования систем связи комплексов ПВО-ПРО*

На современном театре военных действий подразделение ПВО-ПРО может интегрироваться в состав бригады сухопутных войск как составной части корпуса или подразделения уровня выше корпуса. От этой системы может потребоваться участие в команде по обеспечению действий оперативных группировок и экспедиционных корпусов. В этом случае организация и качество связи существенным образом зависят от размещения системы ПВО на местности. Характерной особенностью работы комплексов является ярко выраженная радиальная структура построения системы связи. Информационное взаимодействие строится от «центра» к «ведомым». Это связано с особенностью функционирования боевых алгоритмов работы комплексов и определяет ряд дополнительных ограничений для системы связи.

Для систем связи предусмотрены следующие меры защиты от помех, в том числе в условиях помех различного происхождения: высокий энергетический потенциал; режим псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ) в широком диапазоне; помехоустойчивое кодирование.

 ISSN 1995-7009

Системы связи комплексов размещаются на мобильных объектах, а следовательно, при их разработке необходимо учитывать ограниченные энергетические ресурсы, которые могут быть предоставлены.

Исходя из вышесказанного, в системах связи комплексов ПВО-ПРО актуальны и востребованы методы, позволяющие повышать рабочее отношение сигнал–шум за счет высокоэффективных алгоритмов обработки сигнала при его передаче и приеме.

***Факторы, влияющие на снижение помехоустойчивости систем связи***

Одним из основных факторов, ухудшающих помехоустойчивость системы связи, является неидеальность передаточной характеристики канала распространения. Это связано с тем, что в канале связи сигнал претерпевает искажения, вызванные различными физическими явлениями [1].

Многолучевое распространение возникает в результате отражения, рассеяния и дифракции электромагнитных волн при взаимодействии с различными объектами в пространстве. Таким образом, сигнал в приемной антенне содержит сумму волн с различными задержками, амплитудами и фазами. Суперпозиция этих волн приводит к изменению амплитуды и фазы принимаемого сигнала.

Затенение вызывается объектами, такими как здания, холмы, деревья и т.п., оказывающимися на пути сигнала и ограничивающими прямую видимость между передатчиком и приемником. Изменения параметров сигнала во времени, вызванные затенением, обычно относят к медленным замираниям.

Потери в тракте характеризуются как зависимость падения средней мощности сигнала от расстояния между передатчиком и приемником. В условиях прямой видимости в рамках двулучевой модели Введенского средняя мощность сигнала уменьшается пропорционально четвертой степени расстояния между передатчиком и приемником.

Ещё одним фактором, ухудшающим работу системы связи, является нелинейность передающего радиотракта [2]. При формировании и усилении полезного сигнала из-за нелинейного характера устройств передающего тракта возникают различные внеполосные излучения. Внеполосные составляющие, не попадающие в частотную область канала передачи, например гармоники рабочей частоты, достаточно просто подавляются выходным фильтром. Интермодуляционные составляющие нечётного порядка, наоборот, лежат вблизи рабочей частоты и непосредственно проходят на выход передающего устройства. Уменьшить их уровень простыми методами уже не удаётся. Помимо появления излучения в соседнем канале нелинейность выходного тракта приводит также к искажению сигнала и в основной его полосе, что увеличивает вероятность битовой ошибки и уменьшает достоверность приёма.

В качестве источников внутри- и внеполосных радиоизлучений могут выступать различные устройства передающего тракта: модулятор, синтезатор частот, смеситель, но основным устройством, вносящим нелинейные искажения в полезный сигнал, является усилитель мощности (УМ). С одной стороны, обеспечение высокой энергетической эффективности является крайне важным требованием, предъявляемым к усилителям мощности, так как при этом минимизируется потребляемая мощность от источников питания, снижаются расходы на энергопотребление. С другой стороны, именно при работе в энергоэффективном режиме усилитель в наибольшей степени начинает проявлять нелинейные свойства. Таким образом, при разработке передающего тракта возникает вопрос поиска компромисса между линейностью системы и ее энергоэффективностью.

И, наконец, часто системе связи приходится работать в условиях воздействия мешающих сигналов – помех. Помехи могут иметь естественное или искусственное происхождение, создаваться непреднамеренно (взаимные внутрисистемные помехи) или преднамеренно станцией радиоподавления.

*Таким образом, в рамках совершенствования систем связи возникают следующие задачи, требующие разрешения:*

– совершенствование методов борьбы с многолучевостью [1];

– разработка алгоритмов линеаризации передающего тракта в условиях высокой энергоэффективности [2];

– поиск средств повышения дальности связи и скорости передачи информации за счет создания высокоэффективных антенных систем [3], применения ретрансляторов [4–6];

– анализ влияния внутрисистемных помех на системы связи с ППРЧ [7] и разработка алгоритмов создания ортогональных ансамблей последовательностей ППРЧ, минимизирующих

взаимные помехи, образованные сигналами с ППРЧ [8];

– разработка новых и совершенствование существующих методов и устройств борьбы с преднамеренными помехами за счет применения алгоритмов пространственной фильтрации помех [3], сигналов с расширенным спектром, в том числе гибридных ШПС/ППРЧ сигналов, совместно с перемежением и помехоустойчивым кодированием [9–14].

### *Пути повышения помехоустойчивости систем связи при воздействии дестабилизирующих факторов*

Рассмотрим возможные пути повышения помехоустойчивости систем связи комплексов ПВО-ПРО при воздействии дестабилизирующих факторов.

Для борьбы с вызванной каналом межсимвольной интерференцией (МСИ), которая возникает вследствие многолучевого распространения радиоволн, может использоваться процедура выравнивания сигнала (эквализация) [1], которая заключается в использовании методов, собирающих рассеянную энергию символа в её исходный временной интервал. Если канал является частотно-селективным, эквалайзер (устройство выравнивания) усиливает частотные компоненты с малыми амплитудами и ослабляет с большими. Эквалайзеры обычно реализуются во временной или частотной области.

Проведённые в [1] исследования показали, что для систем радиосвязи, работающих на одной несущей частоте в пакетном режиме, более эффективными с точки зрения обеспечения помехоустойчивости и сложности аппаратной реализации являются частотные эквалайзеры, позволяющие выравнивать характеристики каналов как со слабой, так и с сильной частотной селективностью. При оценке частотной характеристики канала необходимо применять алгоритмы шумоподавления. Например, предложенный в [1] алгоритм вейвлетного шумоподавления позволяет увеличить помехоустойчивость системы связи на 2–4 дБ.

Стандартный подход к формированию сигнала для систем с частотной эквализацией – это вставка циклического префикса, необходимая для предотвращения межблочной интерференции вследствие свойства цикличности операций с помощью дискретных преобразований Фурье. Однако это снижает пропускную способность канала связи. Следовательно, необходим такой метод, который позволит избежать этого недостатка с сохранением качества выравнивания сигнала. Так, в работе [1] предлагается алгоритм частотного выравнивания на основе метода хранения перекрытий, который не предполагает использования циклических префиксов при формировании сигнала.

Для уменьшения искажений, вносимых усилителем мощности, в современных системах связи применяют метод цифровых предыскажений, главная идея которого состоит в добавлении цифрового блока – корректора, вносящего искажения в сигнал до того, как он поступит на вход усилителя. Основными узлами системы с цифровыми предыскажениями являются цифровой корректор и блок адаптации. Блок цифрового корректора реализует комплексную характеристику, обратную к соответствующей характеристике усилителя, а блок адаптации подстраивает эту характеристику под изменяющиеся условия работы устройства (температура, старение активных элементов и прочее).

Для нахождения параметров корректора используют известные из теории адаптивной фильтрации сигналов алгоритмы, такие как метод стохастического градиента и рекурсивный метод наименьших квадратов. Основным преимуществом первого алгоритма является его вычислительная и алгоритмическая простота, за которую приходится платить низкой скоростью адаптации и тщательным подбором шага сходимости. Второй алгоритм обладает большей скоростью сходимости по сравнению с первым, но при этом он требует больше арифметических операций на один отсчет сигнала. Недостатком обоих алгоритмов является то, что они могут расходиться при плохой обусловленности корреляционной матрицы.

Компромиссным решением задачи идентификации нелинейной системы может служить метод сопряженных градиентов [2]. Данный алгоритм обладает следующими преимуществами: не расходится, даже если корреляционная матрица плохо обусловлена; обладает достаточно быстрой сходимостью и не требует никаких дополнительных подбираемых параметров. Подробно возможность применения данного алгоритма для идентификации моделей цифрового корректора и эффективность его функционирования при пакетном режиме работы системы рассмотрены в [2]. Теоретически и экспериментально установлено, что применение метода цифровых предыскажений позволяет снизить уровень внеполосных излучений сигнала на 15–18 дБ,

увеличив при этом уровень выходного отношения сигнал–шум на 12–15 дБ.

Современная радиотехническая обстановка характеризуется быстро меняющейся радиосценой при наличии пассивного и активного противодействия. Это требует разработки многофункциональных радиоэлектронных комплексов, легко адаптируемых к конкретным условиям в окружающей помеховой ситуации, и значительного усовершенствования характеристик радиосистем, находящихся в составе комплекса. Одной из наиболее важных частей радиосистемы является антенный модуль, в значительной степени определяющий характеристики радиосистемы в целом (дальность действия, возможность функционирования в помеховых условиях).

Изначально для комплексов связи ПВО-ПРО применялись ненаправленные антенны с круговыми в горизонтальной плоскости диаграммами направленности (ДН), которые обеспечивали равномерное покрытие территории возможной связи. При использовании таких антенн лишь часть излучения оказывается полезной, попадая в сектор расположения абонента. Остальная часть излучения теряется, рассеиваясь в пространстве и создавая помехи для других абонентов. Это потребовало создания фазированных антенных решёток, которые позволили увеличить излучаемую мощность без увеличения энергопотребления системы и применить быстрое электронное сканирование луча.

Ещё большие преимущества можно получить, если применять цифровые антенные решётки (ЦАР). С их помощью можно формировать ДН не только с учётом направления прихода полезного сигнала, но и путем одновременного формирования нулей, ориентированных в направлении прихода помех. Так, например, в [3] показано, что за счёт применения алгоритмов пространственной фильтрации в радиомодемах на основе малоэлементных кольцевых антенных решёток возможно увеличение помехоустойчивости системы связи на 28 дБ при попадании помехи вне основного лепестка ДН.

Увеличить дальность радиосвязи возможно не только применяя антенны с узкой диаграммой направленности, но и за счёт использования ретрансляторов. В [4, 5] в рамках двулучевой модели затухания сигналов проведен сравнительный анализ помехоустойчивости и пропускной способности радиорелейных линий с AF и DF протоколами. Полученные результаты позволяют в каждой конкретной ситуации в зависимости от сложности реализации и требований к помехоустойчивости и пропускной способности выбрать приемлемый вариант протокола. В современных условиях кроме помехоустойчивости важным показателем является скорость передачи информации при фиксированной вероятности ошибки на бит. В связи с этим возникает необходимость в выборе сигнальных конструкций с высокой спектральной эффективностью. В [6] проведен анализ влияния дальности связи на скорость передачи для распространенных видов модуляции в условиях прямой видимости.

Системе связи комплекса ПВО-ПРО присущи внутрисистемные (взаимные) помехи. Анализ вероятности ошибки на бит при множественном доступе в сетях с ППРЧ, проведенный в [7], выявил, что основным негативным фактором является столкновение частот различных пользователей сети. С целью уменьшения этого негативного явления в [8] предложен алгоритм конструирования оптимального ППРЧ ансамбля на основе М-последовательностей (последовательности ансамбля не содержат совпадающих частот). Так как выделенные пользователям сети последовательности ППРЧ периодически обновляются во времени, то проведена также оценка возможного числа ансамблей, обеспечивающих практически неограниченный период работы сети без повторного использования последовательностей ППРЧ.

Особое место занимают преднамеренные помехи, создаваемые станцией радиоподавления. Помехозащищенность совместно с высокой скоростью передачи в условиях преднамеренных помех достигается за счет совместного применения сигналов с расширенным спектром, в том числе гибридных систем ППРЧ/ШПС, и помехоустойчивого кодирования [9–14].

Разработка современной аппаратуры для систем связи комплексов ПВО-ПРО осуществляется в виде унифицированных модулей с применением SDR-технологии. Применение данной технологии позволяет программными средствами осуществлять стыковку с существующим парком и проводить адаптацию системы к конкретным условиям функционирования.

### *Заключение*

К основным направлениям, повышающим помехозащищенность систем связи комплексов ПВО-ПРО, следует отнести:

1. Разработку цифровых алгоритмов и их программную и аппаратную реализацию,

направленную на уменьшение межсимвольной интерференции, вызванной многолучевым распространением сигналов. Данный комплекс мероприятий позволит повысить помехоустойчивость и дальность радиосвязи в условиях гористой, лесистой местности, а также при наличии застроек и холмистости местности.

2. Разработку цифровых адаптивных методов предыскажений для линеаризации передающего тракта систем связи комплексов, что позволит снизить уровень внеполосных излучений передаваемого сигнала и увеличить отношение сигнал–шум на выходе передатчика при его работе в режиме высокой энергоэффективности.

3. Разработку цифровых антенных решёток и алгоритмов пространственной фильтрации помех. Применение цифровых антенных решеток приведет к увеличению дальности связи, увеличению скрытности и уменьшению времени адаптации к изменяющейся помеховой обстановке.

4. Разработку модемов для радиорелейной связи. Применение данного вида связи повысит дальность связи и скорость передачи информации на большие расстояния.

5. Разработку алгоритмов конструирования оптимальных ППРЧ ансамблей. Применение оптимальных ППРЧ последовательностей снизит уровень взаимных помех и повысит структурную скрытность используемых сигналов.

6. Разработку новых и совершенствование существующих сигналов с расширенным спектром, в том числе гибридных ППРЧ/ШПС. Применение таких сигналов совместно с перемежением и помехоустойчивым кодированием позволит осуществлять помехозащищенную связь для широкого класса преднамеренных помех станции подавления.

***Литература***

1. *Аверина Л.И., Каменцев О.К., Лафицкий А.Ю., Чаркин Д.Ю.* Повышение помехоустойчивости системы связи на одной несущей в условиях многолучевого распространения // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Физика. Математика. Воронеж, 2018. № 1. С. 5–14.

2. *Аверина Л.И., Малев А.С., Чаркин Д.Ю.* Оценка эффективности применения метода цифровых предыскажений с алгоритмами уменьшения пик-фактора для сигналов с частотным мультиплексированием // Теория и техника радиосвязи. 2017. № 3. С. 59–65.

3. *Аверина Л.И., Корольков М.А.* Увеличение помехоустойчивости систем военной связи с помощью цифровых антенных решёток // Вестник воздушно-космической обороны. 2017. № 3 (15). С. 7–12.

4. *Чаркин Д.Ю.* Оценка помехоустойчивости сети радиосвязи комплекса управления // Теория и техника радиосвязи. 2016. № 1. С. 32–38.

5. *Чаркин Д.Ю.* Сравнительный анализ эффективности AF- и DF-протоколов сети радиосвязи комплекса управления // Теория и техника радиосвязи. 2016. № 1. С. 39–45.

6. *Чаркин Д.Ю., Алехин С.Ю., Григорьев Е.В., Лимарев А.Е., Прохоров В.Е.* Зависимость скорости передачи данных от дальности связи в условиях прямой видимости // Теория и техника радиосвязи. 2017. № 1. С. 23–32.

7. *Борисов В.И., Лимарев А.Е., Лепендин А.В., Чаркин Д.Ю.* Вероятность ошибки на бит при множественном доступе в сетях с ППРЧ // Теория и техника радиосвязи. 2015. № 4. С. 36–46.

8. *Чаркин Д.Ю., Алехин С.Ю., Григорьев Е.В., Лимарев А.Е., Прохоров В.Е.* Конструирование оптимального ППРЧ ансамбля на основе М-последовательностей // Теория и техника радиосвязи. 2017. № 1. С. 41–49.

9. *Чаркин Д.Ю., Алехин С.Ю., Григорьев Е.В., Лимарев А.Е., Прохоров В.Е.* Сравнительный анализ помехоустойчивости и скрытности различных методов расширения спектра сигналов. Часть 1. Помехоустойчивость // Теория и техника радиосвязи. 2017. № 4. С. 18–25.

10. *Чаркин Д.Ю., Алехин С.Ю., Григорьев Е.В., Лимарев А.Е., Прохоров В.Е.* Сравнительный анализ помехоустойчивости и скрытности различных методов расширения спектра сигналов. Часть 2. Скрытность // Теория и техника радиосвязи. 2017. № 4. С. 25–33.

11. *Чаркин Д.Ю., Алехин С.Ю., Григорьев Е.В., Лимарев А.Е., Прохоров В.Е.* Алгоритмы временной и частотной синхронизации сигналов с ППРЧ. Часть 1. Вхождение в синхронизм // Теория и техника радиосвязи. 2017. № 2. С. 23–32.

12. *Чаркин Д.Ю., Алехин С.Ю., Григорьев Е.В., Лимарев А.Е., Прохоров В.Е.* Алгоритмы временной и частотной синхронизации сигналов с ППРЧ. Часть 2. Удержание синхронизма // Теория и техника радиосвязи. 2017. № 2. С. 33–36.

13. *Чаркин Д.Ю., Алехин С.Ю., Григорьев Е.В., Лимарев А.Е., Прохоров В.Е.* Гибридные ППРЧ/ШПС системы связи. Часть 1. Основы теории // Теория и техника радиосвязи. 2017. № 3. С. 41–51.

14. *Чаркин Д.Ю., Алехин С.Ю., Григорьев Е.В., Лимарев А.Е., Прохоров В.Е.* Гибридные ППРЧ/ШПС системы связи. Часть 2. Вариант реализации // Теория и техника радиосвязи. 2017. № 3. С. 52–58.

Статья поступила в редакцию 1 марта 2018 года

УДК 621.391

# ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМАХ СПЕЦИАЛЬНОЙ СВЯЗИ

© Авторы, 2018

**В.И. Штефан**, д.э.н., к.т.н., генеральный директор, e-mail: box-vega.techno-r.ru
**А.А. Лукьяненко**, начальник НТО
АО «ВНИИ «Вега», г. Воронеж

*Рассмотрены направления развития процесса разработки средств и комплексов для систем специальной связи в АО «ВНИИ «Вега». Обозначены направления развития телекоммуникационных технологий в системах специальной связи. Рассмотрены инновационные технологии для применения в системах специальной связи.*

***Ключевые слова:*** *АО «ВНИИ «Вега», телекоммуникационные технологии, системы специальной связи, непрерывность связи, сетевые технологии, сети общего пользования, сигнально-кодовые конструкции, помехоустойчивость, разведзащищенность, энергоскрытность, робототехнические комплексы, адаптивные фазированные антенные решетки, инновационные технологии, БПЛА, видео.*

# TRENDS AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF TELECOMMUNICATION TECHNOLOGIES FOR SPECIAL COMMUNICATION SYSTEMS

© All rights reserved, 2018

**V.I. Shtefan**, D.Sc. in Economics, Ph.D in Engineering Science, CEO, e-mail: box-vega.techno-r.ru
**A.A. Lukyanenko**, Head of R&D Department
JSC «VSRI «VEGA», Voronezh

*This article covers trends in the process of development of equipment and complexes for special communication systems at Voronezh Scientific-Research Institute «VEGA» (JSC «VSRI «VEGA»). Moreover, the publication determines trends in development of telecommunication technologies for special communication systems and describes innovative technologies for special communication system applications.*

***Keywords:*** *JSC «VSRI «VEGA», telecommunication technologies, special communication systems, continuity of communication, public networks, signal-code sequences, noise immunity, electronic countermeasures, communication security, robotic complexes, adaptive phased arrays, innovative technologies, UAV, video.*

АО «ВНИИ «Вега» основано в 1956 году для выполнения работ по созданию сетей специального назначения в интересах высшего руководства страны и Министерства обороны.

Традиционной специализацией предприятия за все время существования всегда были радиосредства и комплексы для систем специальной связи, которые обеспечивали транспортный уровень между двумя абонентами системы. Общий объём находящихся в эксплуатации изделий разного типа составляет более 1000 комплектов. С каждой новой разработкой параметры радиооборудования улучшались и достигли, например, по чувствительности значений 0,2 мкВ в полосе 25 кГц при скорости движения объектов до 1000 км/ч, что близко к аппаратному пределу. Системы, в которых используется радиооборудование АО «ВНИИ «Вега», успешно выполняли и продолжают выполнять свои функции на протяжении десятков лет.

За последние 5 лет процесс разработки средств и комплексов для систем специальной связи в АО «ВНИИ «Вега» перешел на качественно новый уровень.

С развитием информационных технологий произошло проникновение системных функций в радиосредства, которые стали решать не только вопросы организации канала связи между двумя специальными устройствами, но и выполнять часть задач сетевой организации объектов специальной связи. Примером нового системного подхода к разработке радиооборудования является комплекс обеспечения непрерывности связи при переходе подвижных абонентов из зоны действия одного радиоцентра в зону действия другого радиоцентра (рис. 1). При решении этой проблемы специалистами АО «ВНИИ «Вега» были реализо-

ваны модифицированные сетевые алгоритмы функционирования системы связи высшего руководства страны, при этом новые функции наложены «поверх» алгоритмов действующей системы и являются прозрачными для них. В результате решения этой задачи был разработан и введен в эксплуатацию в 2012 году комплекс «Пихта», который принимает решения о необходимости перехода абонента в зону действия другого радиоцентра на основании информации о состоянии радиоканалов, получаемой от системы специальных приемных устройств, размещенных на каждом радиоцентре.

Рис. 1. Структурная схема реализации функции непрерывности связи

В результате выполнения этой работы архитектура системы радиосвязи высшего руководства страны стала представлять собой многозоновую структуру с функцией роуминга в реальном режиме времени без разрыва соединения.

Другим направлением расширения новых функций в сетях специальной связи стало использование сетей общего пользования 3*G*/*LTE* для задач резервирования основных каналов радиосвязи систем специальной связи. Эта технология позволяет существенно расширить географическое пространство предоставления каналов связи для соединений абонентов. Базовыми решениями этой задачи являются *IP*-технологии, основанные на алгоритмах стека протоколов *TCP*/*IP*. Результатом стала разработка в 2014 году телекоммуникационного комплекса мобильной связи «Сапфир-*IP*», который входит в состав новой модификации комплекса технических средств «Дружба» и позволяет предоставлять каналы связи через операторов сотовой связи при отсутствии основных каналов радиосвязи. Использование *IP*-технологий позволяет предоставлять услуги связи в любой точке мира без предварительного развертывания радиоцентров на местности. В настоящее время ведутся инициативные работы по предоставлению услуг передачи видеоизображений в сетях специальной связи, которые органично впишутся в алгоритмы функционирования действующей системы.

Успешное решение задач с использованием современных телекоммуникационных технологий дало возможность АО «ВНИИ «Вега» расширить свое участие в новых НИР и ОКР. В настоящее время АО «ВНИИ «Вега» разрабатывает для системы связи высшего руководства страны не отдельные радиосредства, а масштабную многозоновую радиосеть с полным спектром предоставляемых функциональных возможностей. Владение современными телекоммуникационными технологиями позволило предложить и самостоятельно разработать контроллер радиосети нового поколения со встроенным *IP*-коммутатором, который поддерживает соединения с подвижными абонентами одновременно по нескольким каналам различной физической природы с выбором наилучшего канала для связи (рис. 2).

Рис. 2. Концепция одновременной передачи информации по параллельным каналам связи

Такой подход позволяет повысить достоверность доставки информации за счет реализации пакетного режима и выбора пакета с наименьшим количеством ошибок из поступивших по всем каналам связи. Одновременно продолжается разработка новых сигнально-кодовых конструкций для повышения качества предоставляемых услуг без расширения полосы, занимаемой радиосигналом, и без уменьшения дальности связи относительно действующей системы. Новые сигнально-кодовые конструкции не имеют аналогов в мире, и авторские права на них подтверждены соответствующими патентами.

Другим важнейшим направлением развития сетей специального назначения является повышение помехоустойчивости, разведзащищенности и энергоскрытности каналов радиосвязи. Современные системы военного и специального назначения ставят новые задачи по передаче информации по радиоканалам. Скорости передачи информации возросли в тысячу раз (от кбит/сек до Мбит/сек), повысились требования по устойчивости к внешним несанкционированным воздействиям. АО «ВНИИ «Вега» за счет накопленного научно-технического потенциала смогло предложить и заинтересовать потенциальных заказчиков своими инновационными предложениями, основанными на оригинальных сигнально-кодовых конструкциях собственной разработки. Эти решения стали основой организации каналов связи и управления для робототехнических платформ тяжелого класса на универсальной платформе «Армата». Разработанный канал управления робототехническим комплексом функционирует при соотношении сигнал/шум от –12 до –18 дБ, что вместе с использованием технологии адаптивных фазированных антенных решеток (АФАР) позволяет доводить команды управления практически при любом мешающем радиопротиводействии. Технология АФАР является необходимой и неотъемлемой частью любых инновационных проектов в области радиосвязи для систем специального назначения. При построении телекоммуникационных сетей, в том числе для передачи видеоизображений, скорость передачи информации по радиоканалу сегодня требуется не менее 20 Мбит/с. АО «ВНИИ «Вега» представило и провело испытания радиолинии также для робототехнических комплексов на базе платформы «Армата», которые обеспечивали указанную скорость на дальностях до 5 км при движении объектов по пересеченной местности и функционирование систем технического зрения на базе искусственного интеллекта в режиме реального времени. Дальнейшее развитие высокоскоростных радиолиний будет состоять в повышении дальности связи до 20-30 км за счет использования ретрансляционных линий на базе малогабаритных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) (рис. 3).

Малогабаритные БПЛА широко используются в настоящее время технологически развитыми странами не только для ретрансляции ра-

диосигналов, но и для решения других задач, в том числе:

– ведение радиотехнической разведки источников излучения,

– ведение аэро-видеосъемки с разведывательной целью,

– постановка радиопомех радиоэлектронным средствам различного назначения.

Меры борьбы с БПЛА пока еще недостаточно отработаны, поэтому АО «ВНИИ «Вега» создало научно-технический задел в интересах создания локаторов малогабаритных БПЛА для решения задачи определения «свой–чужой».

Рис. 3. Структурная схема предоставления канала радиосвязи мобильному абоненту на базе БПЛА

Повышение дальности связи также должно опираться, с одной стороны, на использование технологии АФАР для обеспечения сопровождения радиолучом подвижных объектов, а с другой стороны – на поиск и реализацию новых сигнально-кодовых конструкций и схем модуляции таких, как, например, параллельные составные сигналы, использующие двухуровневое расширение базы радиосигнала.

Технология высокоскоростных энергоскрытных радиоканалов связи, по нашему мнению, станет в ближайшие годы самым востребованным направлением развития радиосвязи в системах специального назначения.

Инновационные решения, реализуемые для военных систем и систем специального назначения, должны использоваться для создания конкурентоспособных продуктов на мировом рынке и внутреннем рынке России. АО «ВНИИ «Вега» проводит политику одновременного продвижения инновационных технологий в системах специальной связи и в интересах народного хозяйства. На первый план тут выходит способность предлагаемых технических решений быть устойчивыми к многолучевому распространению и их высокая помехоустойчивость. Это позволяет использовать рассмотренные технологии в интересах ГК «Росатом», где сложные условия эксплуатации в определенных местах не позволяют специалистам проводить работы непосредственно своими руками. Для выполнения этих задач будут использоваться роботизированные комплексы, которым как раз и будут нужны высокоскоростные и помехоустойчивые каналы радиосвязи для выполнения своих функций. Чтобы гарантировать постоянное наличие канала управления и исключить потерю управления роботами, обязательно будут использоваться беспилотные летательные аппараты и платформы. Кроме того, одновременно с инновационными научно-техническими разработками для реализации народнохозяйственных проектов необходимо использовать инновационные технологии менеджмента и маркетинга, поскольку коммерческий успех будет основным критерием успешности выполняемых проектов.

Таким образом, телекоммуникационные технологии в системах специальной связи будут развиваться в следующих направлениях:

1. Предоставление новых видов услуг:

– передача видео в защищенном режиме;

– работа в сетях общего пользования в защищенном режиме.

2. Повышение надежности и качества каналов связи:

– реализация помехозащищенных каналов радиосвязи за счет разработки новых сигнально-кодовых конструкций и схем модуляции;

– одновременная передача информации по нескольким каналам связи разной физической природы (радиолинии УКВ диапазона, спутниковые линии, сети операторов сотовой связи, радиорелейные линии радиосвязи, проводные каналы связи сети Интернет);

– применение технологии активных адаптивных фазированных антенных решеток для повышения энергетики каналов радиосвязи;

– непрерывный контроль качества каналов связи и использование для передачи информации наилучшего в данный момент канала.

3. Расширение географической зоны предоставления услуг абонентам сетей специальной связи за счет использования ресурсов сетей общего пользования – спутниковых систем общего назначения, сетей операторов сотовой связи, сетей транкинговой радиосвязи, проводных каналов связи сети Интернет.

4. Повышение разведзащищенности и энергоскрытности каналов радиосвязи за счет:

– разработки новых сигнально-кодовых конструкций и схем модуляции с расширением базы сигналов и минимизацией ширины спектров, занимаемых радиосигналами;

– применение технологии активных адаптивных фазированных антенных решеток с узконаправленными диаграммами излучения и определением азимутального направления подвижного радиоабонента.

5. Улучшение оперативности предоставления каналов связи за счет:

– использования беспилотных малогабаритных летательных аппаратов и платформ для предоставления каналов связи подвижным радиоабонентам при проведении кратковременных мероприятий без предварительной подготовки;

– применения мобильных пунктов управления беспилотными летательными аппаратами;

– использования локаторов малогабаритных БПЛА для решения задачи определения «свой–чужой».

Статья поступила в редакцию 1 марта 2018 года

УДК 621.396.9

# ПОЛЕВЫЕ РАДИОЦЕНТРЫ И РАДИОСТАНЦИИ СТРАТЕГИЧЕСКОГО, ОПЕРАТИВНОГО И ТАКТИЧЕСКОГО ЗВЕНЬЕВ УПРАВЛЕНИЯ

© Авторы, 2018

**А.Г. Алферов**, к.т.н., начальник НТУ, e-mail: office@sozvezdie.su
**В.А. Долгих**, заместитель начальника НТУ, e-mail: vad@sozvezdie.su
**Э.Н. Родионов**, к.т.н., заместитель начальника НТУ
АО «Концерн «Созвездие»

*Предлагается информация о результатах разработки перспективного комплекса КВ-УКВ радиосвязи для высших звеньев управления «Антей». Приведены состав комплекса, основные технические характеристики, особенности применения.*

***Ключевые слова:*** *SDR, ИВ-ЧДС, «Тишина», «Амарант», радиоцентр.*

# FIELD RADIO COMMUNICATIONS CENTERS AND RADIO STATIONS FOR STRATEGIC, OPERATIONAL AND TACTICAL CONTROL AND COMMAND LEVELS

© All rights reserved, 2018

**A.G. Alferov**, Ph.D. in Engineering Science, Director of R&D Department, e-mail: office@sozvezdie.su
**V.A. Dolgikh**, Deputy Director of R&D Department, e-mail: vad@sozvezdie.su
**E.N. Rodionov**, Ph.D. in Engineering Science, Deputy Director of R&D Department
JSC «Concern «Sozvezdie»

*This article highlights the results of development of the «Antey» system, an advanced HF-VHF radio communication complex for supreme command levels. The article describes the complex components, its basic characteristics and application features.*

***Keywords:*** *SDR, ionosphere wave and frequency control service (IW&FCS), «Tishina», «Amarant», radio communications center.*

Акционерным обществом «Концерн «Созвездие» был завершен цикл работ по созданию комплекса «Антей» – комплекса унифицированных средств КВ-УКВ-радиосвязи для оснащения полевых и стационарных радиоцентров для высших звеньев управления ВС РФ. Опытно-конструкторская работа «Антей» выполнялась на основе технических решений, полученных ранее в ходе выполнения ОКР «Тишина». Кроме того, в инициативном порядке была проведена модернизация радиостанции тактического звена Р-166-0,5 («Артек-0,5») на аналогичных технических решениях.

Комплекс «Антей» разработан для замены своего предшественника – комплекса «Поиск» (Р-161), который был принят на снабжение ВС РФ в начале 80-х годов. Разработок такого класса и номенклатуры в отечественной промышленности не проводилось более 30 лет.

Комплекс изделий представляет собой автоматизированный радиоцентр и отдельные радиостанции, предназначенные для предоставления каналов передачи и приема данных, телефонной и телеграфной информации узлу связи и отдельным должностным лицам. Изделия комплекса обеспечивают организацию и ведение радиосвязи на расстояниях до нескольких тысяч километров. При этом обеспечивается высокий коэффициент исправного действия адаптивной помехозащищенной радиолинии на заданных дальностях в условиях воздействия средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ).

Радиоцентр «Антей» работает в составе полевого узла связи «Редут-2УС» и обеспечивает автоматическое дистанционное управление от АСУС узла связи. Изделия «Антей-5А», «Антей-1А», Р-166-0,5М могут работать автономно без узла связи совместно с командно-штабной машиной командира. Кроме того, радиостанции «Антей-1А» и Р-166-0,5М позволяют организовать радиосвязь в движении, как на марше, так и в ходе боя. Учитывая возможности изделий в целом, применение комплекса возможно как при проведении масштабных войсковых операций,

 ISSN 1995-7009

так и в локальных конфликтах.

Комплекс «Антей» состоит из полевой и стационарной компонент.

В состав полевой компоненты входят:

– «Антей-ПУ» – отдельная приемная машина с функцией управления и с постом ионосферно-волновой и частотно-диспетчерской службы (ИВ-ЧДС);

– «Антей-У» – радиопередающий узел;

– «Антей-5А» – автономная КВ радиостанция мощностью 5 кВт, состоящая из трех аппаратных «Антей-5А ПРМ», «Антей-5А ПРД», «Антей-5А АМК» и электропитающей машины ЭД2х30;

– «Антей-1А» – автономная КВ-УКВ радиостанция мощностью 1 кВт.

В состав стационарной компоненты входят:

– «Антей-С ПРМ» – стационарный приемный комплекс КВ-УКВ связи с автоматизированным управлением и реализацией службы ИВ-ЧДС;

– «Антей-С ПРД» – стационарный передающий комплекс с возможностью автономного функционирования в необслуживаемых объектах и возможностью наращивания канальной емкости.

Все изделия полевой компоненты реализованы на транспортной базе КамАЗ-5350, модернизированная радиостанция Р-166-0,5М – на бронебазе К1Ш1. Некоторые изделия комплекса представлены на рис. 1.

Рис. 1. Внешний вид изделий полевой компоненты комплекса «Антей»

Пример использования полевой компоненты изделий комплекса при построении радиоцентра показан на рис. 2.

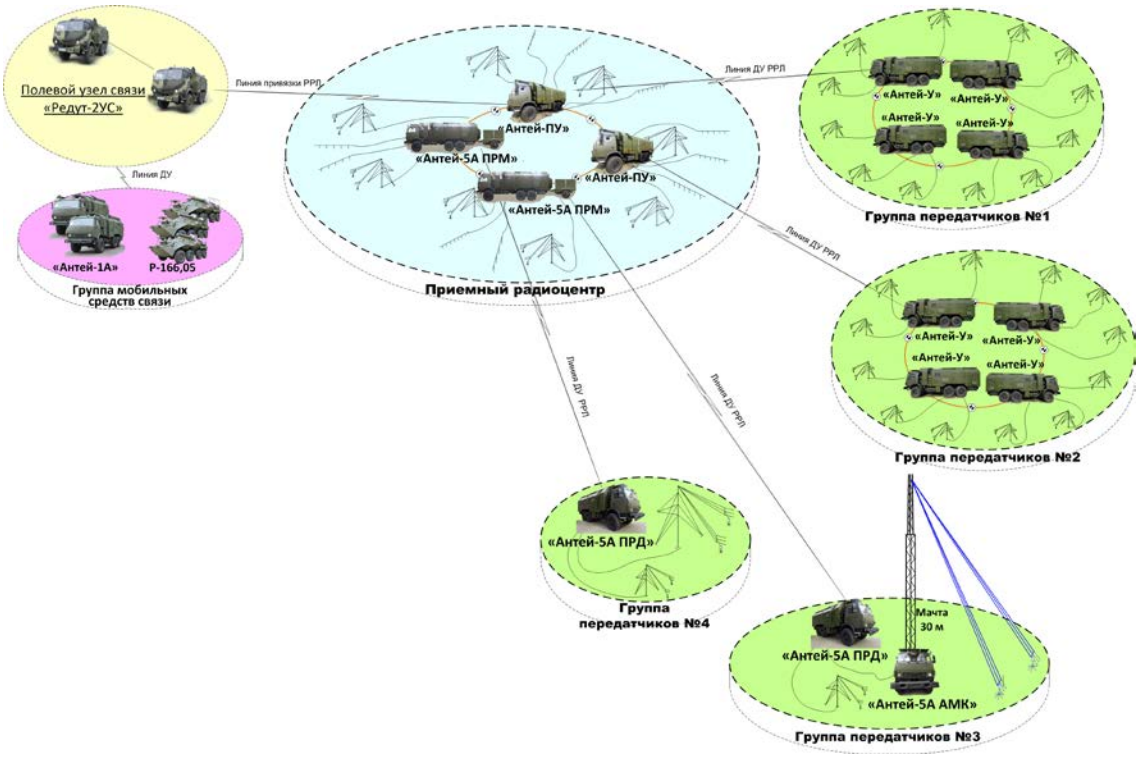



Рис. 2. Вариант построения полевого радиоцентра на основе изделий комплекса «Антей»

При создании мобильных и стационарных объектов был разработан и использован ряд изделий различного типа – от приемников и возбудителей магистрального класса до высоколинейных твердотельных усилителей КВ-УКВ диапазонов и панелей слухового приема рабочих мест операторов. Среди основных составных частей можно выделить следующие изделия и блоки:

– «Тишина-ПВР.Т01» – многоканальное устройство приема и обработки сигналов;

– «Тишина-ПВР.Т02» – многоканальный возбудитель;

– «Тишина-ПВР.Т21» – дуплексный фильтр приемного тракта;

– «Тишина-ПВР.Т22» – узкополосный фильтр возбудителя;

– УМ-1000-1 – усилитель мощности 1 кВт УКВ диапазона с АнСУ;

– УМ-1000-2 – усилитель мощности 1 кВт КВ диапазона с АнСУ;

– А32 – КВ-модем с компенсатором помех «Амарант»;

– А010 – мультиплексор стыков С1 адаптивных каналов;

– А028 – широкополосный панорамный приемник;

– А015 – приемный ВЧ коммутатор/разветвитель КВ диапазона;

– А016 – приемный ВЧ коммутатор/разветвитель УКВ диапазона;

– А019 – панель слухового приема оператора-радиста.

Внешний вид некоторых составных частей показан на рис. 3.

Рис. 3. Внешний вид отдельных составных частей комплекса «Антей»

В ходе проведения работ по созданию комплекса был предложен целый ряд инновационных решений. Главными особенностями изделий комплекса являются:

– построение радиотрактов на основе технологии программно-определяемого радио (SDR), что позволило впервые получить унифицированную программно-аппаратную платформу полевых аппаратных радиосвязи;

– применение модемов с адаптивной компенсацией помех совместно с системой быстрой частотной адаптации при работе на исходных данных от автономной службы ИВ-ЧДС, что обеспечило надежность КВ связи с заданным качеством при активном противодействии РЭБ противника;

– автоматизация процессов планирования, организации и ведения связи в соответствии с требованиями руководящих документов по связи на основе программно-определяемых автоматизированных рабочих мест.

В основу построения комплекса положен принцип единого информационного пространства, децентрализованного управления и виртуализации радиосредств и процессов. Это повышает надежность функционирования радиоцентра, обеспечивает свободный обмен служебной и технологической информацией и максимальное удобство работы должностных лиц.

Среди широкого ряда показателей эксплуатационных и технических характеристик можно выделить следующие:

– быстрая частотная адаптация в режимах «Артек-АВС» и «Вишня» (основные общевойсковые режимы автоматизации радиосвязи);

– адаптивная компенсация помех и когерентный прием ветвей разнесения (от 2 до 4 АФУ);

– вертикальное и трассовое зондирование с прогнозом и рассылкой сведений по боевым постам и номерам дежурного расчета;

– обмен служебной файловой информацией с однотипными изделиями;

– управление от узла связи по командному протоколу;

– автоматическое составление и контроль информационных трактов.

Кроме того, автоматизировано ведение журналов и документов оперативно-технической службы с привязкой ко времени и расположению объекта, прием слуховых радиограмм и их регистрация, что сильно облегчает повседневную деятельность персонала.

По сравнению с существующим парком однотипных радиосредств комплекс «Антей» имеет существенные преимущества. Сравнительная оценка эксплуатационных характеристик радиосредств различных поколений приведена в таблице.

Таблица

Сравнение поколений радиосредств

| Характеристики | Поколения радиосредств | | |
|---|---|---|---|
| | 3 (1980-е) | 4 (1990-е) | 5 (2010–...) |
| | Радиосредства | | |
| | Р-161 «Поиск» | Р-166 «Артек» | Р-176 «Антей» |
| Участие персонала в обеспечении функционирования | Высокое | Среднее, поддерживающее | Минимальное, контролирующее |
| Типовой интерфейс управления аппаратурой | Провод–команда | Последовательный, низкоскоростной, ИПРС, RS-232 | Сетевой, высокоскоростной Ethernet |
| Программно-определяемые функциональные возможности аппаратуры | Нет | Нет | Да |
| Автоматизация контрольных функций | Нет | Частично | Да |
| Функции ИВ-ЧДС | Отдельная аппаратная | Нет | Встроенная в составе аппаратных |
| Адаптивная компенсация помех | Нет | Нет | Да |
| Вероятность ошибки в предоставленном канале (с учетом АКЗП) | $5 \cdot 10^{-2}$ | $5 \cdot 10^{-2}$ | $5 \cdot 10^{-3}$ |
| Автоматический прием и обработка схемы-приказа | Нет | Нет | Да |
| Программное обновление (добавление новых функций) | Нет | Нет | Да |
| Режимы адаптации | «Вишня» | «Артек-АВС» «Вишня» | «Тишина-АУС» «Артек-АВС» «Вишня» |
| Количество частот адаптации | 10 основных | 100 | Без ограничения |
| Передача служебной файловой информации | Нет | Нет | Да |

В 2017 году была проведена первая серийная поставка изделий «Антей-ПУ», «Антей-У», «Антей-5А», Р-166-0,5М для оснащения опытного района, в котором проводится опытная эксплуатация изделий комплекса в составе перспективных полевых автоматизированных радиоцентров для определения основных направлений дальнейшего развития и модернизации комплекса. По совокупности эксплуатационно-технических характеристик комплекс «Антей» соответствует мировому уровню.

Статья поступила в редакцию 23 марта 2018 года

УДК 537.86:519.2

# СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КОМПЛЕКСОВ И СРЕДСТВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ БОРЬБЫ

© Автор, 2018

**М.Л. Артемов**, д.т.н., доцент, директор НТЦ, АО «Концерн «Созвездие»,
e-mail: artemov@sozvezdie.su

*Проведен обзор этапов становления исследований и разработок в области радиоэлектронной борьбы в АО «Концерн «Созвездие». Проанализированы основные направления совершенствования техники радиоэлектронной борьбы, методы решения задач радиоразведки.*

***Ключевые слова:*** *обнаружение-пеленгование, радиоразведка, радиоподавление, радиоэлектронная борьба.*

# THE STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF ELECTRONIC WARFARE COMPLEXES AND EQUIPMENT

© All rights reserved, 2018

**M.L. Artemov**, D.Sc. in Engineering Science, Associate Professor, Director of R&D Center,
JSC «Concern «Sozvezdie», e-mail: artemov@sozvezdie.su

*This article reviews the milestones of research and development in the field of electronic warfare throughout history of JSC «Concern «Sozvezdie».The article contains an analysis of developments trends to improve electronic warfare technologies and describes methods of problem solving in the field of radio reconnaissance.*

***Keywords:*** *detection and direction finding, radio-electronic survey, electronic countermeasures, radio-electronic warfare.*

## *Основные этапы становления исследований и разработок в области радиоэлектронной борьбы в АО «Концерн «Созвездие»*

Систематические работы по созданию техники РЭБ Воронежский научно-исследовательский институт связи (ВНИИС) начал проводить с 1976 года. Первые работы были направлены на создание малогабаритных передатчиков заградительных помех средствам радиосвязи и радиолиниям управления минно-взрывными устройствами.

В 80-е годы в связи с боевыми действиями на территории Афганистана резко возросла потребность в такой технике. В предельно сжатые сроки ВНИИС были разработаны и поставлены в войска малогабаритные передатчики заградительных помех (изделия «Зонд-В» и «Зонд-С»). Для инженерных войск создаётся многодиапазонный мобильный комплект передатчиков помех РП 377Б. За короткий срок разрабатываются комплекты малогабаритных дистанционно управляемых передатчиков помех КВ и УКВ диапазонов РП-377А, РП-377У, РП-377К.

Созданными малогабаритными передатчиками широкополосных помех «Зонд-П» оснащается первая эскадрилья дистанционно пилотируемых летательных аппаратов «Пчела-П». В кратчайший срок организуется разработка и серийный выпуск малогабаритных постановщиков помех «Зонд-Ф» и «Зонд-Д» с устройством контролируемого подрыва радиоуправляемых фугасов на безопасном расстоянии. Сотни изделий поставляются в группировку наших войск в Афганистане, где они обеспечивают защиту личного состава и техники от подрыва на радиоуправляемых минно-взрывных устройствах.

В 90-е годы на Воронежский НИИ связи возлагается головная роль по созданию техники радиоэлектронного подавления (РЭП) радиосвязи и автоматизированных систем управления частей РЭБ, которая ранее выполнялась Донецким НИИ комплексной автоматизации. В этот период в России наметился некоторый спад в темпах развития техники. Однако благодаря четкой политике заказчика и адекватной позиции руководства ВНИИС, а также востребованности техники РЭБ в конфликтах того периода времени удалось не только развернуть работы по созданию и модернизации техники РЭП, но и создать новую устойчивую кооперацию предприятий.

Широкое внедрение в войска зарубежных стран аппаратуры радиосвязи с использованием расширения спектра сигналов и ППРЧ потребо-

 ISSN 1995-7009

вало проведения работ по увеличению быстродействия аппаратуры обработки информации о радиоэлектронной обстановке и формированию помеховых сигналов, внедрению более эффективных алгоритмов функционирования систем и средств РЭБ. Специализация подразделений ВНИИС по направлениям разработок техники РЭБ позволила достигнуть высоких результатов в различных областях за счет целенаправленной концентрации усилий на разработке аппаратуры помех, радиоразведки и управления. В институте впервые в России было реализовано создание помех системам связи с ППРЧ методом погони по частоте «вслед» и синхронное пеленгование источников радиоизлучения разнесенными станциями помех (комплекс РЭБ «Алтаец»).

Применение высокопроизводительной вычислительной техники, специализированных процессоров цифровой обработки сигналов, эффективных алгоритмов и программного обеспечения дали возможность обеспечить высокую автоматизацию действий лиц боевого расчета, процессов обработки данных радиоразведки и целераспределения средств помех.

В автоматизированных командных пунктах (ОКР «Реактор-1») были отработаны современные технические решения по созданию командного пункта части РЭБ. Впервые для повышения достоверности вскрытия радиоэлектронной обстановки и эффективности применения средств помех использована цифровая картографическая информация. Эта работа явилась основой для дальнейших разработок в области автоматизации систем и средств РЭБ. ВНИИС создан ряд пунктов управления ротного и батальонного звеньев (Р-330КМБ, РП-330КП), а также подсистема управления РЭБ ЕСУ ТЗ (пункт управления начальника службы РЭБ, РП-330-КПВ-К), в результате чего обеспечена сквозная автоматизация процесса управления от начальника РЭБ соединения до оператора средства РЭБ.

В ходе работ по созданию и модернизации техники РЭБ радиосвязи специалистами ВНИИС найдены принципиально новые технические решения построения средств радиоразведки и автоматизированных систем управления, что обусловлено необходимостью адекватной реакции на бурное развитие систем и средств радиосвязи противника. За работы по совершенствованию подсистемы радиоразведки комплексов РЭБ Артемову М.Л., Дмитриеву И.С. и Линнику В.А. в 2004 г. присуждена премия Правительства Российской Федерации в области науки и техники. В 2006 г. за работы по созданию и модернизации семейства малогабаритных постановщиков помех радиолиниям управления минно-взрывными устройствами лауреатами премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники стали Николаев В.И., Руднев Е.А., Чаплыгин А.А. и Шульженко С.Н.

В 2009 году в соответствии с решением Минпромторга, одобренным Военно-промышленной комиссией (ВПК) при Правительстве Российской Федерации, АО «Концерн «Созвездие» определено ведущей организацией от оборонно-промышленного комплекса (ОПК) по научно-техническому сопровождению работ в области развития техники РЭБ с системами управления. Главным конструктором по направлению назначен доктор технических наук, доцент Артемов Михаил Леонидович.

Для проведения многосторонней целенаправленной работы по созданию и дальнейшему развитию техники радиоэлектронной борьбы в Концерне создан и функционирует научно-технический центр «РЭБ и спецсвязь» под руководством Артемова М.Л. (далее Центр). Координация научно-технической и производственной деятельности предприятий по созданию техники РЭБ осуществляется Советом главных конструкторов техники РЭБ с инфокоммуникационными системами под руководством Артемова М.Л.

Одной из основных задач Центра стала разработка и производство широкой номенклатуры техники радиоэлектронной борьбы:

– многофункциональные комплексы (средства) РЭБ наземного и воздушного базирования;

– комплексы (средства) РЭБ с системами связи;

– комплексы (средства) РЭБ с системами радионавигации;

– малогабаритная техника РЭБ для различных носителей;

– автоматизированные системы управления соединений и частей РЭБ;

– подсистемы РЭБ в автоматизированных системах управления общевойсковых соединений;

– системы и средства связи и передачи данных для комплексов РЭБ;

– средства технического обеспечения частей РЭБ;

– унифицированные тренажеры специалистов РЭБ.

В 2010 году разработан комплекс РБ-301А, составляющий основу вооружения частей РЭБ тактических соединений. В разработанных изделиях на два порядка улучшено быстродействие, на порядок расширен рабочий диапазон частот, существенно улучшены массогабаритные характеристики, обеспечена работа всех средств в едином алгоритме, освоена технология создания высокопотенциальных активных фазированных антенных решеток. Наиболее весомый вклад в эти работы внесли Артемов М.Л., Афанасьев О.В, Дмитриев И.С., Куликов Ю.Н., Медведев А.И., Осьмак В.Н., Рыбалкина Ю.Н., Хохлов С.А.

Все это создало условия для перехода к созданию многофункциональных комплексов РЭБ воздушного базирования (РБ-551В). Широкое развитие получила малогабаритная техника РЭБ, размещаемая на различных классах носителей: на основном вооружении, в артиллерийских снарядах, на беспилотных летательных аппаратах.

Практическим результатом продолжения работ по созданию техники постановки помех радиолиниям управления минно-взрывными устройствами стала разработка многофункционального комплекса РЭБ наземного базирования РБ-531Б.

Поставляемая в войска техника постановки помех радиолиниям управления минно-взрывными устройствами (РП-377УВМ1), устанавливаемая на авто-, бронеобъектах, а также переносная аппаратура (РП-377УВМ2, РП-377УВМ3), широко используемая в проводимых контртеррористических операциях, показала достаточно высокую эффективность по обеспечению сохранения личного состава и техники при их передвижениях.

Для ускорения процесса освоения новой техники личным составом частей РЭБ концерном разработан универсальный компьютерный тренажер РБ-801С. Тренажер позволяет приобретать навыки работы как на отдельных типах средств лицами боевых расчетов, так и обеспечивает одновременное системное обучение от командира части (подразделения) до операторов станций помех. С учетом завершенной ОКР по созданию аппаратной технического обеспечения РБ-805 и последующего серийного производства Центр проводит полный цикл работ, включающих разработку основного вооружения для частей РЭБ, а также средств обучения и средств обеспечения эксплуатации и ремонта.

В 2016 году Концерн завершил разработку высокомобильного многофункционального комплекса радиоэлектронной борьбы нового поколения РБ-302А, обеспечивающего радиоразведку и эффективное радиоподавление перспективных многофункциональных систем радиосвязи, в том числе радиосредств, построенных на основе SDR-технологий. Комплекс размещается на шасси автомобилей «КАМАЗ» и предназначен для оснащения соединений и частей РЭБ ВС РФ.

Достижение высоких качественных характеристик аппаратуры комплекса обеспечено за счет внедрения высокоэффективных наукоемких алгоритмических решений и новейших достижений радиоэлектроники. Высокая эффективность решения задач РЭБ обеспечена реализацией подсистемы поддержки принятия решения, оптимизирующей частотно-энергетический ресурс средств комплекса. За создание и серийное освоение комплекса РЭП радиосвязи, составляющего техническую основу вооружения частей подразделений РЭБ тактических соединений, Артемову М.Л., Афанасьеву О.В., Куликову Ю.Н. и Рыбалкиной Ю.Н. присуждена премия Правительства Российской Федерации в области науки и техники за 2014 год.

Молодые специалисты научной школы Центра регулярно участвуют в различных научно-технических конкурсах и конференциях. Среди них – лауреаты премии АО «Концерн «Созвездие» имени К.Я. Петрова (Абрамова Е.Л., Артемов Д.А., Афанасьев О.В., Воропаев Д.И., Гусев Б.Л., Журавлев Д.Н., Куликов Д.Ю., Мелостная Е.Е., Митин А.В., Митюков С.А., Морев А.И., Панфилов Ю.Ю., Петухов Д.Ю., Синицын В.А.); победители регионального и всероссийского этапов конкурса «Инженер года» в номинации «Профессиональные инженеры» (Воропаев Д.И., Журавлев Д.Н., Сличенко М.П.); конкурса Центрального федерального округа «Новые лица» в номинации «Промышленность» (Сличенко М.П.); лауреаты стипендии Президента РФ «За выдающиеся достижения в создании прорывных технологий и разработку современных образцов вооружений и специальной техники в интересах обеспечения обороноспособности страны». Многие прошли обучение в аспирантуре на базе предприятия, имеют ученую степень кандидата наук. За последние пять лет специалистами Центра опубликовано более 50 научных работ и статей в ведущих рецензируемых научных журналах, многие разработки защищены Патентами РФ.

***Направления совершенствования техники РЭБ***

В настоящее время АО «Концерн «Созвездие» разработана широкая номенклатура техники РЭБ различного назначения, являющейся конкурентоспособной на мировом рынке, осуществлена интеграция ее в автоматизированные системы управления войсками.

Центром «РЭБ и спецсвязь» АО «Концерн «Созвездие» освоены и развиваются технологии создания всех основных элементов систем и средств РЭБ. В ходе НИОКР разработаны и производятся:

– аппаратура радиоразведки декаметрового, метрового, дециметрового и сантиметрового диапазонов с высокой скоростью обзора частотного диапазона в режиме обнаружения с одновременным пеленгованием и среднеквадратической ошибкой пеленгования не более 1 градуса;

– аппаратура помех декаметрового, метрового и дециметрового диапазонов различной мощности;

– высокопотенциальные активные фазированные антенные решетки;

– аппаратура управления средствами и комплексами радиоэлектронной борьбы, обеспечивающая автоматизацию основных процессов обработки развединформации, анализа радиоэлектронной обстановки, формирование целеуказаний средствам радиоподавления.

Разработанная аппаратура позволяет решать широкий спектр задач по созданию новой техники РЭБ, соответствующей мировому уровню.

Центр проводит полный цикл работ – от научных исследований, разработки и изготовления опытных образцов до серийных поставок и последующего эксплуатационного сопровождения высокотехнологичной техники РЭБ.

Важнейшим интенсивно развивающимся в Центре направлением исследований является повышение эффективности созданной техники РЭБ на основе результатов научно-практической работы по совершенствованию основных элементов техники РЭБ, дальнейшему развитию и поиску новых подходов к ведению радиоразведки (РР) в интересах РЭБ и осуществлению радиоэлектронного поражения.

***Решение задач радиоразведки в рамках теории статистической радиотехники***

Наряду с другими видами разведки, подсистемы РР комплексов РЭБ обеспечивают войска информацией о группировках, численности и намерениях противника, расположении его боевых порядков за счет мониторинга электромагнитного излучения многочисленных военных устройств и систем противника. Полученная с помощью подсистем РР информация используется для принятия решений о необходимости и целесообразности радиоподавления обнаруженных радиоэлектронных средств и выборе наиболее эффективных способов создания помех.

Повышение эффективности функционирования подсистем РР на современном этапе развития РЭБ является приоритетной задачей Центра. В интересах ее решения специалистами Центра обоснованы, сформулированы и решены основные задачи первичной, вторичной и третичной обработки сигналов в подсистемах РР систем РЭБ, развиты существующие и разработаны новые методы и способы решения задач РР.

Широкое распространение на практике исторически получили «упрощенные» методы решения задач РР, реализация которых соответствовала возможностям аппаратуры того времени. Ввиду широкого распространения методов теории статистической радиотехники (СРТ) [1–3] в связи и локации развитие этих областей исследования инициировало постепенное «проникновение» статистических методов и в область РР. Однако из-за недостаточной глубины внедрения методов теории СРТ в решении задач РР эти методы до сих пор не смогли полностью «вытеснить» различные аспекты детерминистических идей и эвристических принципов.

Можно отметить следующие основные недостатки современных методов РР (проявляющиеся в разной степени в зависимости от того или иного реализованного метода или способа): сочетание элементов эвристического и детерминистического подходов при постановке и решении задач РР; разнообразие отличающихся по показателям эффективности способов решения одной и той же задачи РР и отсутствие математически обоснованного методического аппарата выбора наиболее предпочтительного их них; разнообразие подходов к определению технических характеристик радиоэлектронной аппаратуры (в том числе обнаружитель-пеленгатор – ОП), обеспечивающих выполнение заданных технических требований, и т.п. Обозначенные обстоятельства в большинстве случаев ограничивают возможности подсистем РР по решению задач основного назначения, приводят к сниже-

нию эффективности функционирования техники РЭБ в условиях реальной насыщенной высокодинамичной электромагнитной обстановки.

Исследования Центра показали, что использование современной элементной базы, цифровой обработки сигналов на основе высокопроизводительных элементов позволяет в настоящее время реализовать на практике широкий спектр возможностей по решению задач РР с высокими показателями достоверности, точности и быстродействия, отвечающими современным потребностям. Поэтому приоритетным направлением исследований Центра является разработка и адаптация статистически оптимальных методов обработки информации для их реализации в высокопроизводительной многофункциональной аппаратуре РР, функционирующей в условиях реальной высокодинамичной насыщенной электромагнитной обстановки.

Особое внимание уделяется созданию адекватных моделей реальной электромагнитной обстановки, приемно-пеленгаторных АС, обеспечению возможности цифровой обработки принимаемой информации в масштабе времени, максимально близком к реальному, с реализацией конвейерной обработки данных. В целях обеспечения работоспособности разрабатываемых методов в условиях реальной электромагнитной обстановки разработана методология адаптации подсистем РР к неизвестным параметрам обстановки, соответствующие алгоритмы автоматической адаптации внедрены в специальное программное обеспечение (СПО) разрабатываемой техники РЭБ.

Важнейшими задачами РР являются обнаружение и пеленгование [4–6] радиоволн источников радиоизлучений (ИРИ), выполняемые по результатам приема и обработки сигналов с помощью пространственно разнесенной приемной антенной системы (АС) многоканальных ОП. Решение данных задач РР в рамках СРТ характеризуется рядом особенностей, обусловленных спецификой ведения РР в реальных условиях.

Известно, что в основе принципа обнаружения сигналов лежит свойство различия в «природе» сигнальных и помеховых (стохастических) составляющих. Несмотря на отсутствие априорной информации о форме (законах амплитудной и фазовой модуляции) сигнала удаленных ИРИ, возможность пространственно разнесенного приема сигналов позволяет учесть дополнительное различие сигналов и помех. Данное различие состоит в том, что сигнальная составляющая характеризует распределение амплитуды и фазы поля радиоволны ИРИ по раскрыву АС ОП. Помеховая составляющая не имеет данного представления, а ее компоненты в пространственно разнесенных пунктах приема имеют случайные амплитуды и фазы, не обусловленные падением некоторой радиоволны с плоским волновым фронтом. Ввиду этого специфическая особенность обнаружения сигналов ИРИ подсистемами РР заключается в обнаружении не произвольной сигнальной составляющей в наблюдаемых данных (НД), а составляющей, обусловленной плоским волновым фронтом радиоволны ИРИ, удаленного от АС ОП. Учет данного обстоятельства позволил разработать ряд высокоэффективных методов пространственно-многоканального обнаружения сигналов [7–9], работоспособных в условиях присущей РР априорной неопределенности относительно законов модуляции сигналов и интенсивности аддитивных помех.

Важным этапом разработки многоканальных АС ОП является электродинамическое моделирование АС, результаты которого позволяют выбирать наиболее предпочтительные варианты размещения АС на различных типах носителей и используются при анализе статистической устойчивости используемых математических моделей.

Большинство разрабатываемых Центром ОП являются моноимпульсными. Это позволяет учесть соотношения амплитуд и фаз между всеми приемными элементами АС и в полной мере использовать возможности пространственно разнесенного многоканального приема. В качестве примера на рис. 1 представлена типовая структурная схема моноимпульсной обработки сигналов в ОП.

Радиоприемное устройство обеспечивает возможность как независимой работы от одного до восьми каналов приёма, так и синхронной работы всех каналов от общего гетеродина в режиме обнаружения-пеленгования. Ячейка первичной обработки (ПО) предназначена для сбора, накопления и обработки информации, управления радиоприемным устройством, выдачи целеуказания на цифровой формирователь помех или передачи данных для дальнейшей обработки на центральной процессор (ЦП). Ячейка ЦП предназначена для межканальной обработки информации, вторичной и третичной обработки, выдачи целеуказания на формирование помех и загрузки программ в ячейки ПО. ЦП состоит из

нескольких процессоров, объединенных в кластер с общей шиной с распределенным доступом, которая позволяет осуществлять оперативный обмен информацией. Высокоскоростная передача данных между ПО и ЦП обеспечивается с помощью линк-портов (LVDS), по шине VME осуществляется обмен данными с ОЭВМ. Обработка сигналов в соответствии с представленной структурной схемой позволяет на практике решать задачи радиоразведки с требуемыми показателями эффективности.

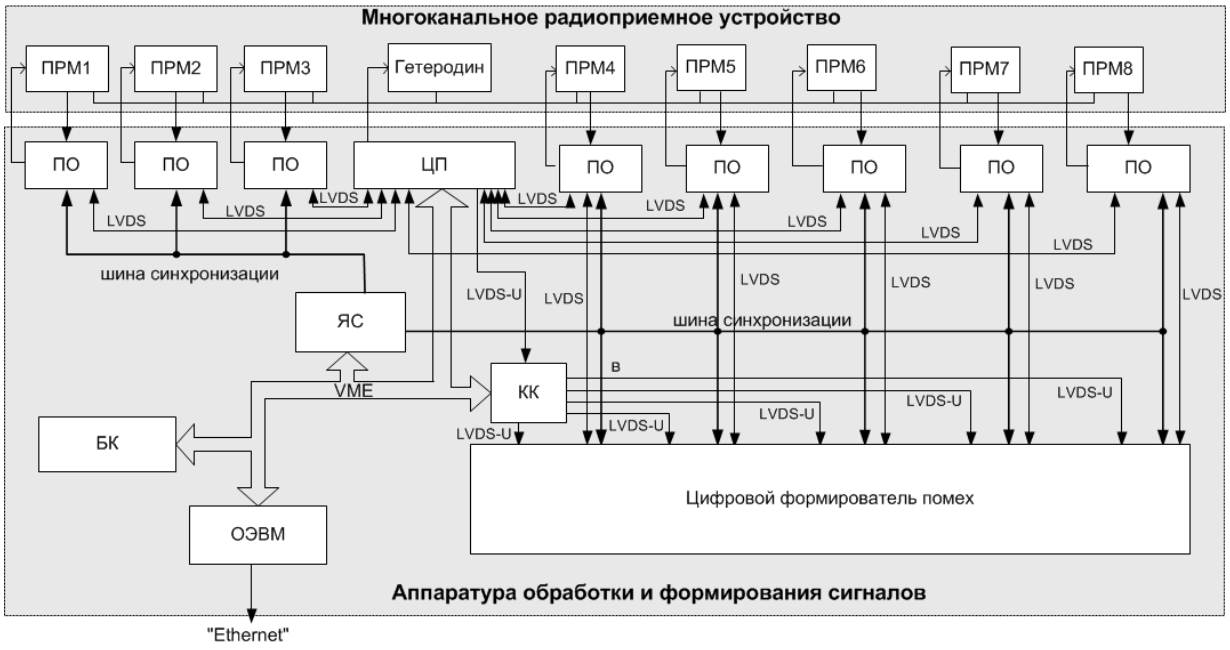



Рис. 1. Типовая структурная схема моноимпульсной обработки сигналов в ОП

В рамках теории СРТ задача обнаружения-пеленгования радиоволн ИРИ с помощью ОП формулируется как задача проверки статистических гипотез относительно закона распределения совокупности НД – измеренных комплексных амплитуд напряжений на выходах АС. Для критериев Байеса и Неймана-Пирсона оптимальная процедура решения данной задачи состоит в обработке НД с целью вычисления отношения правдоподобия и сравнения данной скалярной величины с пороговым уровнем. Разработанный метод пеленгования [6, 10] предполагает формирование из совокупности НД матрицы взаимных энергий комплексных амплитуд напряжений на выходах АС ОП, накопленной по серии измерений, и последующее вычисление решающей функции – пеленгационного рельефа (ПР):

$$M\left(\theta,\beta\right)=\frac{\dot{\mathbf{H}}\left(\theta,\beta\right)^{\mathrm{H}}\dot{\mathbf{K}}^{-1}\dot{\mathbf{W}}\dot{\mathbf{K}}^{-1}\dot{\mathbf{H}}\left(\theta,\beta\right)}{\dot{\mathbf{H}}\left(\theta,\beta\right)^{\mathrm{H}}\dot{\mathbf{K}}^{-1}\dot{\mathbf{H}}\left(\theta,\beta\right)},\qquad(1)$$

где $\dot{\mathbf{H}}\left(\theta,\beta\right)$ – векторная комплексная диаграмма направленности (ВКДН) АС ОП; $\dot{\mathbf{K}}$ – матрица ковариации аддитивного шума; $\dot{\mathbf{W}}$ – накопленная по серии измерений матрица взаимных энергий напряжений на выходах АС ОП.

Оценка пеленга находится в результате глобальной максимизации ПР (см. рис. 2):

$$\left(\hat{\theta},\hat{\beta}\right)=\arg\sup_{\theta,\beta}M\left(\theta,\beta\right).\qquad(2)$$

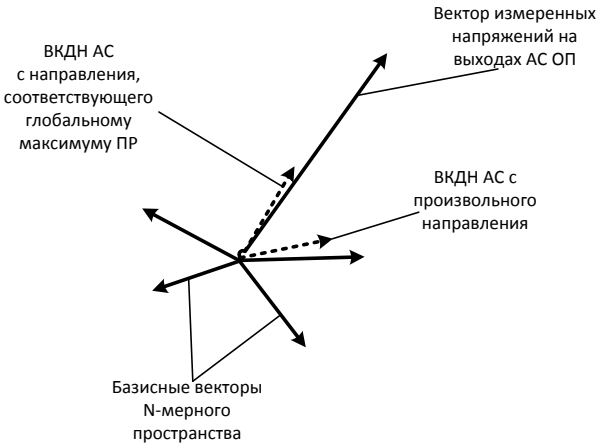



Рис. 2. Ориентация вектора измеренных напряжений и ВКДН АС ОП в многомерном унитарном пространстве

Решение о реализации справедливой гипотезы принимается на основании сравнения глобального максимума ПР с пороговым уровнем обнаружения, обеспечивающим фиксированную вероятность ошибки первого рода.

Данный метод пеленгования справедлив для моноимпульсных ОП с произвольным количеством приемных каналов ОП, с плоскими и объемными многолитерными АС произвольной конфигурации и характеристиками направленности антенных элементов в случаях совместного и раздельного пеленгования по азимуту и (или) углу места.

На случай априорной неопределенности относительно интенсивности аддитивного шума Центром разработан метод [11] адаптивного обнаружения-пеленгования. Статистические характеристики решающей статистики данного метода и порог принятия решения о справедливой гипотезе инвариантны к неизвестной интенсивности шума. Метод справедлив в случае аддитивного шума с произвольной матрицей ковариации, характеризующего как внутренние шумы радиоприемных каналов ОП, так и внешние шумы эфира.

Аналитическое выражение для нижней границы неравенства Крамера-Рао в общем случае произвольной матрицы ковариации шума, количества и характеристик направленности АЭ имеет вид [12]

$$\mathbf{\Phi}^{-1}=\begin{pmatrix}\sigma_\theta^2 & -\dot{r}_{\theta\beta}\sigma_\theta\sigma_\beta\\ -\dot{r}_{\theta\beta}^{*}\sigma_\theta\sigma_\beta & \sigma_\beta^2\end{pmatrix}, \qquad (3)$$

где

$$\sigma_\theta^2=\frac{1}{\sum\limits_{r=1}^{R}\left|\dot{E}^{(r)}\right|^2}\frac{1}{2\left(1-\left|\dot{r}_{\theta\beta}\right|^2\right)}\times$$

$$\times\frac{1}{\frac{\partial\dot{\mathbf{H}}(\theta,\beta)^{\mathrm{H}}}{\partial\theta}\mathbf{K}^{-1}\frac{\partial\dot{\mathbf{H}}(\theta,\beta)}{\partial\theta}}, \qquad (4)$$

$$\sigma_\beta^2=\frac{1}{\sum\limits_{r=1}^{R}\left|\dot{E}^{(r)}\right|^2}\frac{1}{2\left(1-\left|\dot{r}_{\theta\beta}\right|^2\right)}\times$$

$$\times\frac{1}{\frac{\partial\dot{\mathbf{H}}(\theta,\beta)^{\mathrm{H}}}{\partial\beta}\mathbf{K}^{-1}\frac{\partial\dot{\mathbf{H}}(\theta,\beta)}{\partial\beta}} \qquad (5)$$

– дисперсии совместных оценок азимута и угла места направления на ИРИ;

$$\dot{r}_{\theta\beta}=\frac{\frac{\partial\dot{\mathbf{H}}(\theta,\beta)^{\mathrm{H}}}{\partial\theta}\mathbf{K}^{-1}\frac{\partial\dot{\mathbf{H}}(\theta,\beta)}{\partial\beta}}{\sqrt{\frac{\partial\dot{\mathbf{H}}(\theta,\beta)^{\mathrm{H}}}{\partial\theta}\mathbf{K}^{-1}\frac{\partial\dot{\mathbf{H}}(\theta,\beta)}{\partial\theta}}\sqrt{\frac{\partial\dot{\mathbf{H}}(\theta,\beta)^{\mathrm{H}}}{\partial\beta}\mathbf{K}^{-1}\frac{\partial\dot{\mathbf{H}}(\theta,\beta)}{\partial\beta}}}} \qquad (6)$$

– комплексный коэффициент корреляции оценок азимута и угла места.

В качестве примера на рис. 3 представлена зависимость отношения сигнал/шум (ОСШ) от отношения радиуса антенной решетки к длине волны ($R/\lambda$), обеспечивающего заданные среднюю квадратическую ошибку (СКО) $\sigma_\theta$ и вероятность $P$ аномальной ошибки пеленгования (ВАОП), для ОП с семиэлементной эквидистантной кольцевой антенной решеткой (ЭКАР). Отдельной кривой представлена зависимость максимального уровня бокового лепестка $\eta$. Зависимости такого рода позволяют определять параметры АС ОП исходя из требований к диапазону рабочих частот, точности и достоверности пеленгования.

Уменьшение количества каналов ОП, обеспечивающих синхронный прием сигналов, приводит к снижению объема информации о направлении прихода радиоволны, извлекаемой из наблюдаемых данных, а следовательно – к снижению эффективности пеленгования. На рис. 4 представлены пеленгационные рельефы при использовании моноимпульсного (кривая 1) и двух различных вариантов интерферометрического способа (кривые 2, 3) приема сигналов для ОП с 7-ЭКАР. Видно, что использование моноимпульсного способа обеспечивает повышение точности и достоверности пеленгования, чувствительности и ширины диапазона рабочих частот ОП.

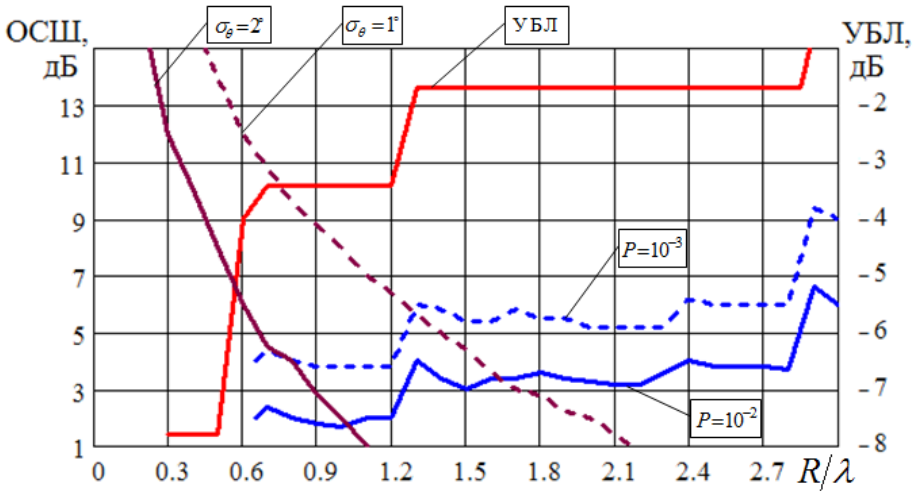



Рис. 3. Зависимость отношения сигнал/шум от $R/\lambda$, обеспечивающего заданные СКО и вероятность аномальной ошибки пеленгования ИРИ с помощью ОП с семиэлементной ЭКАР

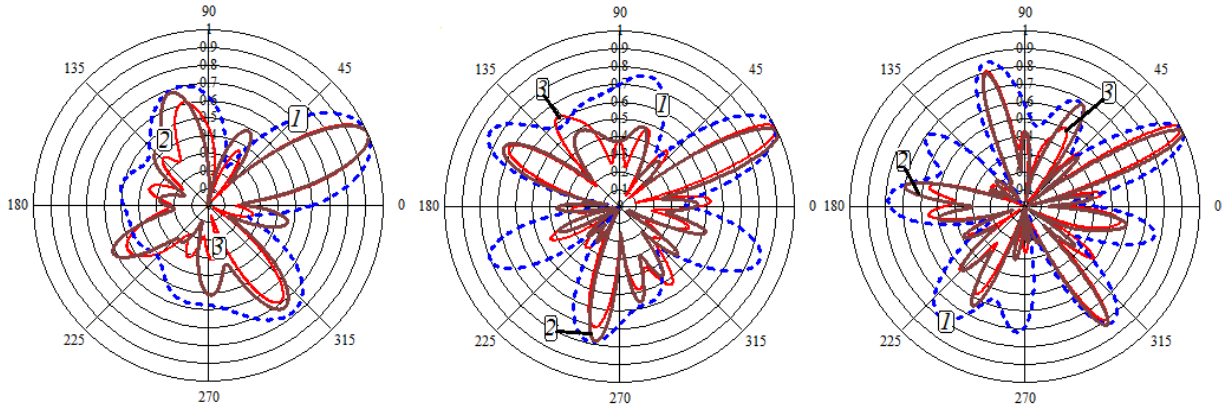



Рис. 4. Пеленгационный рельеф в случае моноимпульсного (1) и двух интерферометрических (2), (3) способов приема сигналов

В качестве основных показателей эффективности обнаружения-пеленгования следует отметить вероятность правильного обнаружения и ложной тревоги, а также параметры точности и достоверности пеленгования – оценивания направления прихода радиоволн ИРИ. При этом достоверность пеленгования характеризует степень уверенности в правильности оценивания направления прихода радиоволны и (в рамках методологии Байеса) применительно к каждому акту измерения определяется апостериорной плотностью вероятности – условной плотностью вероятности оцениваемого параметра относительно наблюдаемых данных. Специалистами центра разработан метод [13] оценки достоверности результатов обнаружения-пеленгования, адаптивный к априорно неизвестной интенсивности шума. Использование данного метода позволяет повысить надежность информации, получаемой с помощью подсистемы РР, и, следовательно, эффективность функционирования комплексов и средств РЭБ.

### *Методы многосигнального пеленгования*

При многолучевом распространении УКВ радиоволн, в условиях сложного рельефа местности, плотной городской застройки на АС ОП на одной частоте приходят несколько радиоволн. Характерной особенностью распространения радиоволн в коротковолновом диапазоне является их переотражение от различных слоев ионосферы, что также приводит к наличию в месте размещения приемной антенны прямой и отраженных радиоволн на одной частоте, различающихся направлениями прихода. Кроме того,

в случаях воздействия преднамеренных и непреднамеренных помех также возможны ситуации, когда принимаемые АС ОП радиоволны имеют не одинаковые, но близкие по номиналам частотные компоненты. В указанных случаях, если спектральные компоненты радиоволн попадают в один и тот же элемент разрешения ОП по частоте, их также следует считать частотно-неразделимыми для данного ОП.

При наличии нескольких частотно-неразделимых радиоволн «односигнальные» ОП в общем случае будут давать ложные пеленги (которые можно считать аномальными ошибками пеленгования) и пропуски сигналов от ИРИ. Кроме того, в общем случае радиоволны от одного ИРИ, приходящие по разным траекториям, можно считать частично когерентными, что ухудшает точность и достоверность пеленгования. Поэтому актуальной задачей является разработка в рамках теории статистической радиотехники методов пеленгования нескольких частотно-неразделимых радиоволн с помощью многоканальных моноимпульсных ОП подсистем РР перспективных комплексов РЭБ.

Взаимный угловой разнос направлений прихода радиоволн может быть различным, в том числе меньшим так называемого релеевского предела разрешения. Последнее обстоятельство послужило причиной тому, что данные методы часто называют методами сверхразрешения. Далее будем использовать термин «многосигнальное пеленгование», понимая под ним пеленгование нескольких частотно-неразделимых радиоволн с произвольным взаимным угловым разносом, в том числе меньшим релеевского предела.

Известно большое число методов, которые дают возможность определить параметры нескольких частотно-неразделимых радиоволн, даже если углы их прихода находятся в пределах ширины основного луча диаграммы направленности антенной системы (например, методы Кейпона, MUSIC, теплового шума, проекционные методы [14]). Все известные методы сверхразрешения основаны в той или иной степени на анализе дискретного спектра матрицы взаимных энергий спектральных компонент напряжений сигналов на выходах каналов АС ОП. Исследования методов сверхразрешения показали, что возможности их эффективного использования при решении задач РР с помощью многоканальных моноимпульсных ОП ограничиваются специфическими требованиями, предъявляемыми к подсистемам РР перспективных комплексов РЭБ.

Применительно к подсистемам РР Центром решена в наиболее общей постановке задача многосигнального обнаружения-пеленгования и оценивания количества частотно-неразделимых радиоволн. Многосигнальный пеленгационный рельеф имеет вид [15–17]

$$\Pi(\boldsymbol{\alpha}) = \mathrm{Tr}\left(\mathbf{N}(\boldsymbol{\alpha})\mathbf{K}^{-1}\mathbf{W}\mathbf{K}^{-1}\right), \qquad (7)$$

где $\boldsymbol{\alpha}$ – вектор азимутов и (или) углов места прихода радиоволн; $\mathbf{N}(\boldsymbol{\alpha}) = \dot{\mathbf{H}}(\boldsymbol{\alpha})\mathbf{S}^{-1}\dot{\mathbf{H}}^{\mathbf{H}}(\boldsymbol{\alpha})$; $\dot{\mathbf{S}} = \dot{\mathbf{H}}^{\mathrm{H}}(\boldsymbol{\alpha})\mathbf{K}^{-1}\dot{\mathbf{H}}(\boldsymbol{\alpha})$; $\mathbf{G} = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{W}\mathbf{K}^{-1}$; $\mathrm{Tr}(\cdot)$ – оператор следа матрицы. В качестве примера на рис. 5 приведена функция неопределенности (ПР (7) при бесконечно большом ОСШ) метода двухсигнального пеленгования в случае ОП с семиэлементной ЭКАР при $R/\lambda = 0,75$. Истинные азимуты направлений прихода частотно-неразделимых радиоволн равны 200 и 100º.

Оценка количества частотно-неразделимых радиоволн реализуется посредством итерационной процедуры [17] вычисления глобальных максимумов многосигнальных ПР для каждой из различаемых гипотез и последовательного попарного сравнения значений глобальных максимумов с пороговым уровнем, обеспечивающим требуемую вероятность ошибки первого рода. Разработанные методы являются работоспособными в случае приема частично и даже полностью когерентных радиоволн, а их внедрение в СПО комплексов РЭБ позволит вести достоверную РР в сложных природно-географических условиях.

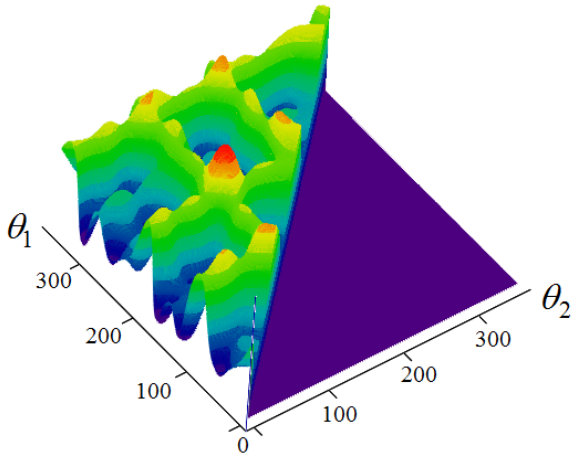



Рис. 5. Функция неопределенности метода двухсигнального пеленгования в случае ОП с 7-ЭКАР при $R/\lambda = 0,75$

***Компенсация ошибок пеленгования, обусловленных взаимными электродинамическими влияниями в антенных системах***

Ввиду возрастающих (с течением времени) требований, предъявляемых к комплексам РЭБ в части характеристик точности пеленгования ИРИ, все более важное практическое значение приобретает решение задачи снижения величины составляющей СКО пеленгования, обусловленной взаимными электродинамическими влияниями (ВЭВ) в АС ОП. Существующие в настоящее время методы в различной степени основаны на предположениях эвристического характера, разработаны и являются работоспособными лишь для некоторой конкретной конфигурации АС и типов ее АЭ. Анализ многочисленных научных публикаций в данном направлении позволяет сделать вывод об отсутствии единого подхода к решению задачи компенсации составляющей СКО пеленгования, обусловленной ВЭВ в АС, основанного на положениях теории СРТ.

В Центре получили развитие и обобщение известные подходы и разработаны новые методы компенсации составляющей СКО пеленгования, обусловленной ВЭВ в АС ОП с произвольной конфигурацией, типом АЭ и их количеством. Методы основаны на анализе дискретного спектра матрицы координат расположения элементов АС и синтезе решающего правила различения статистических гипотез, являются работоспособными во всем диапазоне рабочих частот АС ОП, в частности в случае несправедливости метода наведенных ЭДС, когда коэффициенты матрицы ВЭВ зависят от частоты и направления прихода радиоволны.

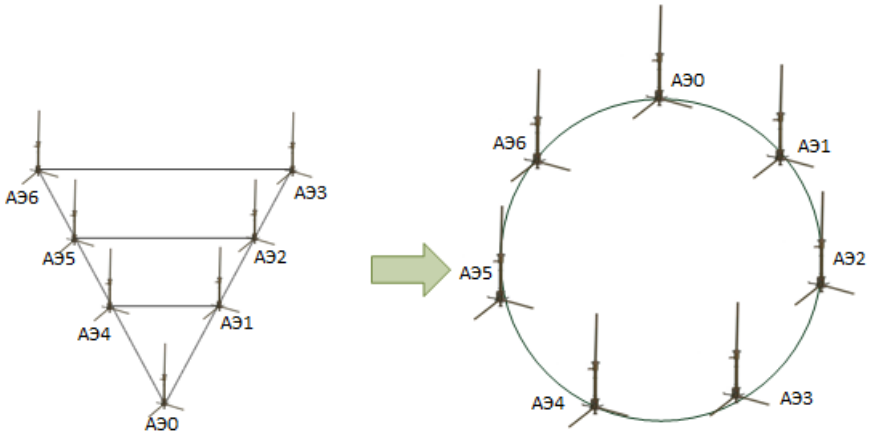



Рис. 6. Конфигурация АС ОП КВ диапазона до и после модернизации станции помех

В частности, модернизация автоматизированной станции помех КВ диапазона в части оптимизации конфигурации антенной системы (см. рис. 6) и специального программного обеспечения без существенного изменения аппаратной части обеспечила переход станции помех на новый технический уровень, обеспечивающий СКО пеленгования менее 1°.

***Совместная обработка разведданных от разнотипных средств РЭБ***

Радиоэлектронное информационное обеспечение системы РЭБ осуществляется на основе совместной обработки разведданных, поступающих от различных источников информации. В Центре разработан подход к ведению совместной обработки результатов измерения параметров ИРИ подсистемами РР разнотипных средств РЭБ, предполагающий решение задачи совместного отождествления результатов по принадлежности к одному и тому же ИРИ и вычисление вектора результирующей оценки [18].

Решающее правило отождествления основано на вычислении расстояний Махаланобиса между измеренными и результирующим векторами и сравнении решающей функции с пороговым уровнем. Порог отождествления инвариантен к размерности компонент оцениваемого вектора и номиналам его компонент. Отождествленные по принадлежности к одному ИРИ результаты измерений усредняются с весовыми коэффициентами, учитывающими точность и достоверность каждого измерения. Точность и достоверность результирующей оценки выше наиболее точного результата измерения, что обеспечивает повышение эффективности совместной обработки.

Весовые коэффициенты усреднения учитывают все компоненты матриц ковариации измерений. Благодаря этому при формировании результирующего вектора оценивания результаты измерений подсистемами РР разнотипных средств РЭБ усредняются с учетом ориентации эллипсов их рассеяния. Это позволяет учитывать различия во взаимном расположении разнотипных средств РЭБ относительно ИРИ (в частности, в случае разных дальностей и геометрических факторов при местоопределении ИРИ подсистемами РР, размещенными на носителях различного типа).

Предлагаемый подход к решению задачи отождествления и совместной обработки результатов РР предполагает возможность ее реализации средствами СПО в автоматизированном режиме с требуемой вероятностью ошибки отождествления, задаваемой оператором. Это, в свою очередь, позволяет минимизировать субъективность вклада оператора в процесс совместной обработки результатов РР и стабилизировать значения ее показателей эффективности.

### *Заключение*

Исследуемые специалистами Центра перспективные направления развития методов радиоразведки в рамках теории статистической радиотехники позволяют разрабатывать высокоэффективную радиоэлектронную аппаратуру для комплексов и средств РЭБ с характеристиками, соответствующими мировому уровню, осуществлять разработку многофункциональных комплексов РЭБ различного базирования, обеспечивающих радиоразведку и радиоподавление инфокоммуникационных систем.

Сформированный Центром научно-технический и технологический задел позволяет сегодня решить задачу создания перспективных интегрированных систем РЭБ на основе быстродействующих высокоточных подсистем разведывательно-информационного обеспечения, средств помех на различных носителях, высокоскоростных систем связи с гибкой структурой и открытой архитектурой, интеллектуализации процессов обработки информации, принятия решений и управления.

### *Литература*

1. *Левин Б.Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989. 656 с.

2. *Куликов Е.И., Трифонов А.П.* Оценка параметров сигналов на фоне помех. М.: Советское радио, 1978. 295 с.

3. *Репин В.Г, Тартаковский Г.П.* Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М.: Сов. радио, 1977. 432 с.

4. *Артемов М.Л., Афанасьев О.В., Сличенко М.П.* Обнаружение и пеленгование источников радиоизлучений в рамках теории статистической радиотехники // Радиотехника. 2016. № 5. С. 26–40.

5. *Артемов М.Л., Афанасьев О.В., Сличенко М.П.* Методы статистической радиотехники в современном решении задач радиомониторинга // Антенны. 2016. № 6. С. 55–62.

6. *Дмитриев И.С., Сличенко М.П.* Максимально правдоподобное обнаружение и оценивание направления прихода и амплитуды напряженности радиоволны с помощью многоканального радиопеленгатора с антенной системой произвольной конфигурации // Антенны. 2011. № 5. С. 59–64.

7. *Артемов М.Л., Борисов С.Г., Сличенко М.П.* Характеристики максимально правдоподобного обнаружения радиосигналов моноимпульсными обнаружителями-пеленгаторами с антенной системой произвольной конфигурации // Радиотехника. 2014. № 11. С. 11–14.

8. *Сличенко М.П.* Характеристическая функция произвольной квадратичной формы, построенной на комплексных коррелированных гауссовских величинах // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59, № 5. С.473–481.

9. *Артемов М.Л., Абрамова Е.Л., Сличенко М.П.* Пространственно многоканальное адаптивное обнаружение радиосигналов в частотной области при неидентичных каналах приема // Радиотехника. 2014. № 11. С. 5–10.

10. *Артемов М.Л. Афанасьев О.В., Дмитриев И.С., Сличенко М.П.* Особенности функционирования максимально правдоподобного алгоритма обнаружения и оценивания параметров плоской монохроматической радиоволны в условиях сложной помеховой обстановки // Радиотехника. 2013. № 3. С. 62–68.

11. *Виноградов А.Д., Дмитриев И.С., Соломко Е.С., Сличенко М.П.* Синтез адаптивного алгоритма обнаружения-пеленгования моноимпульсным радиопеленгатором с антенной решеткой произвольной конфигурации // Антенны. 2013. № 5. С. 36–42.

12. *Артемов М.Л. Афанасьев О.В., Дмитриев И.С., Попов В.В., Сличенко М.П.* Потенциальная точность оценивания направлений прихода и амплитуд напряженности поля нескольких плоских монохроматических радиоволн многоканальным радиопеленгатором с антенной системой произвольной конфигурации // Радиотехника. 2013. № 3. С. 69–75.

13. *Артемов М.Л. Афанасьев О.В., Сличенко М.П., Артемова Е.С.* Апостериорная плотность вероятности результатов пеленгования источников радиоизлучений подсистемами радиоэлектронной разведки перспективных комплексов радиоэлектронной борьбы // Антенны. 2017. № 5. С. 53–60.

14. *Krim H., Viberg M.* Two decades of array signal processing research // IEEE Signal Processing Magazine. 1996. Pp. 67–94.

15. *Виноградов А.Д., Дмитриев И.С., Ильин М.Ю., Сличенко М.П.* Многосигнальный максимально правдоподобный алгоритм обнаружения и оценивания направлений прихода и амплитуды напряженности поля плоских монохроматических радиоволн с помощью многоканального радиопеленгатора с антенной системой произвольной конфигурации // Антенны. 2012. № 4. С. 55–65.

16. *Артемов М.Л. Афанасьев О.В., Сличенко М.П.* Максимально правдоподобная оценка количества частотно-неразделимых радиоволн в рамках теории статистической радиотехники // Радиотехника. 2016. № 5. С. 40–46.

17. *Артемов М.Л., Афанасьев О.В., Борисов С.Г., Сличенко М.П.* Метод адаптивного оценивания количества частотно-неразделимых радиоволн многоканальными обнаружителями-пеленгаторами подсистем радиоразведки перспективных комплексов радиоэлектронной борьбы // Антенны. 2017. № 5. С. 33–38.

18. *Артемов М.Л., Афанасьев О.В., Попов В.В., Сличенко М.П.* Совместная обработка результатов адаптивного оценивания направления на источники радиоизлучения // Антенны. 2017. № 5. С. 39–45.

Статья поступила в редакцию 14 марта 2018 года

УДК 519.7:621.39

**КОНФЛИКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

© Авторы, 2018

**В.И. Николаев**, д.т.н., профессор, научный референт, e-mail: nikolaev@sozvezdie.su
**Н.Н. Толстых**, д.т.н., профессор, научный референт, e-mail: tnn@sozvezdie.su
АО «Концерн «Созвездие»

*Предложены концептуальные подходы к оценке устойчивости функционирования компьютерных систем в условиях информационного конфликта, изложены методические основы проведения таких оценок. Рассмотрена технология удаленного перехвата управления процессорными системами и приведен пример ее практической реализации.*

***Ключевые слова:*** *инфокоммуникационная система, конфликт, конфликтное взаимодействие, многоконтурное управление, модель конфликта.*

**CONFLICT INTERACTION OF INFORMATION AND COMMUNICATION SYSTEMS**

© All rights reserved, 2018

**V.I. Nikolaev**, D.Sc. in Engineering Science, Professor, Scientific Adviser, e-mail: nikolaev@sozvezdie.su
**N.N. Tolstykh**, D.Sc. in Engineering Science, Professor, Scientific Adviser, e-mail: tnn@sozvezdie.su
JSC «Concern «Sozvezdie»

*This article offers conceptual approaches to the assessment of computer system operation stability in information conflict environments and represents methodical fundamentals for such assessments. The authors discuss the technology for remote processor system control takeover and give an example of the implementation of such a solution.*

***Keywords:*** *information and communication system, conflict interaction, multi-loop control, model of conflict.*

В настоящее время в связи с интенсификацией внедрения автоматических и автоматизированных систем в сферы государственного и военного управления акцент значимых угроз информационных воздействий сместился от человека-оператора в сторону автоматизированной или автоматической системы. Это обусловлено существенным возрастанием роли этой системы при принятии управленческих решений человеком, роль которого, соответственно, стала менее значимой. Комплекс информационных воздействий и ответных воздействий на систему обеспечения функционирования государственных или военных группировок с целью снижения эффективности их функционирования и, соответственно, уменьшения вероятности реализации их целевых функций в настоящее время стал идентифицироваться как кибервойна.

Понятие глобального информационного конфликта (кибервойны) как совокупности информационных воздействий, направленных на поражение и нарушение нормального функционирования систем управления различного уровня, особенно государственного и военного, было сформировано в специальной программе, принятой еще в апреле 2009 года. В соответствии с этой программой целями информационных воздействий, осуществляемых по информационным каналам путем коррекции (в ряде случаев перехвата) алгоритмов или программных продуктов и элементов системы управления [1, 2], должны являться системы управления вооружением и военной техникой, тыловым обеспечением, системами связи как военного, так и гражданского назначения.

Особое место в кибервойне занимают, как отмечено выше, объекты сферы государственного и военного управления, в частности мобильные, которые, по мнению зарубежных специалистов, практически невозможно в момент установления контакта классифицировать по признаку их важности, что при достаточно широкой их номенклатуре и большом количестве требует специфического подхода к проведению информационного воздействия как на них, так и через них. Поэтому кибервойна, локальный или глобальный информационный конфликт на современном этапе могут рассматриваться как многоэтапный процесс, включающий этапы определе-

 ISSN 1995-7009

ния объектов для информационного поражения, подготовки информационного воздействия и внедрения его в поражаемый объект. При этом существенным фактором, заметно снижающим значимость и эффективность информационных воздействий, является быстрая смена целей и приоритетов в системе управления, малое время актуальности информации [3].

В связи с этим в данной работе рассматриваются основные научно-технические вопросы формализованного (модельного) представления перспективной системы информационной борьбы (кибервойны) в области системы управления критических приложений и особенности оценки устойчивости таких систем.

### *Формализованное представление информационного конфликта*

Ретроспективный анализ развития средств и методов проведения информационных воздействий позволяет условно выделить три этапа их развития. Первый (доисторический) относится к середине 60-х – 70-м годам и основан, главным образом, на технических средствах разведки. Основной задачей в этот период был перехват программ, исходных данных и алгоритмов расчетов. Второй этап проходил совместно с развитием и распространением персональных компьютеров, основывался на программных вставках, компьютерных вирусах как репродуцируемых программных вставках и прямом несанкционированном доступе к вычислительным ресурсам. Третий этап начинается с 2008–2009 гг. и идентифицируется как кибервойна. Этот этап основан на концепциях полномасштабного информационного конфликта и развитом до уровня самоорганизации программно-техническом воздействии.

По мере развития технологий информационных воздействий на компьютерные системы и средств защиты информации изменялась эффективность воздействия, цели и объекты воздействия, а также технологии защиты (рис. 1). В начале 90-х годов сравнительно небольшое число информационных воздействий было направлено против одиночных компьютеров и имело практически максимальную эффективность. По мере развития технологий информационных воздействий их число к середине 90-х годов возросло до нескольких сотен тысяч, но эффективность за счет развития средств защиты заметно снизилась до единиц процентов, что привело к заметному уменьшению числа значимых атак. В настоящее время (третий этап развития средств и методов информационного противоборства) информационные воздействия направлены на изменение режимов функционирования системы или элементов системы. Они включают, наряду с корректирующими работу системы элементами, программы воздействия на одиночные компьютеры, то есть происходит интеграция средств информационного воздействия первых этапов развития и современного. Поэтому рост числа атак и процента успешно проведенных атак на индивидуальные компьютеры и компьютерные системы происходит сейчас примерно параллельно [1].

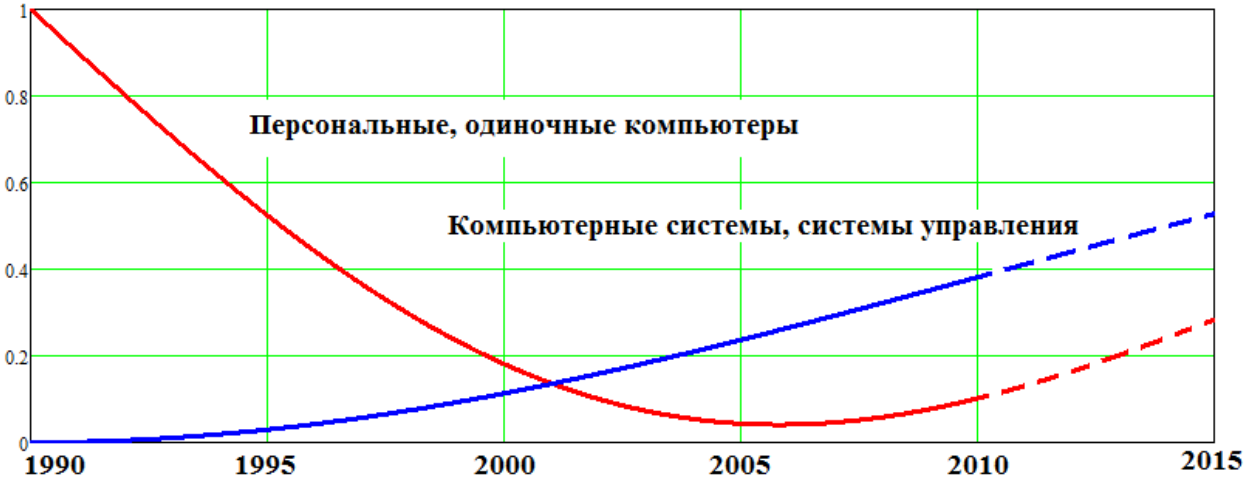



Рис.1. Доля успешно проведенных информационных воздействий от общего числа атак на ресурсы индивидуальных компьютеров и компьютерных систем управления (по материалам доступных источников)

Повышение уровня автоматизации телекоммуникационных систем управления критических приложений и информационной «мощности» используемых в них компьютерных устройств и элементов привело к повышению номенклатуры и уровня самостоятельно принимаемых автоматизированной системой решений, к переходу процесса взаимодействия, в том числе и конфликтного, на уровень автоматической системы. В современных условиях обозначилась и интенсивно развивается концепция «система против системы», которая на уровне функционального структурирования выражается взаимодействующими уровнями самоорганизации, принятия решения и его реализации. Это является одной из основных особенностей при решении проблемы кибербезопасности систем управления критических приложений [3, 4].

В отличие от традиционного рассмотрения взаимодействия объектов или элементов систем, особенно сложных, появляются неизвестные для каждой из взаимодействующих сторон элементы и процессы, реакция на которые в принципе не может быть предусмотрена и, в зависимости от уровня их неопределенности и располагаемого для их анализа информационного ресурса, синтезируется на верхних уровнях. Именно этот неопределенный и неизвестный компонент и его доля в общем объеме информационного обмена определяет характер (конфликтный или кооперативный) взаимодействия систем, эффективность реализации ими своих целевых функций.

Это требует оптимальной с точки зрения эффективности реакции на эти элементы реализации процедур обмена данными между элементами всех уровней компьютерных подсистем и распределения между ними информационного ресурса. Тогда взаимодействие систем требует и объективно обуславливает необходимость формирования иерархической структуры управления с различным временем реакции, располагаемым информационным ресурсом и типовым перечнем задач.

При конфликтном взаимодействии систем управления, в частности критических приложений, основная задача функциональной структуры состоит в синтезе и реализации процедуры снятия неопределенности взаимодействующих элементов, поскольку на остальные элементы найдена (синтезирована ранее) адекватная функция управления. В этом случае взаимодействие систем можно формализованно представить функционалом (уравнением) баланса (в отличие от известных работ не только ресурсного, но и управления), нарушение которого приводит к доминированию одной из взаимодействующих сторон:

$$A^k_{i,j}(T_k, W_k) \times P_A(b^k_{i,j}) \leftrightarrow B^k_{i,j}(T_k, W_k) \times P_B(a^k_{i,j}), \quad (1)$$

где $\{A,B\}^k_{i,j}$ – функционал выработки системами $A$ и $B$ решающей функции на $k$-м уровне управления $i$-го объекта $j$-м процессом, $T_k$ и $W_k$ – располагаемые временной и информационный ресурсы уровня, $P_A$ и $P_B$ – вероятности выработки адекватного алгоритма управления системой $A$ в отношении неизвестного (противоборствующего) компонента системы $b^k_{ij}$ и системой $B$ в отношении неизвестного (противоборствующего) компонента $a^k_{ij}$ соответственно.

При этом величина $P_{A,B}$ будет определяться произведением, соответствующим каждому уровню событий, направленных на снятие неопределенности взаимодействующего компонента. Так, на нижнем уровне это будет представляться в виде вероятности обнаружения неизвестного компонента, на уровне принятия решения – вероятностью правильного отнесения его к неизвестным (неопределенным), а на уровне самоорганизации – вероятностью снятия неопределенности с этого компонента.

При этом подсистема безопасности и защиты информации должна рассматриваться в составе всей системы и ее эффективность должна определяться только вероятностью реализации своих целевых функций всей системой. Например, часто оказывается, что эта вероятность у системы, не оснащенной системой защиты информации, выше, чем у имеющей такую защиту. Это обусловлено, главным образом, тем, что функционирование системы защиты требует информационных и временных ресурсов при их дефиците в системе и оптимизации алгоритма управления ресурсами.

При функционировании такого комплекса образуется множество вложенных контуров управления, которые должны обеспечивать взаимное согласование, синхронизацию всех элементов системы. И в этом смысле все элементы системы должны быть взаимно согласованы, что обеспечивает решение задачи, которую каждый из элементов отдельно решить не в состоянии. Тогда в зависимости от уровня дублирования и резервирования управления, требуемой степени согласованности состояний элементов системы несанкционированное нарушение состояния любого из элементов

может привести к заметному уменьшению вероятности реализации целевой функции.

При таком подходе информационный конфликт представляется в виде взаимодействия двух потоков сигналов управления, направленных на реализацию автоматизированной (или автоматической) телекоммуникационной системой нужных каждой из сторон действий и перевода этой системы в требуемое каждой из сторон состояние. То есть сигналы управления реализуются двумя глобальными контурами (рис. 2):

– системой связи – как последовательность

$$B_{V1} \rightarrow B_S \rightarrow B_{V2} \rightarrow B_{V3} \rightarrow B_{V1} \ldots$$

– системой информационного воздействия – как

$$B_{N1} \rightarrow B_S \rightarrow B_{N2} \rightarrow B_{N3} \rightarrow B_{N1} \ldots$$

При реализации такого управления обязательно присутствует неопределенность исходного состояния, наличие которой в каждом из контуров управления приводит к отклонению итогового состояния системы от требуемого каждой стороной. Поэтому можно считать, что управление каждой системой сводится к исключению этой неопределенности и получению в условиях конфликта требуемого этой стороной состояния.

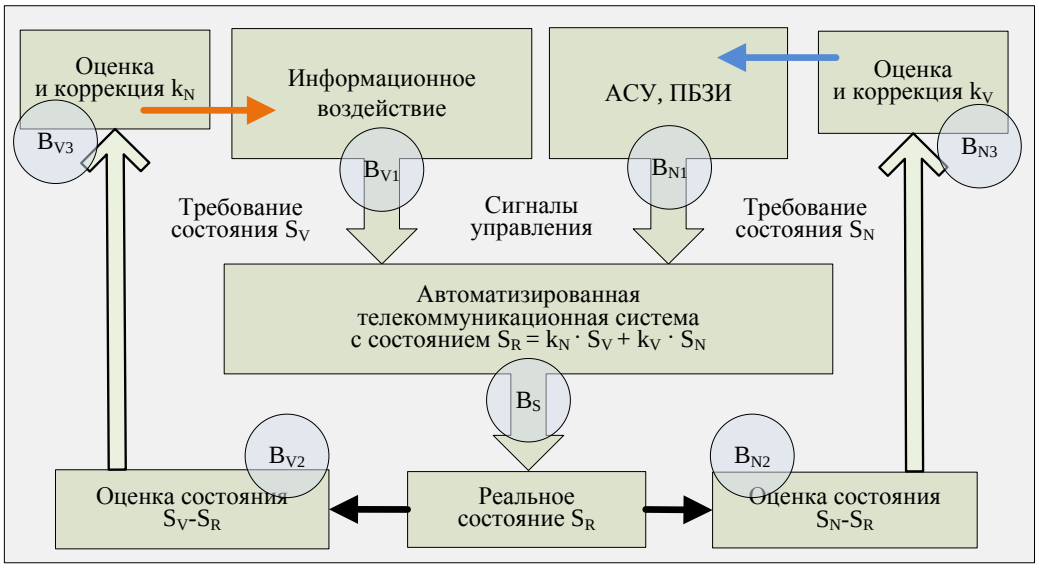



Рис. 2. Процесс взаимодействия как многоконтурное управление на основе снятия неопределенности, где $k_N$ и $k_V$ – коэффициенты априорной неопределённости состояния взаимодействующих объектов

Детализация правил и алгоритмов конфликтного взаимодействия происходит на уровне принятия решений, на котором формируются алгоритмы страта реализации решения и непосредственного управления. Уровень непосредственного управления (реализации решения) является самым «быстрым» и должен требовать для управления заметных информационных ресурсов. То есть синтез алгоритмов решения функциональных задач и алгоритмов функционирования всей системы проводится постоянно и распределяется по всему жизненному циклу системы.

Таким образом, в общем случае информационный конфликт можно представить в виде двух базовых конкурирующих процессов, реализуемых в отношении компьютерной (инфокоммуникационной) системы для получения в результате выполнения управляющего сигнала требуемого состояния (рис. 2). Информационное воздействие, вырабатывающее сигнал управления $B_{V1}$, и автоматизированная или автоматическая система управления (АСУ), вырабатывающая свой сигнал управления $B_{A1}$, воздействуют на автоматизированную телекоммуникационную систему (АТС) с целью перевода ее в состояние $S_V$ или $S_A$ соответственно.

При этом состояние каждого из участвующих в реализации конфликта компонентов (информационного воздействия $S_V$, системы управления АТС $S_A$ и собственно реального состояния АТС $S_R$) на произвольном $i$-м шаге функционирования определяется совокупностью их технических и информационных параметров на основе системы рекуррентных уравнений

$$\begin{cases} S_R(t_i) = S_R(t_{i-1}) + S_R(t_{i-1}) \cdot L_R(X_{i-1}, Y_{i-1,} Z_{i-1}), \\ S_A(t_i) = S_A(t_{i-1}) + k_{APi} \cdot S_A(t_{i-1}) \cdot L_A(Y_{i-1}), \\ S_V(t_i) = S_V(t_{i-1}) + k_{VPi} \cdot S_V(t_{i-1}) \cdot L_V(Z_{i-1}), \end{cases} \quad (2)$$

где $X = X\{x_k(t)\}$, $Y = Y\{y_k(t)\}$ и $Z\{z_k(t)\}$ – совокупность параметров взаимодействующих компонентов, $k_P$ – коэффициент неопределенности оценки состояния конкурирующего та[1], $L_{R,A,V}$ – операторы преобразования входного потока трех указанных выше компонентов (передаточные характеристики).

Соответственно, параметры системы информационного воздействия $Z(t)$, системы управления связью $Y(t)$ и АТС $X(t)$ также будут определяться рекурсивным образом, которые с учетом возникающих в этих компонентах задержек $\tau_x$ можно представить в виде

$$X(t) = X(t - \tau_R) + L_R(t - \tau_R) \times$$
$$\times \left[ L_V(t - \tau_V) + L_A(t - \tau_A) \right] \cdot X(t - \tau_A - \tau_V),,$$
$$Y(t) = Y(t - \tau_R) + L_A(t - \tau_A) \times$$
$$\times \left[ L_R(t - \tau_R) + L_A(t - \tau_A) \right] \cdot Y(t - \tau_A),$$
$$Z(t) = Z(t - \tau_R) + L_V(t - \tau_V) \times$$
$$\times \left[ L_R(t - \tau_R) + L_A(t - \tau_A) \right] \cdot Z(t - \tau_V). \quad (3)$$

Переходя к дифференциальной форме представления (3), с учетом $M$ уровней иерархии и $N$ элементов на каждом уровне динамику изменения состояния любой из взаимодействующих систем и собственно компьютерной системы или параметров каждого элемента можно представить системой из $N$ уравнений для каждого компонента – системы управления и системы информационного воздействия – в виде

$$\frac{dY_n(t)}{dt} = a_{An} Y(t - \tau_A) +$$
$$+ \sum_{n=1,m=1}^{M,N} k_{c,n,m} \cdot \rho_{m,n}(X * Y * Z) \cdot k_{PA}(t) \times$$
$$\times \left[ X(\mathrm{t} - \tau_R) - k_{PV}(t) Y(t - \tau_A) \right] - c_{An} Y(t - \tau_R); \quad (4)$$
$$\frac{dZ_n(t)}{dt} = a_{Vn} Z(t - \tau_V) + k_{cn}(t) \times$$
$$\times k_{PV}(t) \left[ X(t - \tau_R) - k_{PA}(t) \cdot Z(t - \tau_V) \right] -$$
$$- c_{Vn} Z(t - \tau_R), \quad (5)$$

при этом

$$a_{An} = \frac{1}{M} \cdot \sum_{m=1}^{M} S_{m,n} \cdot \left\{ \frac{X(\tau_{Rm}) + Y(\tau_{Am})}{Y(\tau_{Am}) + Z(\tau_{Vm})} \right\} \times$$
$$\times \exp\left\{ - \frac{F_{TV} \cdot (\tau_{Rm} + \tau_{Am} - \tau_{Rm})}{(F_{TA} + F_{TR} - F_{TV}) \cdot (\tau_{Rm} + \tau_{Am})} \right\}, \quad (6)$$

$$a_{Vn} = \frac{Z(\tau_{Vm})}{Y(\tau_{Am}) + X(\tau_{Rm})}, \quad (7)$$

где $\rho_{m,n}(\ldots)$ – коэффициент конфликтности принимаемого элементом $n$ от элемента $m$ потока, определяемый как ядро потенциала его случайного блуждания; $k_{cn}$ – коэффициент связности данного конкретного элемента с другими, определяемый произведением энергетической, семантической и прагматической связности; $S_{m,n}$ – коэффициент связности $m$-го и $n$-го элементов, значение которого в общем виде можно определить как произведение

$$S_{m,n} = S^c_{m,n} \cdot S^s_{m,n} \cdot S^p_{m,n}, \quad (8)$$

где $S^c_{m,n}, S^s_{m,n}, S^p_{m,n}$ – энергетическая (сигнальная), семантическая и прагматическая связности соответственно.

Такой подход, в отличие от известных, позволяет при анализе информационной устойчивости любой системы управления абстрагироваться от понятий *информационное воздействие* или *«вредоносная» программа*. Это обусловлено тем, что, во-первых, вероятность реализации собственной целевой функции рассматривается через реакцию на поступающий поток, а во-вторых, тем, что рассматривается суммарный поток от всех элементов, независимо от того, сформирован он противником (конкурентом, злоумышленником) или собственной системой информационной безопасности.

### *Оценка устойчивости компьютерной системы*

В настоящее время только на уровне разработки системы закладывается модель противоборствующей стороны, которая в дальнейшем, в том числе и в процессе реального функционирования, может только уточняться, а действия на уровне непосредственного управления на известные и определенные события должны предопределяться на ранних этапах и более высоких уровнях. При этом проблема сокращения времени начальной настройки и адаптации системы защиты информации в системе становится одной из основных. В этом смысле весьма показатель-

[1] При $k_p = 1$ неопределенность считается снятой и управление ресурсами реализуется с максимальной эффективностью.

ны постоянные времени системы, которые составляют для этапа разработки 0,5–1 год; для этапа подготовки к реальной работе (например, при вводе в эксплуатацию в виде элемента системы управления) – до 10 дней; для этапа обновления информации о состоянии системы связи – примерно 1,5–12 часов; для уточнения данных при функционировании – около 20–30 минут, при отработке стандартизованных алгоритмов (например, входа в систему или регистрации) – от 1 до 5 минут. Это требует постоянного сокращения времени реакции АСУ на изменение состояния противоборствующей стороны и увеличения информационного ресурса проектируемых аппаратных.

С этой точки зрения, взаимодействующие элементы компьютерных систем должны синтезировать стратегии, направленные на обеспечение заданной вероятности выполнения своих целевых функций, на основе имеющегося информационного и материального (аппаратного) ресурса. Однако в условиях кибервойны этого оказывается недостаточно. Поэтому их действия в соответствии с этой стратегией должны быть направлены на снижение вероятности выполнения аналогичных функций противоборствующим элементом или подсистемой. Это, в свою очередь, требует введения в состав компьютерной системы или комплекса составляющей, реализующей активное воздействие на противоборствующий объект, что также в настоящее время рассматривается весьма ограниченно. Эта проблема в настоящее время практически не решается. В практических приложениях критических технологий государственного и военного управления, как показывает анализ практики применения автоматизированных систем за рубежом, эта проблема также может быть отнесена к первоочередным.

Наличие в арсенале каждой из сторон активных программно-технических средств информационных воздействий порождает проблему совмещения их с рабочими алгоритмами управления. При этом необходимо отметить, что противоборствующие элементы должны рассматриваться как единая система с различной степенью априорной неопределенности данных о взаимодействующей системе. В этом случае при различных конкретных условиях взаимодействия, когда стратегии обеспечения устойчивости и «живучести» информационных систем прямо противоположны, выбор стратегии управления (не говоря уже о его конкретном содержании) остается до настоящего времени вопросом однозначно неразрешенным, в ряде случаев – спорным.

Так, в ряде существующих подходов к обеспечению эффективной защиты информации основное внимание уделяется оценке возможности применения адаптивных механизмов управления в составе подсистемы безопасности и защиты информации или в составе информационного воздействия с использованием активных обратных связей, что должно обеспечить повышение эффективности защиты или информационного воздействия. При этом необходимо отметить, что подход, основанный на применении методов адаптивного управления, в настоящее время доминирует, что обусловлено, вероятно, рассмотрением взаимодействующих подсистем как отдельных, обособленных элементов со своими особенностями и характеристиками. При таком подходе можно оптимизировать управление одного элемента с известными параметрами и динамикой их изменения, однако управление в системе в целом получается далеким от оптимального.

Совершенно очевидно, что исход информационного конфликта между автоматизированными системами управления в условиях ограниченного информационного ресурса сторон в существенной степени определяется именно эффективностью управления, применяемого взаимодействующими (противоборствующими) системами. Поэтому целесообразно выделить проблему определения типовых особенностей процесса конфликтного взаимодействия компьютерных систем в условиях применения сторонами оптимизирующего управления, как при защите своего информационного ресурса, так и при воздействии на информационный ресурс противоборствующей стороны, с целью определения «сильных» и «слабых» сторон используемых стратегий. Это реализуется через цепочки вложенных контуров управления, образуемых на различной совокупности элементов и обладающих различным временным масштабом.

### *Возможности принудительного перевода системы в заданное целевой состояние*

Информационное противоборство в соответствии с современными концепциями можно представить в виде борьбы за приоритет управления, то есть за реализацию своего целевого состояния, как для «своих» элементов, так и «чужих». Конкретизируя приведенный выше

подход с множественными контурами управления, информационный конфликт можно представить в виде двух только глобальных процессов. Считая, что они порождены конкуренцией целевых функций внутренней системы управления и навязываемых внешним источником, всегда можно выделить нескольких процессов, порожденных *k*-м объектом и реализуемых множеством кодовых (или сигнальных) последовательностей $U^k_{j,i} = U^k_j(t_i)$, синтезируемых, хранящихся и циркулирующих в операционной среде произвольной компьютерной (инфокоммуникационной) системы.

Конечно, задача перехвата управления обычно не является конечной целью информационного воздействия, а в соответствии с современной концепцией информационного противоборства выступает лишь как средство для реализации целевых функций в отношении оконечного оборудования. Однако в локальном диапазоне условий при попарном рассмотрении всей совокупности реализуемых в компьютерной (инфокоммуникационной) системе процессов она может рассматриваться и в качестве основной. То есть в широком смысле под целевым состоянием $S_j$ процесса $P_j$ можно понимать точку в пространстве состояний системы $S_j\{U_i, \Sigma U_i\}$, в которой конкретный процесс получает управление над системой, то есть становится управляющим по отношению ко всем другим процессам.

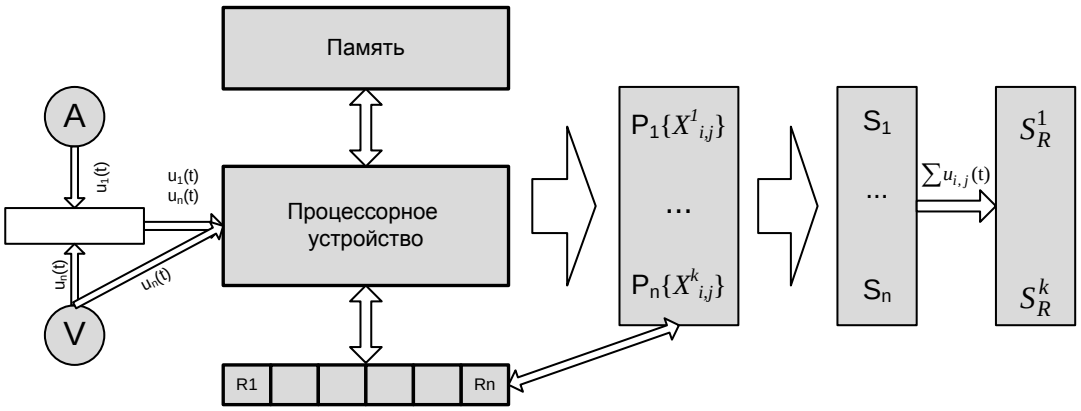



Рис. 3. Общая схема взаимодействия систем при перехвате управления

Таким образом, реальное состояние компьютерной системы $S_R$, порожденное суммарным потоком внутренних и внешних кодовых комбинаций, зависит от значения обобщенного вектора параметров системы или ее элемента $X_j = \{x_j(t)\}$, управление которым реализуется суммарным потоком кодовых или сигнальных последовательностей $U_i$, и, строго говоря, собственного изменения состояния системы $S_R$ вследствие реализации ей своей целевой функции (основной или частных). Для обычной компьютерной системы с дискретным изменением состояний справедливо

$$S_R(t_i) = F\{X(t_i), U_j(t_i), \Sigma U_{i,j}(t_i)\}.$$

Тогда в общем виде схема циркуляции управляющих последовательностей между корректируемой системой *R* и корректирующими системами-конкурентами *A* и *V* может реализовываться одним из двух возможных способов:

– воздействие *V* отправляет «свои» управляющие последовательности отдельным потоком непосредственно на процессорное устройство (такое возможно в случае работы приемопередающего устройства, через которое соединяется система *V*, например, на шинном расширителе);

– воздействие *V* содержится в составе суммарного управления через некоторое промежуточное звено информационного тракта.

На вход корректируемой системы подается совокупность потоков управляющих последовательностей $\{U_{i,j}(t_i)\}$, образующих некий суммарный поток от процессов-конкурентов и управляющего потока самой системы. Результатом работы процессорного устройства сообразно с поступающими управляющими последовательностями, состоянием памяти и процессорных регистров $\{R_1...R_N\}$ является функционирование в системе процессов $\{P_i\}$ с векторами параметров $\{X^k_{i,j}\}$, характеризующими совместно с процессорными регистрами состояние $S^k_j$ каждого процесса. На основании совокупности таких состояний, в свою очередь, формируются

состояния корректируемой системы $S^i_R$ на $i$-м шаге функционирования.

Очевидно, что при таком подходе основной задачей каждого из процессов с базовой конструкцией исполняемых кодов $\{U_{i,j}\}$ с целевой функцией перехвата управления является генерация (синтез) такой кодовой последовательности управления, которая нейтрализуют действие других процессов и переведет реальное состояние системы $S_R$ в целевое состояние $S_i$.

### *Динамика принудительного изменения состояния системы*

Реализация целевой функции системы порождает в ее пространстве состояний ветвящуюся структуру, где каждой ветви соответствует определенная частная целевая функция некоего уровня абстракции. Таким образом, выстраивается иерархическая структура, где реализация каждого вышестоящего уровня зависит от реализации его частных функций.

С точки зрения структуры фазового пространства системы такая конструкция является совокупностью колец и их подколец разной глубины вложенности, каждое из которых порождается своей частной целевой функцией. В процессе функционирования системы фазовая точка описывает некоторую траекторию в пределах данной структуры, которую можно рассматривать как случайное блуждание в фазовом пространстве.

В ходе реализации очередной целевой функции системы, порождающей свое кольцо, набор состояний и возможных переходов между ними, воздействие управления может понизить вероятность реализации целевой функции $P_{\text{ц}}$ . Когда данная вероятность падает ниже некоего порогового уровня, первоначальная система колец разрушается, и система начинает двигаться по иной траектории, отвечающей целевой функции управления, стремясь к состоянию $S_{\text{п}}$. Переходы в каждой последующей частной целевой функции будут определяться аналогично со своим пороговым значением $P_{\text{ц}}$ (рис. 4).

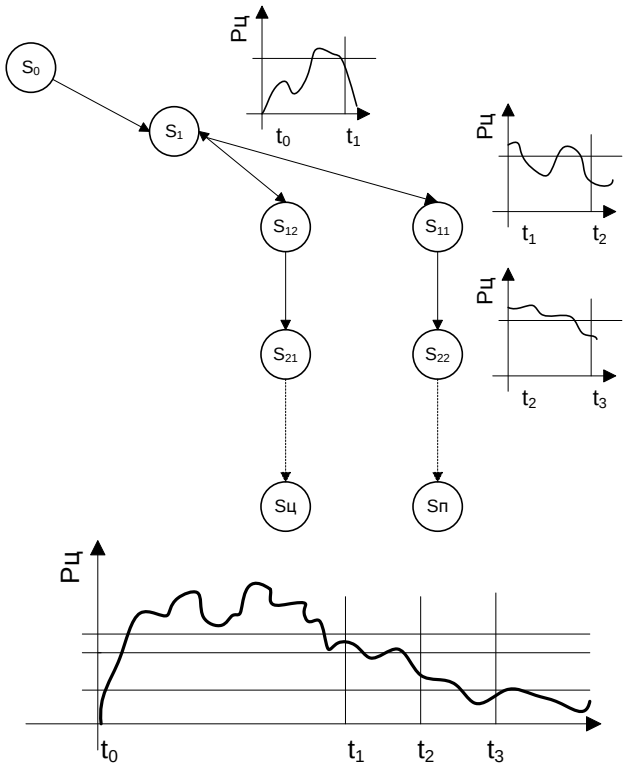



Рис. 4. Изменение вероятности реализации целевой функции системы в условиях информационного воздействия

Если команды управления перестают поступать, система с некоторой вероятностью стабилизируется и возвращается к первоначальному прогрессу состояния, восстанавливая нарушенную систему колец. Зная переходные вероятности для состояний системы, посредством расчета ядра потенциала можно выявить точки бифуркации системы. Рост значения ядра потен-

циала в точке фазового пространства говорит о потенциальной опасности данного состояния как понижающего вероятность реализации целевой функции за счет нарушения возвратности [5]. При этом наибольшей безопасностью будет обладать цепочка с наименьшим суммарным ядром потенциала

$$\min \sum_i a_n(S_i),$$

где минимум берется по всем возможным цепочкам состояний $S_i$ при длине $n$ цепочки реализации частной целевой функции внутри каждого из колец.

При таком подходе задача обеспечения минимума/максимума вероятности проведения перехвата управления сводится к поиску цепочки минимального «веса» и может быть решена в рамках теории графов, и вероятность реализации целевой функции системы можно выразить как

$$P(S_{\text{Ц}}) = g(S_0, S_{\text{Ц}}) - \prod_{i=1}^{N} (S_{\text{П}}^i, S_{\text{П}}^{i+1}),$$

где $g$ – соответствующие функции Грина для цепочки из $N$ управлений.

При этом целесообразно отметить, что вероятность возврата системы к движению в направлении целевого состояния тем меньше, чем дальше зашла реализация цепочки управлений конкурирующей последовательности.

Кроме того, следует учитывать, что успешность проведения информационного воздействия типа перехват управления напрямую зависит от продолжительности временного интервала, на котором достигается управляемое состояние. Таким образом, на практике при рассмотрении уравнений баланса с их последующей редукцией необходимо учитывать точность синхронизации корректирующего и корректируемого процессов и возникающие в процессе передачи задержки в канале.

С точки зрения выявления аномальных состояний в компьютерной системе основной задачей становится анализ распределения точек перехвата в пределах рассмотренной выше системы колец. При этом процесс их анализа сводится к определению относящихся к точкам системной бифуркации программной системы, то есть точки вызова процедур, условных и безусловных переходов и аналогичных процессов.

С другой стороны, в контексте иерархической структуры колец такие точки будут принадлежать пересечениям колец смежных уровней, что можно показать, рассмотрев динамику изменения положения рабочей точки в окрестности точки бифуркации программной системы.

Пространство состояний программной системы определяется совокупностью ряда ее параметров, таких как состояние процессорных регистров и оперативной памяти, образующих n-мерный вектор состояния. В частности, в него входит состояние регистров EBP (Base Pointer) и EIP (Instruction Pointer), содержащих адрес основания стека приложения и адрес следующей команды, соответственно, в оперативной памяти. В связи со спецификой разделения памяти между приложениями, каждому из них будет соответствовать некоторый диапазон адресов, что будет верно, в частности, и для значений регистров EBP и EIP.

Если рассматривать эти регистры как компоненты n-мерного вектора состояний программной системы, то можно построить проекцию фазового пространства системы на плоскость EBP-EIP. В процессе передачи управления между процессами *A* и *B* рабочая точка в определенный момент попадает в точки такие, что один из означенных регистров указывает на область памяти, принадлежащую процессу *A*, в то время как другой – на область, принадлежащую процессу *B* (рис. 5), то есть в области памяти, находящиеся на пересечении колец.

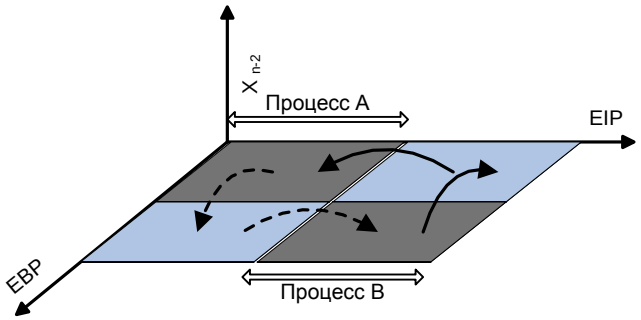



Рис. 5. Пересечение колец с точки зрения организации памяти ЭВМ

Таким образом, точки бифуркации системы будут находиться в областях пересечения колец иерархической структуры. Следует заметить, что при этом два этих множества не будут совпадать, так как, очевидно, далеко не все точки пересечения колец будут точками бифуркации. Так как для системы колец в соответствии с рассмотренным подходом случайных блужданий можно оценить вероятности реализации цепочек целевых функций, то при известном распределении точек бифуркации по кольцам можно аналогичным образом оценивать уже вероятности попадания в них.

Кроме того, данные выводы упрощают применение критерия перехвата, сужая область поиска решений приведенной выше системы уравнений:

$$L_{R,i-1}(t) \times L_{j,i-1}(t) \times X^{k}_{i-2,j}(t) = 0 ,$$

где $L_{R,i-1}(t)$ и $L_{j,j-1}(t)$ – передаточные функции системы и процессов-конкурентов, по отношению к которым осуществляется перехват управления; $X_{ki-2,j}(t)$ – искомые точки перехвата в пространстве состояний системы, то есть точки бифуркации.

Тогда в отношении произвольной композиции возможных точек перехвата управления несложно получить

$$X^{k}_{i-2,j}(t) \in \bigcap_{p} K_p ,$$

где $K_p$ – кольца иерархической структуры.

В соответствии с этим точки бифуркации целесообразно искать в некоторой окрестности точек перехода программных функций.

Естественно, приведенные выше соображения были проверены экспериментально. В соответствии с приведенной выше постановкой задачи практическая реализация предложенного подхода может быть представлена последовательностью основных частных задач:

– на фиксированном интервале времени, начиная с $t_0$ (число тактов), снимается дамп памяти, определяются точки входа реализуемых процессов и соотносятся с их описанием с выделением основных команд;

– полученные данные подставляются в системы приведенных выше уравнений, решение которых в отношении кодовой последовательности $\{U^{k}_{i,j}\}$ для каждого $i$ будет представлять траекторию приближения к точке перехвата управления;

– начиная с $t_0$, на вход исследуемой системы подается найденная последовательность кодов, и по определяемым состояниям системы определяется коррекция текущего состояния, и цикл повторяется до выполнения условия.

Несложно заметить, что такая последовательность задач может быть реализована только для оценки информационной устойчивости инфокоммуникационной системы, например, в процессе ее разработки, когда имеется возможность прямого доступа ко всем ее элементам. Для решения задач синтеза кодовой последовательности, приводящей к реализации перехвата управления удаленным элементом такой системы, требуется существенно уменьшить число точек контроля (число неизвестных и уравнений в приведенных выше системах уравнений), так как проведение удаленного дампирования весьма проблематично хотя бы по причине тривиальной невозможности точной временной синхронизации. Это обусловлено возрастанием как разброса, так и величины задержки подачи корректирующей последовательности.

В данном примере в качестве базы операционной среды была выбрана МСВС 3.0, установленная на ППЭВМ на базе i5 и имеющая 4 Гбайт оперативной памяти. Данные представлялись в виде условно упорядоченной последовательности с размерностью 512 × 512 байт, порядок передачи кодов на обработку (в центральный процессор) показан линиями. Анализ проводился в отношении 8567 возможных состояний с одновременным выделением устойчивых циклов (рис. 6), определяемых как замкнутые контуры линий состояния.

Такое представление наглядно показывает, на каком смещении (шаге выполняемой последовательности) образуются точки нейтрализации каждого потока и, в общем-то, на какое время. Это позволяет сформировать добавку к входному потоку, которая будет или усиливать условия перехвата, нейтрализуя управление («обнуляя» циклы), или снимать эти условия. То есть в данном примере реализуется синтез дополнительного контура управления системой, обеспечивающего за счет включения добавок к основному потоку кодов такие кодовые последовательности, которые переводят систему в новое, не предусмотренное регламентом функционирования состояние.

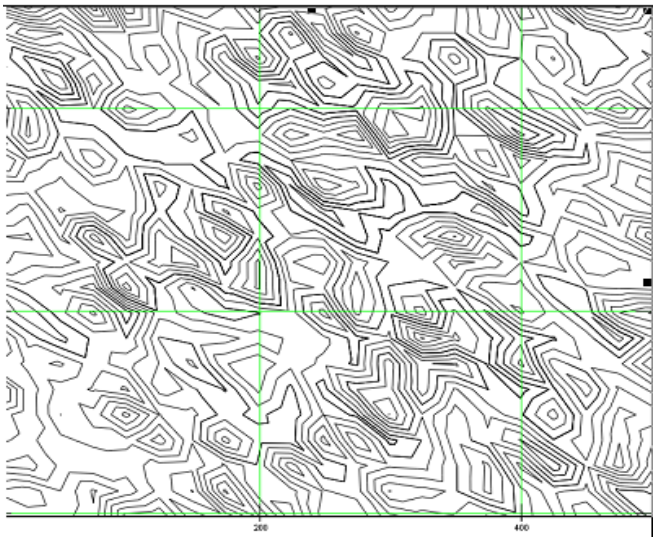


Рис. 6. Устойчивые циклы ($i$ = 1…~100000), образованные замкнутыми линиями – последовательностями обрабатываемых кодов, приводящих к нейтрализации обрабатываемых потоков

В данном конкретном примере для исследования были выбраны 10 регламентированных (0–9) состояний и нерегламентированные (10 и более, реализуемые в зависимости от требуемого «конкурентом» целевого состояния). При этом следует отметить, что при точной синхронизации, когда любое изменение состояния системы можно отследить без задержки, любое целевое состояние системы достигается за минимальное число шагов (минимальное время). Однако это может быть получено только в лабораторных условиях при нулевой задержке определения состояния системы.

При наличии задержки, особенно случайной, создание условий для перехвата управления системой также становится процессом в некотором роде случайным и с неоднозначным исходом. Это достаточно хорошо иллюстрируется изменением состояния системы при формировании условий для перехвата (рис. 7 и 8) при различной задержке.

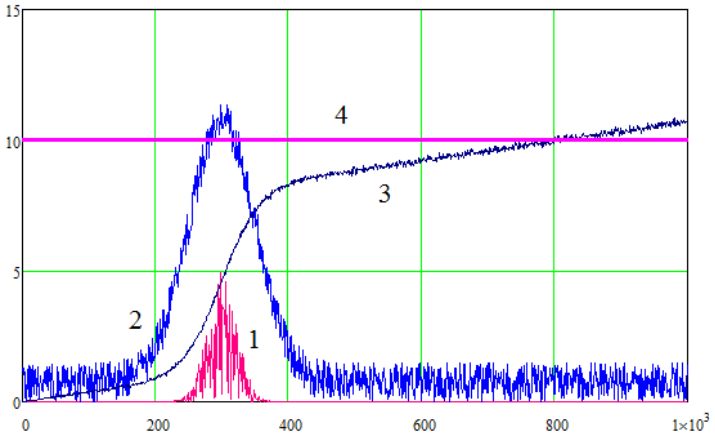



Рис. 7. Изменение состояния системы (на интервале 1000 тактов, шагов),
где 1 – несинхронизированное воздействие с возвратом изменений в область разрешенных,
2 – с потерей синхронизации на этапе перехвата управления после синтеза условий для перехвата,
3 – перехват управления состоянием системы и вывод его в область заданных «конкурентом»,
4 – граница разделения разрешенных и запрещенных (навязываемых) состояний

Так, при отсутствии синхронизации воздействие корректирующими кодами со случайной задержкой приводит к изменению состояния (кривая 1, рис. 7), но в области разрешенных комбинаций состояний элементов (регистров, ячеек и других элементов), которое быстро компенсируется операционной средой. При этом вероятность прохождения корректирующего кода

достаточно низка и в подавляющем большинстве случаев воспринимается системой как ошибка.

На рис. 8 приведены зависимости вероятности реализации целевой функции корректирующей внешней последовательности программных кодов от времени случайной задержки, порожденной ошибками в канале, при фиксированных значениях систематической задержки, являющейся, строго говоря, не меняющейся во времени характеристикой для каждой конкретной системы.

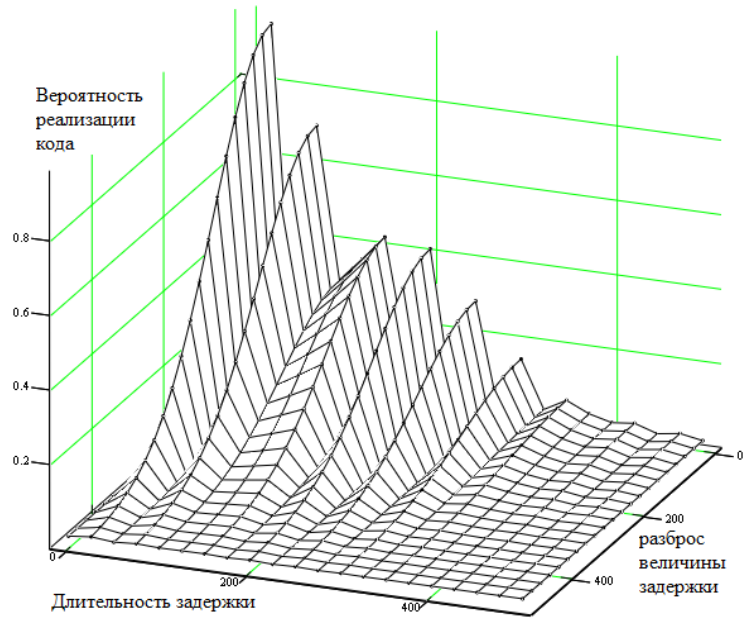



Рис. 8. Вероятность реализации целевой функции корректирующей последовательности при фиксированной систематической задержке и различной величине стохастической составляющей в задержке

Конечно, приведенный пример достаточно конкретен, и для другой операционной среды характер зависимостей может измениться, и даже весьма существенно. Однако общая тенденция сохраняется.

Необходимо также отметить, что осуществление основной идеи – определение необходимого состояния и создание условий для перехвата управления системой с автоматическим или автоматизированным управлением – требует достаточно точной синхронизации корректирующего обрабатываемого потока, что с учетом его цикличности и повторяемости кодовых последовательностей позволит реализовать принцип предсказания состояния по известному состоянию в произвольный момент времени. Однако точность предсказания момента времени реализации состояния должна быть не менее ~0,05 тактового интервала с учетом необходимости пересказывать серию моментов времени расположения точек перехвата.

На основе проведенных предварительных исследований представленного подхода можно утверждать, что реальных систем, в отношении которых невозможно было бы сформировать условия перехвата управления, пока не выявлено, но основное отличие каждого конкретного состоит в требовании точности синхронизации и числе циклов повторения корректирующего кода.

### *Заключение*

Таким образом, в условиях интенсивного развития технологий информационных воздействий, развивающихся на основе концепций кибервойны, и для обеспечения кибербезопасности системы управления критических приложений (в частности, связи и управления военного и государственного назначения), представляющей одну из приоритетных целей для системы информационных воздействий, требуется решение ряда проблем и проблемных вопросов. К числу наиболее важных из них следует отнести:

– рассмотрение кибервойны как конфликтного взаимодействия систем следует проводить с учетом влияния на характеристики защищаемой системы параметров включенных в них подсистем защиты информации, которые могут существенно влиять на эффективность всей защищаемой системы. Оценку эффективности любой системы кибербезопасности проводить только в составе защищаемой системы с учетом особенностей ее функционирования;

– для обеспечения кибербезопасности компьютерных системы связи и управления критических технологий необходимо введение в ее состав активной составляющей, реализующей ответные (или упреждающие) информационные воздействия на АСУ оппонента (противника, злоумышленника);

– рассмотрение проблемы перехвата управления в отношении защищенности разрабатываемых компьютерных систем в составе критических технологий.

***Литература***

1. *Белицкий А.М., Степанец Ю.А., Толстых Н.Н.* Критерий перехвата управления инфокоммуникационных систем // Труды конференции «Кибернетика и высокие технологии XXI века», Воронеж, 13–14 мая, 2015.

2. *Власов Б.И., Степанец Ю.А., Толстых Н.Н.* Перехват управления инфокоммуникационных систем // Труды 21-й Международной научно- технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», 14–16 апреля 2015, Воронеж.

3. *Алферов А.Г., Мордовин А.И., Толстых И.О., Поздышева О.В., Толстых Н.Н.* Устойчивость инфокоммуникационных систем в условиях информационного конфликта // Журнал «Информация и безопасность». 2014. № 4.

4. *Толстых Н.Н., Челядинов Ю.В.* Вирусное воздействие на кластеры систем сотовой связи // Академическая наука – проблемы и достижения. Материалы IV Международной научно-практической конференции. North Charleston, USA. 2014. Т. 3. С. 160–165.

5. *Николаев В.И., Толстых Н.Н.* Оценка коэффициента конфликтности информационного потока в автоматизированных системах // Цифровая обработка сигналов. 2008. № 2. С. 14–19.

Статья поступила в редакцию 27 февраля 2018 года

УДК 621.396.662

# СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СИНТЕЗАТОРОВ ЧАСТОТ В КОНТЕКСТЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ БОРЬБЫ

© Авторы, 2018

**С.К. Романов**, к.т.н., в.н.с., e-mail: skromanov@rambler.ru
**Н.М. Тихомиров**, д.т.н., начальник НТУ, e-mail: tikhomir@sozvezdie.su
**В.Н. Тихомиров**, старший конструктор, e-mail: tikhomir@sozvezdie.su
АО «Концерн «Созвездие»

*Рассмотрены варианты применения способов «FastLock» и «Cycle slip reduction» для повышения быстродействия в синтезаторах частот с системой импульсной фазовой автоподстройки частоты. Предложен алгоритм управления токами зарядовой накачки частотно-фазового детектора и коммутации элементов активного фильтра нижних частот. Найдены аналитические выражения для определения времени переходных процессов при перестройке по частоте синтезаторов с применением ускоряющих способов в трех вариантах. Проведено сравнение результатов расчетов по этим выражениям с результатами моделирования переходных процессов в синтезаторе на основе системы автоподстройки пятого порядка с использованием среды Simulink системы MatLab.*

***Ключевые слова:*** *радиоэлектронная борьба, радиомониторинг, синтезатор частот, система импульсной фазовой автоподстройки частоты, частотно-фазовый детектор, зарядовая накачка, переходной процесс, способ ускорения, таймер.*

# METHODS FOR IMPROVING THE PERFORMANCE OF FREQUENCY SYNTHESIZERS IN TERMS OF ELECTRONIC WARFARE

© All rights reserved, 2018

**S.K. Romanov**, Ph.D. in Engineering Science, Lead Research Engineer, e-mail: skromanov@rambler.ru
**N.M. Tikhomirov**, D.Sc. in Engineering Science, Head of R&D Department, e-mail: tikhomir@sozvezdie.su
**V.N. Tikhomirov**, Lead Designer, e-mail: tikhomir@sozvezdie.su
JSC «Concern «Sozvezdie»

*The authors discuss applications of the «FastLock» and «Cycle slip reduction» methods intended to improve the performance of frequency synthesizers with an automatic pulse phase frequency control system. The authors offer an algorithm to control charging currents of the frequency-phase detector and to switch over elements of the LF active filter. The authors have determined analytical expressions for calculating the transient process time when tuning the frequency of synthesizers by means of speed-up methods. Three variants of method application are available. The authors have compared the calculation results obtained by means of the above-mentioned methods and synthesizer-based transient process simulations results based on a fifth-order automatic frequency control system, using the MatLab system's Simulink environment.*

***Keywords:*** *radioelectronic warfare, radio monitoring, frequency synthesizer, automatic pulse phase frequency control system, frequency-phase detector, charging, transient process, speed-up method, timer.*

В настоящее время к аппаратуре автоматизированного радиомониторинга (АРМ) предъявляются высокие требования, связанные с эффективным решением задач радиоэлектронной борьбы. Перечень задач радиоэлектронной борьбы, решаемых с помощью средств АРМ, включает выявление и анализ радиоизлучений с целью идентификации источников сигналов и помех, измерение и оценку параметров радиосигналов, измерение напряженности электромагнитного поля и определение положения источников сигналов и помех на местности. Многообразие современных типов сигналов, требования к широкой полосе обзора и высокой точности измерения их параметров, возможность управления процессами измерения и контроля с использованием компьютеров, повышенные требования к линейности, чувствительности, уровню фазовых шумов, скорости перестройки по частоте обусловливают необходимость создания новых радиоприемных устройств [1–3]. При разработке подобных устройств существенные затруднения вызывает разработка гетеродинного тракта, основой которого является син-

тезатор частот. Это обусловлено тем, что от качественных характеристик синтезатора зависят чувствительность, наличие пораженных каналов радиоприема, а также оперативность и достоверность получения информации, определяемые максимальной скоростью и точностью перестройки по частоте. Используемые в современных комплексах АРМ синтезаторы отличаются сложностью реализации: например, для обеспечения «мелкого» шага по частоте и необходимого уровня фазовых шумов используются сложные многокольцевые структуры импульсных систем фазовой автоподстройки частоты (ИФАПЧ), что сказывается на энергопотреблении, массогабаритных показателях и стоимости устройства. Для создания сравнительно простых малогабаритных синтезаторов используются цифровые вычислительные синтезаторы (ЦВС), которым, однако, присущи существенные недостатки, связанные с пока еще сравнительно невысокой частотой выходного сигнала и неприемлемым для реализации гетеродинов радиоприемников уровнем побочных спектральных составляющих (в лучших образцах – до минус 90 дБн). Кроме того, ЦВС обладают высоким энергопотреблением и требуют применения малошумящего источника сигнала тактовой частоты, значение которой как минимум в три раза превосходит максимальную синтезируемую частоту.

Использование в синтезаторах на основе системы ИФАПЧ делителей частоты с дробно-переменным коэффициентом деления (ДДПКД), управляемых дельта-сигма модулятором (ДСМ), позволило получить выходное колебание с высокой спектральной чистотой и предельно «мелким» шагом (до единиц и долей Гц) при высокой частоте сравнения $F_R$ в системе (до сотен МГц). Такой подход позволяет не только использовать гораздо более широкополосные фильтры нижних частот (ФНЧ) в цепи управления, но и существенно упростить техническую реализацию синтезаторов за счет использования серийных дешевых интегральных микросхем (ИМС) с малыми энергопотреблением и габаритными размерами. С появлением первых подобных ИМС появилась возможность достичь в таких синтезаторах тех же показателей по точности, быстродействию и спектральной чистоте, как и в использующихся до сих пор весьма сложных гибридных структурах, сочетавших в себе методы прямого, косвенного и цифрового синтеза. Однако применительно к синтезаторам косвенного синтеза для радиоприемников АРМ остается еще целый ряд неисследованных теоретических и практических вопросов, в частности вопросы оптимизации по быстродействию системы ИФАПЧ с ДДПКД, управляемым ДСМ. Однако в ИФАПЧ с широкими диапазонами перестройки (октава и более) в начале переходного процесса (ПП) возникает нелинейный режим скольжения (РС) [4–6]. Этот режим характерезуется тем, что фазовое рассогласование сигналов на входах частотно-фазового детектора с зарядовой накачкой (ЧФД/ЗН), используемого в ИФАПЧ, больше значения $2\pi$. Применение ДДПКД в системе ИФАПЧ приводит к увеличению длительности РС. В течение полного времени ПП продолжительность нежелательного явления становится недопустимо высокой.

Для сокращения времени этого нежелательного явления или его полной ликвидации, с целью достижения уменьшения полного времени ПП в синтезаторах на основе ИФАПЧ с ЧФД/ЗН и ДДПКД, управляемым ДСМ (далее – $СЧ^{ЗН}_{ДСМ}$), производителями ИМС синтезаторов предлагается ряд мер. Эти меры для ускорения ПП объединяются под названием «FastLock» – способ быстрого захвата и «Cycle slip reduction» (CSR) – способ устранения режима скольжения (УРС) [5, 6]. Эти меры эквивалентны линеаризации режима работы ИФАПЧ и связанных с коммутацией значений определенных параметров элементов схемы, находящихся внутри (делители частоты и ЧФД/ЗН) и снаружи (ФНЧ) ИМС:

1. Изменение значения тока ЗН по определенному закону во время РС, когда разность фаз выходных сигналов ДДПКД и ОГ достигает $2\pi$ (в ИМС $СЧ^{ЗН}_{ДСМ}$ ADF4155/56/57/58/59).

2. Увеличение значения коэффициента деления ДДПКД наряду с уменьшением величины частоты сравнения $F_R$ в ЧФД/ЗН и повышением тока ЗН на время ПП при смене частот (в ИМС $СЧ^{ЗН}_{ДСМ}$ LMX2486/87, LMX2491/92).

3. Ускорение ПП путем увеличения тока ЗН, поступающего на вход ФНЧ, одновременно с возможным уменьшением коэффициентов деления делителей частоты (как опорного сигнала, так и сигнала обратной связи) и постоянных времени ФНЧ [7] (в ИМС $СЧ^{ЗН}_{ДСМ}$ CMX979, ADF4193, MAX2870/71, MAX2880, LMX2571, STW81200).

В работах [7, 8] детально исследовалось ка-

чество ПП в $СЧ^{ЗН}_{ДСМ}$ с приведенными способами ускорения, но в случаях применения только одного из этих способов – УРС или «FastLock». Целью настоящей работы является нахождение времени ПП в $СЧ^{ЗН}_{ДСМ}$ с нелинейной ИФАПЧ пятого порядка при последовательном совместном использовании ускоряющих способов УРС и «FastLock», а также нахождение преимуществ от их реализации. Последовательное во времени использование способов УРС и «FastLock» связано с тем, что при каждом из них используется общий ограниченный ресурс $СЧ^{ЗН}_{ДСМ}$ – увеличенный ток ЗН.

На рис. 1 приведена структурная схема $СЧ^{ЗН}_{ДСМ}$ с возможностью применения способов УРС и «FastLock» для ускорения ПП.

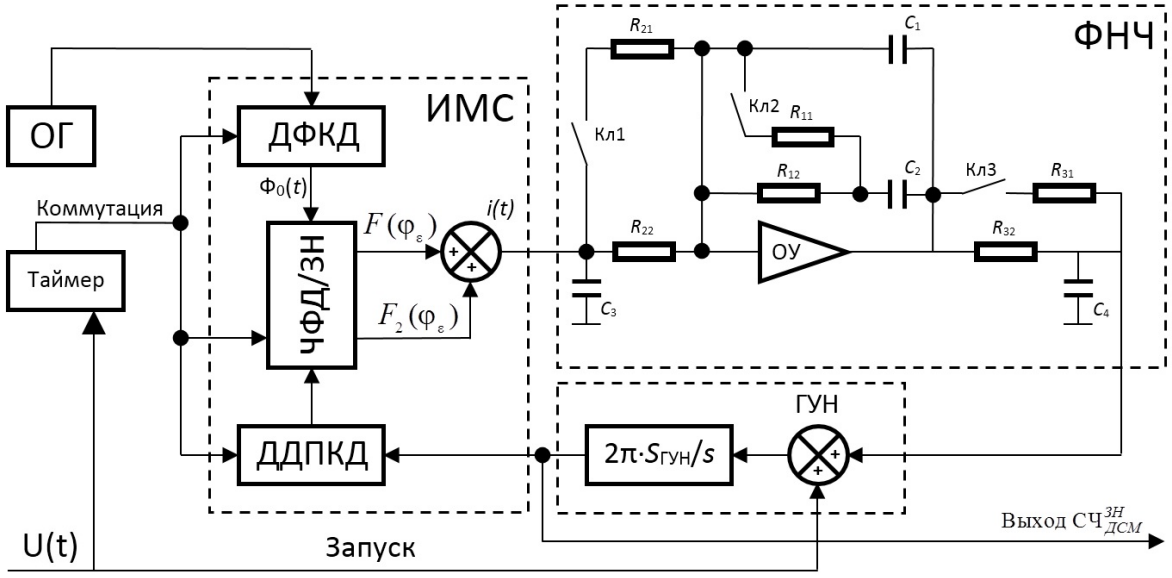



Рис. 1. Схема $СЧ^{ЗН}_{ДСМ}$ с ускоряющими способами УРС и «FastLock»

На схеме обозначено: ОГ – опорный генератор; ГУН – генератор, управляемый напряжением (сумматор и усилительно-интегрирующее звено $2\pi \cdot S_{ГУН}/s$); ДФКД – делитель частоты опорного сигнала до значения $F_R$; ОУ – операционный усилитель активного ФНЧ с $C_1, R_{12}, C_2, C_3, R_{22}, C_4, R_{32}$. К основным функциональным элементам $СЧ^{ЗН}_{ДСМ}$ добавлены дополнительные элементы: коммутируемые резисторы – $R_{11}, R_{21}, R_{31}$; ключи Кл1, Кл2, Кл3; сумматор сигналов $F(\varphi_\varepsilon)$ и $F_2(\varphi_\varepsilon)$ с выхода ЧФД/ЗН; таймер – устройство, запускаемое от переднего фронта сигнала перестройки частоты $U(t)$, управляющее ЗН, делителями ДФКД и ДДПКД, а также задающее интервалы времени ускорения ПП. Переключение ключей Кл1, Кл2, Кл3 осуществляется синхронно с увеличением тока ЗН сигналом коммутации с таймера (на рис. 1 не показано).

Напряжение $U(t)$ в начале ПП представляет собой единичную функцию с уровнем амплитуды $U_M$, определяющим диапазон перестройки ГУН выражением $\Delta f_{ГУН} = f_{ГУН_В} - f_{ГУН_Н} = S_{ГУН} \cdot U_M$, в котором $f_{ГУН_В}$ – верхняя частота перестройки ГУН, а $f_{ГУН_Н}$ – нижняя частота. Соотношения между коммутируемыми резисторами $R_{11} = R_{12}/(dw-1)$, $R_{21} = R_{22}/(dw-1)$, $R_{31} = R_{32}/(dw-1)$, где $dw = f_{c1}/f_{c2}$, $f_{c1}$ – частота среза системы после замыкания ключей Кл1, Кл2, Кл3, $f_{c2}$ – частота среза системы после размыкания этих ключей.

На рис. 1 также приняты следующие обозначения: $\Phi_O(t)$, $\Phi_N(t)$, $\Phi_{ГУН}(t)$ – фазы сигналов с выхода ДФКД, ДДПКД и ГУН соответственно; $N$ – значение целочисленной части дробного коэффициента деления ДДПКД; $i(t)$ – ток ЗН, увеличенный, как правило, при ускорении ПП; $F(\varphi_\varepsilon) = F(\Phi_O(t) - \Phi_N(t))$ – нелинейная функция, характеризующая функционирование ЧФД/ЗН, представлена на рис. 2, где $i_M$ – максимальное значение тока ЗН.

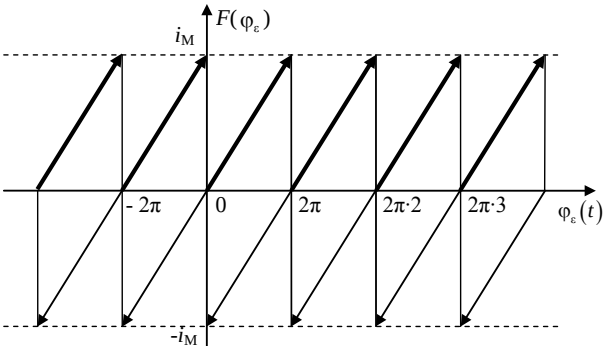



Рис. 2. Фазовая характеристика ЧФД/ЗН

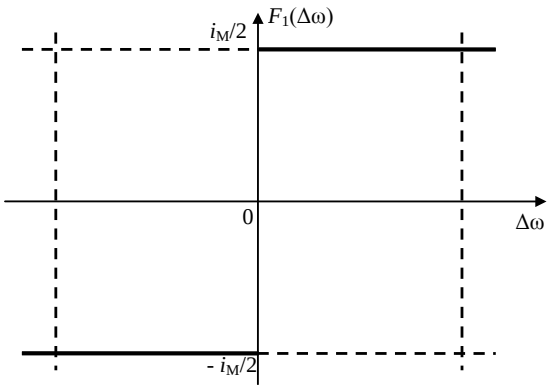



Рис. 3. Релейная функция разности частот входных сигналов ЧФД/ ЗН

Приведенная на рис. 2 функция $F(\varphi_\varepsilon)$ является неоднозначной функцией. Если $\varphi_\varepsilon(t)$ – постоянно нарастающая величина ($\dot{\varphi}_\varepsilon(t) > 0$ – жирная линия), то $F(\varphi_\varepsilon) > 0$. Если функция $\dot{\varphi}_\varepsilon(t)$ меняет знак, то и $F(\varphi_\varepsilon)$ может изменить знак и перейти из положительной области значений в отрицательную (тонкие линии). ЧФД/ЗН помимо такой фазовой характеристики обладает свойством различения по частоте, которое показано на рис. 3. Здесь $\Delta\omega$ – разность частот между выходными сигналами ДФКД и ДДПКД, а $F_1(\Delta\omega)$ – релейная функция с размахом от $-i_M/2$ до $i_M/2$

Для иллюстрации изложенных ниже выкладок на рис. 4 приведены графики ПП в $\text{СЧ}^{\text{ЗН}}_{\text{ДСМ}}$, схема которого показана на рис. 1, для варианта изменения значения тока ЗН по определенному закону во время протекания РС с последующим использованием способа «Fast-Lock». Система ИФАПЧ $\text{СЧ}^{\text{ЗН}}_{\text{ДСМ}}$ имеет следующие параметры: $S_{\text{ГУН}} = 15$ МГц/В, $\Delta f_{\text{ГУН}} = 450$ МГц, $i_M = 0{,}3125$ мА. Частота среза системы $f_{C2} = 9944$ Гц, частота опорного сигнала $1/t_0 = 10$ МГц, $N = 221$, $dw = 4$. Система синтезирована по показателю колебательности $M = 1{,}3$ как для $f_{C2} = 9944$ Гц, так и для $f_{C1} = 4 \times 9944$ Гц [4]. Здесь $t_{yCSR}$ – время окончания ПП по частоте с точностью $\Delta f_\varepsilon = 1$ Гц.

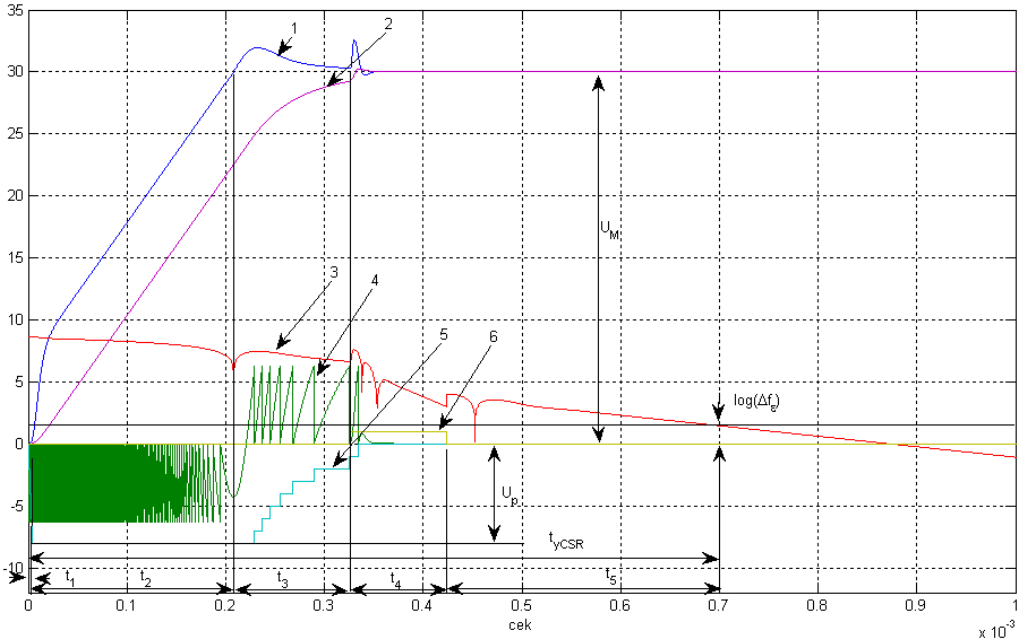



Рис. 4. Переходные процессы при последовательном применении УРС и «FastLock»

На рис. 4: кривая 1 – $e_{\text{У}}(t)$ – напряжение на выходе ФНЧ (на конденсаторе $C_4$); кривая 2 – напряжение на конденсаторе $C_2$; кривая 3 – $\log|(U(t)-e_{\text{У}}(t))\cdot S_{\text{ГУН}}$ – отклонение частоты ГУН от номинала в логарифмическом масштабе; кривая 4 – $U_{\text{ЧФД}}(t)=2\pi\cdot F(\varphi_\varepsilon(t))/i_{\text{М}}$ – сигнал, пропорциональный $F(\varphi_\varepsilon(t))$; кривая 5 – $F_2(\varphi_\varepsilon(t))/i_{\text{М}}$ – сигнал, пропорциональный $F_2(\varphi_\varepsilon(t))$; кривая 6 – сигнал коммутации ключей Кл1, Кл2, Кл3.

Из графиков на рис. 4 видно, что все время ПП можно разделить на пять интервалов: первый – от 0 до $t_1$, второй – $t_2$ – нелинейный режим автоподстройки, третий – $t_3$, четвертый – $t_4$, пятый – от $t_5$ до $t_{yCSR}$; во время первого, третьего, четвертого и пятого интервалов система является линейной. В момент времени $t_1+t_2+t_3+t_4$ в составе $U(t)$ создан дополнительный скачок напряжения $U_{\Pi}1(t-t_1-t_2-t_3-t_4)$, определяющий помеху коммутации размахом $\Delta f_{\Pi}=10$ кГц.

На первом интервале $F_2(\varphi_\varepsilon(t))/i_{\text{М}}$ достигает своего минимального значения $U_p$ (в рассматриваемом случае $U_p=8$), функция $F_2(\varphi_\varepsilon(t))/i_{\text{М}}$ уменьшает (увеличивает) свое значение на единицу в моменты времени $t_n$, когда $F(\varphi_\varepsilon(t))$ достигает $-2\pi\cdot i_{\text{М}}$ или $+2\pi\cdot i_{\text{М}}$, т.е. на первом интервале времени ток $i(t)$ на выходе ЗН можно записать в виде

$$i(t)=F(\varphi_\varepsilon(t))+F_2(\varphi_\varepsilon(t))=F(\varphi_\varepsilon(t))\pm i_{\text{м}}\sum_{n=1}^{U_p}1(t-t_n),$$

где $1(t)$ – функция Хевисайда.

Во время первого, второго и третьего интервалов времени система находится в режиме УРС. На четвертом интервале система находится в состоянии реализации способа «FastLock». В итоге на первом интервале времени обеспечивается непрерывный характер изменения $i(t)$ в увеличенном диапазоне значений (до $i_{\text{м}}\cdot U_p$), а ИФАПЧ находится в линейном режиме, несмотря на пилообразный вид характеристики $F(\varphi_\varepsilon(t))$. На четвертом интервале времени $i(t)$ увеличивается до значения $i_{\text{м}}\cdot dw^2$ при неизменной величине частоты сравнения $F_R$ в ЧФД/ЗН.

Найдем временные параметры $t_1,t_2,t_3,t_4,t_5$. Рассмотрим более подробно нахождение времени $t_1$ и состояний ИФАПЧ в этот момент. Будем считать, что все элементы системы, показанные на рис. 1, известны. Для решения поставленной задачи воспользуемся методом пространства состояний. В качестве состояний примем напряжения $U_{C1}(t)\ldots U_{C4}(t)$ на конденсаторах $C_1\ldots C_4$ соответственно и фазу $\Phi_{\text{ГУН}}(\text{t})$, а в качестве выходного сигнала примем фазу $\Phi_{\text{ГУН}}(\text{t})$. Тогда в соответствии с рис. 1 линейное матричное дифференциальное уравнение, описывающее систему, имеет вид

$$\left.\begin{aligned}\dot{\mathbf{X}}&=\mathbf{AX}+\mathbf{BU},\\ \mathbf{Y}&=\mathbf{CX}+\mathbf{DU},\end{aligned}\right\}\qquad(1)$$

где $\mathbf{X}=\left[U_{C1}(t);U_{C2}(t);U_{C3}(t);U_{C4}(t);\Phi_{\text{ГУН}}(t)\right]$ – вектор состояния системы;

$$\mathbf{A}=\begin{bmatrix}-dw/R_{12}C_1 & dw/R_{12}C_1 & -dw/R_{22}C_1 & 0 & 0\\ dw/T_1 & -dw/T_1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & -dw/T_3 & 0 & i_{\text{м}}dw^2/(2\pi\cdot N\cdot C_3)\\ dw/T_4 & 0 & 0 & -dw/T_4 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 2\pi\cdot S_{\text{ГУН}} & 0\end{bmatrix}$$

– матрица состояний системы, в которой, так как ключи Кл1, Кл2, Кл3 разомкнуты, $dw=1$, $T_1=R_{12}C_2, T_2=R_{12}C_1C_2/(C_1+C_2), T_3=R_{22}C_3$, $T_4=R_{32}C_4$; $\mathbf{B}=[0;0;0;0;2\pi\cdot S_{\text{ГУН}}]$ – вектор управления, $\mathbf{U}=U(t)=U_M\cdot 1(t)$, $\mathbf{Y}=\Phi_{\text{ГУН}}(t)$, $\mathbf{C}=[0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 1]$ – матрица-строка, $\mathbf{D}=0$.

Отметим, что векторы $\mathbf{X}, \mathbf{B}$ и матрица-строка $\mathbf{C}$ записаны в соответствии с правилами оформления матриц в системе математических расчетов MatLab.

При решении дифференциального уравнения (1) воспользуемся преобразованием eig из MatLab [6] для формирования модальной канонической SS-модели:

$$[\mathbf{P}, \mathbf{A}_Д] = eig(\mathbf{A}),$$

где $\mathbf{A}_Д$ – диагональная матрица, содержащая на главной диагонали собственные числа матрицы $\mathbf{A}$, а $\mathbf{P}$ – матрица правых собственных векторов $\mathbf{A}$. Используем матрицу $\mathbf{P}$ для преобразования вектора состояний $\mathbf{X}$ к вектору $\mathbf{X}_C$. Новый вектор состояния $\mathbf{X}_C$ связан с исходным вектором соотношением $\mathbf{X}_C = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{X}$, и система дифференциальных уравнений (1) преобразуется к виду

$$\left.\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}_C &= \mathbf{A}_Д \mathbf{X}_C + \mathbf{B}_Д U, \\ \mathbf{Y} &= \mathbf{C}_Д \mathbf{X}_C + \mathbf{D}U, \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

где $\mathbf{P}^{-1}$ – обратная матрица к $\mathbf{P}$, $\mathbf{A}_Д = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{P}$, $\mathbf{B}_Д = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{B}$, $\mathbf{C}_Д = \mathbf{C}\mathbf{P}$.

Известно из [7], что решение системы уравнений (2) для $U(t) = const = U$ можно записать как

$$\mathbf{X}_C(t) = \mathbf{\Phi}(t)\mathbf{X}_C(0) + \mathbf{A}_Д^{-1}[\mathbf{\Phi}(t) - \mathbf{E}]\mathbf{B}_Д U, \quad (3)$$

где $\mathbf{\Phi}(t) = diag[\exp(\alpha_1 t), \exp(\alpha_2 t), \exp(\alpha_3 t), \exp(\alpha_4 t), \exp(\alpha_5 t)]$ – переходная диагональная матрица; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ – собственные значения матрицы $\mathbf{A}$; $\mathbf{X}_C(0)$ – значение вектора состояния при $t = 0$; $\mathbf{A}_Д^{-1} = diag[1/\alpha_1, 1/\alpha_2, 1/\alpha_3, 1/\alpha_4, 1/\alpha_5]$ – диагональная матрица; $\mathbf{A}_Д^{-1}$ – обратная матрица $\mathbf{A}_Д$; $\mathbf{E}$ – единичная диагональная матрица; $U = U_M$.

Полагая в (2), (3) $\mathbf{X}_C(0) = 0$ и $\mathbf{Y}(t_1) = \varphi_{ГУН}(t_1) = 2\pi \cdot N \cdot U_p$, найдем выражение для определения $t_1$:

$$\mathbf{C}_Д[\mathbf{A}_Д^{-1}[\mathbf{\Phi}(t_1) - \mathbf{E}]\mathbf{B}_Д U_M] = 2\pi \cdot N \cdot U_p. \quad (4)$$

Уравнение (4) для определения $t_1$ является трансцендентным и решается с помощью различного вида итерационных процедур. Ситуация упрощается для случая, когда

$$1/|\mathrm{Re}(\alpha_1)|, 1/|\mathrm{Re}(\alpha_2)|, 1/|\mathrm{Re}(\alpha_3)|, 1/|\mathrm{Re}(\alpha_4)|, 1/|\mathrm{Re}(\alpha_5)| \gg t_1;$$

тогда из (4) получим

$$t_1 = 2\pi \cdot N \cdot U_p / (\mathbf{C}_Д \mathbf{B}_Д U_M). \qquad (5)$$

Значение $t_1$, полученное из (5), может быть использовано также в качестве первого приближения при решении (4). Зная $t_1$, найдем состояния ИФАПЧ при $t_1$:

$$\mathbf{X}(t_1) = \mathbf{P}[\mathbf{A}_Д^{-1}[\mathbf{\Phi}(t_1) - \mathbf{E}]\mathbf{B}_Д U_M]. \qquad (6)$$

Перейдем к определению интервала времени $t_2$, когда напряжение на выходе ФНЧ $e_У(t) = U_{C4}(t)$ достигает своего стационарного значения $U_M = \Delta f_{ГУН} / S_{ГУН}$. Так как в этом случае система ИФАПЧ находится в нелинейном режиме и анализ в общем случае затруднителен, то рассмотрим аналогично [4] упрощенный подход, заключающийся в следующем. Считаем, что на интервале времени $t_2$ система разомкнута, а на вход ФНЧ подается постоянный ток уровнем $\pm i_M \cdot (U_p + 0{,}5)$ (см. рис. 3 и рис. 4), знак этого тока определяется из условий работы ЧФД/ЗН.

Для определения интервала $t_2$ воспользуемся показанным выше матричным аппаратом решения линейных дифференциальных уравнений. Будем записывать матрицы и элементы матриц, используемые при решении дифференциальных уравнений на этом интервале, с нижним индексом 2. В этом случае в (1) матрица $\mathbf{A}_2$

получается из представленной в (1) матрицы **A** вычеркиванием пятого столбца и пятой строки:

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} -1/R_1C_1 & 1/R_1C_1 & -1/R_1C_1 & 0 \\ 1/T_1 & -1/T_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/T_3 & 0 \\ 1/T_4 & 0 & 0 & -1/T_4 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_2 = [0;0;1/C_3;0],\ \ \mathbf{U}_2 = \pm i_{\text{М}} \cdot (U_p + 0.5) \cdot 1(t),$$

$$\mathbf{Y}_2 = e_{\text{У}}(t) = U_{C4}(t),\ \ \mathbf{C}_2 = [0\quad 0\quad 0\quad 1],\ \ \mathbf{D}_2 = 0.$$

Решение нового дифференциального уравнения в виде (3) невозможно, потому что матрица $\mathbf{A}_2$ является особенной (одно из собственных значений $\mathbf{A}_2$ равно нулю). Для преодоления этого затруднения представим, что одно из собственных значений $\mathbf{A}_2$ (для определенности $\lim \alpha_{12} \to 0$) стремится к нулю, тогда

$$\mathbf{\Phi}_{12}(t) = \mathbf{A}_{\text{Д2}}^{-1}[\mathbf{\Phi}_2(t) - \mathbf{E}] = diag[(\exp(\alpha_{12}t) - 1)/\alpha_{12}, (\exp(\alpha_{22}t) - 1)/\alpha_{22}, (\exp(\alpha_{32}t) - 1)/\alpha_{32},$$

$$(\exp(\alpha_{42}t) - 1)/\alpha_{42}, ] = diag[t, (\exp(\alpha_{22}t) - 1)/\alpha_{22}, (\exp(\alpha_{32}t) - 1)/\alpha_{32}, (\exp(\alpha_{42}t) - 1)/\alpha_{42}],$$

где $\mathbf{\Phi}_2(t) = diag[\exp(\alpha_{12}t), \exp(\alpha_{22}t), \exp(\alpha_{32}t), \exp(\alpha_{42}t)]$, $\alpha_{12}, \alpha_{22}, \alpha_{32}, \alpha_{42}$ – собственные значения матрицы $\mathbf{A}_2$.

С учетом $\mathbf{\Phi}_{12}(t)$, (2) и (3) найдем выражение для определения $t_2$:

$$\mathbf{C}_{\text{Д2}}[\mathbf{\Phi}_2(t_2)\mathbf{X}_{\mathbf{c}2}(\mathbf{0}) + \mathbf{\Phi}_{12}(t_2)\mathbf{B}_{\text{Д2}} i_{\text{М}}(U_p + 0{,}5)] = U_{\text{М}}, \qquad (7)$$

где $\mathbf{C}_{\text{Д2}} = \mathbf{C}_2\mathbf{P}_2, \mathbf{B}_{\text{Д2}} = \mathbf{P}_2^{-1}\mathbf{B}_2, \mathbf{X}_{\mathbf{c}2}(\mathbf{0}) = \mathbf{P}_2^{-1}\mathbf{X}_2(\mathbf{0})$, $\mathbf{P}_2$ – матрица правых собственных векторов $\mathbf{A}_2$, $\mathbf{X}_2(\mathbf{0})$ определяется с помощью (6), точнее – это вектор $\mathbf{X}(t_1)$ с отсеченным значением $\Phi_{\text{ГУН}}(t)$. Аналогично (4) уравнение (7) для определения $t_2$ является трансцендентным. Уравнение несколько упрощается для случая, когда

$$|\text{Re}(\alpha_{22})t_2|, |\text{Re}(\alpha_{32})t_2|, |\text{Re}(\alpha_{42})t_2| \gg 1.$$

Тогда из (7) получим

$$t_2 = \frac{U_{\text{М}} - C_{1\text{Д2}} \cdot X_{1\text{c}2}(0) + i_{\text{М}}(U_p + 0.5) \cdot \sum_{i=2}^{4} C_{i\text{Д2}} \cdot B_{i\text{Д2}}/\alpha_{i2}}{i_{\text{М}}(U_p + 0.5) \cdot C_{1\text{Д2}} \cdot B_{1\text{Д2}}}, \qquad (8)$$

где $C_{i\text{Д2}} \cdot B_{i\text{Д2}}, X_{i\text{c}2}(0) - i$ – е элементы матриц $\mathbf{C}_{\text{Д2}}, \mathbf{B}_{\text{Д2}}, \mathbf{X}_{\mathbf{c}2}(\mathbf{0})$. Зная $t_2$, найдем состояния ИФАПЧ при $t_2$:

$$\mathbf{X}_2(\mathbf{t_2}) = \mathbf{P}_2[\mathbf{\Phi}_2(t_2)\mathbf{X}_{\mathbf{c}2}(\mathbf{0}) + \mathbf{\Phi}_{12}(t_2)\mathbf{B}_{\text{Д2}} \cdot i_M(U_p + 0{,}5)], \qquad (9)$$

$$\Phi_{\text{ГУН}}(t_2) = 2\pi \cdot S_{\text{ГУН}} \cdot U_M \cdot t_2 + 2\pi \cdot N \cdot U_p + 2\pi \cdot S_{\text{ГУН}} \cdot \int_0^{t_2} U_{C4}(t)dt =$$

$$= 2\pi \cdot S_{\text{ГУН}} \cdot U_M \cdot t_2 + 2\pi \cdot N \cdot U_p + 2\pi \cdot S_{\text{ГУН}} \cdot \mathbf{C}_{\text{Д2}}[\mathbf{\Phi_{12}(t_2)} \times \mathbf{X_{c2}(0)} + \mathbf{+\Phi_{22}(t_2)B_{Д2}} \cdot i_M \cdot (U_p + 0{,}5)],$$

где

$$\mathbf{\Phi}_{22}(t) = diag[t^2/2, (\exp(\alpha_{22}t) - 1)/\alpha^2{}_{22} - t/\alpha_{22}, (\exp(\alpha_{32}t) - 1)/\alpha^2{}_{32} - t/\alpha_{22}, (\exp(\alpha_{42}t) - 1)/\alpha^2{}_{42} - t/\alpha_{42}].$$

Следует отметить, что в связи с периодичностью фазовой характеристики ЧФД/ЗН $F(\varphi_\varepsilon)$ на рис. 2 и характером переходных процессов для случая $t > t_1 + t_2$ на рис. 4 начальное состояние можно приближенно определить как $\Phi_{\text{ГУН}}(0) = 2\pi N \cdot \{rem[\Phi_{\text{ГУН}}(t_2), 2\pi N] \pm U_p\}$, где $rem[y, x]$ – остаток от деления $y$ на $x$, знак «+» или «–» определяется знаком $\Delta f_{\text{ГУН}}$. Эти состояния ИФАПЧ будем использовать в качестве начальных значений при решении дифференциальных уравнений (1) на интервале времени от $t_1 + t_2$ до $t_1 + t_2 + t_3$.

Найдем интервал времени $t_3$, при котором $\Phi_{\text{ГУН}}(t_3) = 2\pi N$ и система переводятся таймером от способа УРС к способу «FastLock» (см. рис. 4). Для решения этой задачи воспользуемся также матричным аппаратом решения линейных дифференциальных уравнений. Используемые матрицы совпадают с матрицами, приведенными в (1). Решение (2) с учетом (3) для этого случая запишем в виде

$$\mathbf{Y} = \mathbf{C}_{\text{Д}}\{\mathbf{\Phi}(t)\mathbf{X}_{\text{C}}(0) + \mathbf{A}_{\text{Д}}^{-1}[\mathbf{\Phi}(t) - \mathbf{E}]\mathbf{B}_{\text{Д}}U\} =$$

$$= \mathbf{C}_{\text{Д}}[\mathbf{\Phi}(t)\mathbf{X}_{\text{C}}(0) + \mathbf{A}_{\text{Д}}^{-1}\mathbf{\Phi}(t)\mathbf{B}_{\text{Д}}U] -$$

$$-\mathbf{C}_{\text{Д}}\mathbf{A}_{\text{Д}}^{-1}\mathbf{B}_{\text{Д}}U, \qquad (10)$$

где $\mathbf{X}_{\text{C}}(0) = \mathbf{P}^{-1} * [\mathbf{P}_2 * \mathbf{X}_2(t_2); \Phi_{ГУН}(0)]$ – вектор начальных состояний ИФАПЧ для интервала $t_2$. Так как система является устойчивой в «малом», т.е. $\underset{t\to\infty}{\mathbf{Y}} = 0$, то из (10) следует $-\mathbf{C}_{\text{Д}}\mathbf{A}_{\text{Д}}^{-1}\mathbf{B}_{\text{Д}}U = 0$. Тогда (10) представим как $\mathbf{Y} = \mathbf{C}_{\text{Д}}\mathbf{\Phi}(t)[\mathbf{X}_{\text{C}}(0) + \mathbf{A}_{\text{Д}}^{-1}\mathbf{B}_{\text{Д}}U]$. Второй член в квадратных скобках этого выражения запишем в виде $\mathbf{A}_{\text{Д}}^{-1}\mathbf{B}_{\text{Д}}U = \mathbf{P^{-1}} \times \mathbf{P}\mathbf{A}_{\text{Д}}^{-1}\mathbf{B}_{\text{Д}}U = \mathbf{P^{-1}} \cdot \mathbf{U_{cT}} \cdot U$, где $\mathbf{P}\mathbf{A}_{\text{Д}}^{-1}\mathbf{B}_{\text{Д}} = \mathbf{U_{CT}}$, $\mathbf{U_{CT}} = [1;1;0;1;0]$ – вектор, определяющий стационарное значение состояний системы ИФАПЧ, $\mathbf{X_{CT}} = \lim\limits_{t\to\infty}[U_{C1}(t); U_{C2}(t); U_{C3}(t); U_{C4}(t); \Phi_{\text{ГУН}}(t)] = \mathbf{U_{CT}} \cdot U_M$, соотношение $\mathbf{P}\mathbf{A}_{\text{Д}}^{-1}\mathbf{B}_{\text{Д}} = \mathbf{U_{cT}}$ получено численно. С учетом этих соотношений (10) упрощается:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{C}_{\text{Д}}\mathbf{\Phi}(t)\mathbf{P^{-1}}[\mathbf{X}(0) + \mathbf{U_{CT}} \cdot U_M], \qquad (11)$$

где $\mathbf{X}(0) = \mathbf{P}\mathbf{X}_C(0)$, а $\mathbf{X}(0) + \mathbf{U_{CT}} \cdot U_M$ – отклонение вектора состояния ИФАПЧ от стационарного значения.

Используя (11), найдем $t_3$ из соотношения

$$2\pi N = |\mathbf{C}_{\text{Д}}\mathbf{\Phi}(t_3)\mathbf{P^{-1}}[\mathbf{X}(0) + \mathbf{U_{CT}} \cdot U_M]|. \quad (12)$$

Уравнение (12) для определения $t_3$ аналогично предыдущим случаям является трансцендентным и сводится к алгебраическому уравнению, если в $\mathbf{\Phi}(t_3)$ учитывать только члены, зависящие от максимального действительного собственного значения $\alpha_i$ или максимального значения действительной части $\text{Re}(\alpha_i)$ в случае комплексного собственного значения [7]. Так, из (12) для $\alpha_M$ – действительного максимального собственного значения $\mathbf{A}$:

$$2\pi N = C_{\text{ДМ}} X_{\text{M}}(0) \cdot \exp(\alpha_{\text{M}} t_3), \qquad (13а)$$

где $C_{\text{ДМ}}, X_{\text{M}}(0)$ – элемент строки $\mathbf{C}_Д$ и элемент вектора $\mathbf{P^{-1}[X(0) + U_{CT} \cdot U_M]}$, соответствующие $\alpha_M$. Для комплексного собственного значения $\mathbf{A}$, имеющего максимальную действительную часть $\text{Re}(\alpha_M)$, запишем

$$2\pi N = 2\left|C_{\text{ДМ}} X_{\text{M}}(0)\right| \cdot \exp[\text{Re}(\alpha_{\text{M}}) t_3]. \quad (13б)$$

Из (13а) и (13б) найдём время ПП $t_3$ для действительного значения $\alpha_M$:

$$t_3 = \ln \frac{2\pi N}{C_{\text{ДМ}} X_{\text{M}}(0)} \cdot \frac{1}{\alpha_{\text{M}}}, \qquad (14а)$$

для комплексного значения $\alpha_M$

$$t_3 = \ln \frac{2\pi N}{2\left|C_{\text{ДМ}} X_{\text{M}}(0)\right|} \cdot \frac{1}{\text{Re}(\alpha_{\text{M}})}. \qquad (14б)$$

Зная $t_3$, найдем состояния вектора отклонения ИФАПЧ от стационарного значения при условии $t = t_3$: $\mathbf{X}_C(t_3) = \mathbf{\Phi}(t_3)\mathbf{P^{-1}}[\mathbf{X}(0) + \mathbf{U_{CT}} \cdot U_M]$.

Найдем интервал времени $t_4 + t_5 = t_{yCSR} - (t_1 + t_2 + t_3)$, при котором

$\Delta f_{\text{ГУН}}(t_{yCSR}) = |(U(t_{yCSR}) - e_{\text{У}}(t_{yCSR})) \cdot S_{\text{ГУН}}| \le \Delta f_{\varepsilon}$, т.е. отклонение частоты ГУН меньше (или равно) некоторого значения $\Delta f_{\varepsilon}$ (см. рис. 4). Для решения этой задачи воспользуемся также матричным аппаратом решения линейных дифференциальных уравнений. На интервале времени $t_4$ параметр $dw \neq 1$, поэтому дополнительно используемые матрицы и элементы матриц при решении дифференциальных уравнений на этом интервале снабжены нижним индексом 4. На интервале времени $t_5$, так как $\mathbf{Y} = \Delta f_{\text{ГУН}}(t)$, используется $\mathbf{C}_5 = [0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; S_{\text{ГУН}} \;\; 0]$, $\mathbf{D}_5 = S_{\text{ГУН}}$, а в (2) $\mathbf{Y}=\mathbf{C}_{\text{Д}5}\mathbf{X}_{\text{C}}+\mathbf{D}_5 U$, где $\mathbf{C}_{\text{Д}5} = \mathbf{C}_5\mathbf{P}$.

Аналогично (3) решение для вектора отклонения ИФАПЧ от стационарного значения на интервале времени $t_4 + t_5$ и отклонения частоты ГУН можно записать в виде

$$\mathbf{X}_{\text{C}}(t_5) = \mathbf{\Phi}(t_5)\mathbf{P}^{-1}\mathbf{P}_4\mathbf{\Phi}_4(t_4)\mathbf{P}_4^{-1}\mathbf{P}\mathbf{X}_{\text{C}}(t_3) + \\ + \mathbf{A}_{\text{Д}}^{-1}[\mathbf{\Phi}(t_5) - \mathbf{E}]\mathbf{B}_{\text{Д}}U_{\text{П}}, \qquad (15)$$

$$\left|\mathbf{Y}(\text{t}_5)\right| = \left|\mathbf{C}_{\text{Д}5}\mathbf{X}_{\text{C}}(\text{t}_5) + \mathbf{D}_5 U_{\text{П}}\right| = \Delta f_{\varepsilon}.$$

Используя соотношения $\mathbf{P}\mathbf{A}_{\text{Д}}^{-1}\mathbf{B}_{\text{Д}} = \mathbf{U}_{C\text{T}}$ и $-\mathbf{C}_{\text{Д}5}\mathbf{A}_{\text{Д}}^{-1}\mathbf{B}_{\text{Д}}U_{\text{П}} + \mathbf{D}_5 U_{\text{П}} = 0$, выражение (15) можно представить в виде

$$\Delta f_{\varepsilon} = \left|\mathbf{C}_{\text{Д}5}\mathbf{\Phi}(t_5)\mathbf{P}^{-1}[\mathbf{X}(t_4) + \mathbf{U}_{\mathbf{CT}} \cdot U_{\Pi}]\right|, \quad (16)$$

где $\mathbf{X}(t_4) = \mathbf{P}_4\mathbf{\Phi}_4(t_4)\mathbf{P}_4^{-1}\mathbf{P}\mathbf{X}_{\text{C}}(t_3)$, $\mathbf{X}(t_4) + \mathbf{U}_{\mathbf{CT}} \cdot U_{\Pi}$ – отклонение вектора состояния ИФАПЧ от стационарного значения с учетом уровня помехи коммутации $U_{\text{П}}$. Уравнение (16) для определения $t_5$ аналогично предыдущим случаям является трансцендентным и сводится к алгебраическому уравнению, если в $\mathbf{\Phi}(t_5)$ учитывать только члены, зависящие от максимального действительного собственного значения $\alpha_i$ или максимального значения действительной части $\text{Re}(\alpha_i)$ в случае комплексного собственного значения.

Из (16) найдем время ПП $t_5$ для действительного значения $\alpha_M$:

$$t_5 = \ln\frac{\Delta f_{\varepsilon}}{C_{\text{Д5M}}X_{\text{CM}}(t_4)} \cdot \frac{1}{\alpha_{\text{M}}}, \qquad (17\text{а})$$

где $\mathbf{X}_{\mathbf{C}}(t_4) = \mathbf{P}^{-1}[\mathbf{X}(t_4) + \mathbf{U}_{\mathbf{CT}} \cdot U_{\Pi}]$, $C_{\text{Д5M}}$, $X_{\text{CM}}(t_4)$ – элемент строки $\mathbf{C}_{\text{Д}5}$ и элемент вектора $\mathbf{X}_C(t_4)$, соответствующие $\alpha_M$; для комплексного значения $\alpha_M$

$$t_5 = \ln\frac{\Delta f_{\varepsilon}}{2\left|C_{\text{Д5M}}X_{\text{CM}}(t_4)\right|} \cdot \frac{1}{\text{Re}(\alpha_{\text{M}})}. \qquad (17\text{б})$$

Анализ (17) показывает, что при заданных параметрах системы и уровне помехи $U_{\text{п}}$ существует оптимальное значение $t_{4o}$, для которого минимизируется $t_4 + t_5$ и, соответственно, $t_{yCSR}$. Это значение $t_{4o}$ при действительных $\alpha_M, \alpha_{4M}$ можно найти как

$$t_{4o} = \ln\frac{\alpha_M U_{\Pi}}{(\alpha_{4M} - \alpha_M)\mathbf{P}^{-1}\mathbf{P}_4(\alpha_M, \alpha_{4M})\mathbf{P}_4^{-1}\mathbf{P}\mathbf{X}_C(\alpha_{4M})/\mathbf{P}^{-1}\mathbf{U}_{\mathbf{CT}}(\alpha_M)} \cdot \frac{1}{\alpha_{4M}};$$

для комплексных $\alpha_M, \alpha_{4M}$

$$t_{4o} = \ln\frac{\text{Re}(\alpha_M)U_{\Pi}}{\text{Re}(\alpha_{4M} - \alpha_M)[\left|\mathbf{P}^{-1}\mathbf{P}_4(\alpha_M, \alpha_{4M})\right| + \left|\mathbf{P}^{-1}\mathbf{P}_4(\alpha_M, \alpha_{4M} + 1)\right|]\left|\mathbf{P}_4^{-1}\mathbf{P}\mathbf{X}_C(\alpha_{4M})/\mathbf{P}^{-1}\mathbf{U}_{\mathbf{CT}}(\alpha_M)\right|} \times \frac{1}{\text{Re}(\alpha_{4M})},$$

где $\alpha_{4M}$ – максимальное действительное собственное значение матрицы $\mathbf{A}$ при $dw > 1$ или $\text{Re}(\alpha_{4M})$ – действительная часть комплексного собственного значения $\alpha_{4M}$ $\mathbf{A}$ при $dw > 1$, имеющего максимальную действительную часть; $\mathbf{P}^{-1}\mathbf{U}_{\mathbf{CT}}(\alpha_M)$ – элемент вектора $\mathbf{P}^{-1}\mathbf{U}_{\mathbf{CT}}$, соответствующий номеру $\alpha_M$; $\mathbf{P}^{-1}\mathbf{P}_4(\alpha_M, \alpha_{4M})$ – элемент матрицы $\mathbf{P}^{-1}\mathbf{P}_4$, соответствующий номерам $\alpha_M$, $\alpha_{4M}$;

$\mathbf{P}_4^{-1}\mathbf{P}\mathbf{X}_C(\alpha_{4M})$ – элемент вектора $\mathbf{P}_4^{-1}\mathbf{P}\mathbf{X}_C(t_3)$, соответствующий номеру $\alpha_{4M}$.

Также $t_{4o}$ можно найти, используя, например, подфункцию *fminbnd* системы математических расчётов MatLab7 для минимизации функций:

$$t_4 + \ln\frac{\Delta f_\varepsilon}{C_{Д5М}X_{СМ}(t_4)}\cdot\frac{1}{\alpha_М}$$

или

$$t_4 + \ln\frac{\Delta f_\varepsilon}{2\left|C_{Д5М}X_{СМ}(t_4)\right|}\cdot\frac{1}{\mathrm{Re}(\alpha_М)}.$$

Для нахождения времени переходного процесса по фазе сигнала ГУН $t_{\varphi CSR} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_{5\varphi}$ с точностью $\Delta\varphi_\varepsilon$ необходимо в выражениях (17) заменить $t_5$ на $t_{5\varphi}$, $\Delta f_\varepsilon$ на $\Delta\varphi_\varepsilon$, $\mathbf{C}_{Д5}$ на $\mathbf{C}_Д$.

Используя полученные соотношения, найдем преимущество от рассмотренных способов ускорения ПП перестройки $СЧ^{ЗН}_{ДСМ}$ по частоте. Будем определять преимущество как отношение времени ПП $t_у$ без использования ускорений ко времени ПП $t_{уCSR}$ с рассмотренными выше способами УРС и «FastLock»:

$$B_{csr+Fastlock} = t_у/(t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5) = t_у/t_{уCSR}. \quad (18)$$

Приближенную формулу для расчета времени $t_у$ заимствуем из [4]:

$$t_y = \frac{2\cdot\Delta f_{ГУН}}{N\cdot\omega_Б^2} - 2T_1 + \ln\left[\frac{\Delta f_\varepsilon}{N\cdot\omega_Б^2\cdot T_1\cdot b}\right]\cdot\frac{1}{\alpha_M} \quad (19а)$$

для действительного $\alpha_M$ и

$$t_y = \frac{2\cdot\Delta f_{ГУН}}{N\cdot\omega_Б^2} - 2T_1 + \ln\left[\frac{\Delta f_\varepsilon}{N\cdot\omega_Б^2\cdot T_1\cdot b}\right]\cdot\frac{1}{\mathrm{Re}(\alpha_M)} \quad (19б)$$

для комплексного значения $\alpha_M$, $\omega_Б = \sqrt{\frac{i_М\cdot S_{ГУН}\cdot}{(C_1+C_2)\cdot N}}$ – базовая частота частотной характеристики разомкнутой системы, $b = c_{ДМ}\cdot b_М/(\alpha_М\cdot S_{ГУН})$ – для действительного $\alpha_M$, $b = 2\,|c_{ДМ}\cdot b_М/(\alpha_М S_{ГУН})|$ – для комплексного $\alpha_M$, $b_M$ – элемент вектора $\mathbf{B}_Д$, соответствующий $\alpha_M$.

Для расчета $B_{csr+Fastlock}$ в среде MatLab7 по полученным выше выражениям разработана программа *fap_csr_Fastlock.m.* Результаты расчетов $B_{csr+Fastlock}$ по этой программе приведены на рис. 5. На этом рисунке по оси *x* отложен параметр *csr* линейной системы ИФАПЧ, который равен $csr = |\Phi_{ГУНМ}(t)/2\pi|/N = |\Phi_{NM}(t)/2\pi|$, где $|\Phi_{ГУНМ}(t)|, |\Phi_{NM}(t)|$ – максимальное значение $|\Phi_{ГУН}(t)|, |\Phi_N(t)|$ соответственно, рассчитанных по (1) для $\mathbf{U} = U(t) = U_M\cdot 1(t)$. Для линейной системы справедливо соотношение $csr = \varphi_M\Delta f_{ГУН}/(N\cdot\omega_Б)$, где $\varphi_M = |\Phi_{ГУНМ}|\times\omega_{Б_ТЕСТ}/(2\pi\Delta f_{ГУН_ТЕСТ})$, $\omega_{Б_ТЕСТ}$ – тестовая базовая частота, $\Delta f_{ГУН_ТЕСТ}$ – тестовая перестройка частоты ГУН при вычислении параметра $\varphi_M$. Рассчитанная по (1) зависимость $\varphi_M$ от показателя колебательности $M$ [7] приведена в таблице для разомкнутой ИФАПЧ (см. рис. 1), имеющей передаточную функцию

$$G_{ФАП}(s) = \frac{\Phi_{ГУН}(s)}{\Phi_N(s)} = \frac{i_M S_{ГУН}(T_1 s+1)}{(C_1+C_2)Ns^2\sum_{i=2}^{l}(T_{il}s+1)}, \quad (20)$$

где $l = 4$ и $T_{24} \approx T_{34} \approx T_{44}$.

Таблица

| $M$ | 1.1 | 1.3 | 1.5 | 1.7 |
|---|---|---|---|---|
| $\varphi_M$ | 0.3114 | 0.4909 | 0.5912 | 0.5993 |

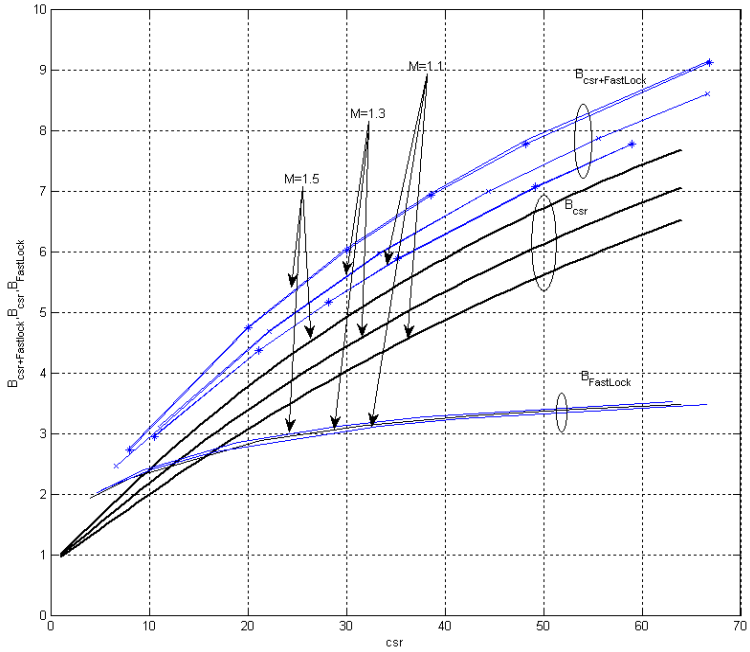



Рис. 5. Преимущества в длительности ПП для трех вариантов ускорений

Для системы ИФАПЧ $\text{СЧ}^{\text{ЗН}}_{\text{ДСМ}}$, синтезированной по показателю колебательности $M = 1.1, 1.3, 1.5$ и имеющей передаточную функцию (20), на рис. 5 приведены три группы кривых, отражающих преимущества в уменьшении длительности ПП от применения трех вариантов ускоряющих способов:

1. Кривые $B_{Fastlock}$, рассчитанные для случая применения только одного способа «FastLock» и $\Delta f_{\text{П}} = 10$ кГц, $\Delta f_{\varepsilon} = 1$ Гц, $dw = 4$ [7].

2. Кривые $B_{csr}$, рассчитанные для случая применения только одного способа УРС с ограничением на диапазон изменения токов ЗН $U_p = 8$, $\Delta f_{\varepsilon} = 1$ Гц [8].

3. Кривые $B_{csr+Fastlock}$, рассчитанные по вышеприведенным выражениям, для случая последовательного применения способа УРС с ограничением на диапазон изменения токов ЗН $U_p = 8$ и способа «FastLock» с $\Delta f_{\text{П}} = 10$ кГц, $\Delta f_{\varepsilon} = 1$ Гц, $dw = 4$.

Приведенные на рис. 5 кривые с маркером «*» получены на модели, разработанной в среде визуального моделирования Simulink системы математических расчетов MatLab. Эта модель соответствует схеме $\text{СЧ}^{\text{ЗН}}_{\text{ДСМ}}$ на рис. 1. При расчетах преимуществ способов ускорения ПП использовались дополнительные условия: $\Delta f_{\text{ГУН}} = 450$ МГц, $csr$ изменялся за счет вариации $\omega_{\text{Б}}$. Сравнивая на рис. 5 кривые $B_{csr+Fastlock}$ с маркером «*» и без маркера, можно сделать вывод о достаточной для инженерной практики точности полученных приближенных соотношений для расчетов длительностей ПП с последовательным во времени использованием режимов УРС и «FastLock». Из рис. 5 следует, что при $csr < 10 \div 15$ выгоднее использовать способ «FastLock», нежели УРС с ограничением на диапазон изменения токов ЗН. Кроме того, из анализа рис. 5 также следует, что предложенное использование последовательных во времени способов УРС и «FastLock» повышает быстродействие $\text{СЧ}^{\text{ЗН}}_{\text{ДСМ}}$ примерно в 1,2 раза по сравнению с использованием только одного способа УРС. При всех применяемых способах ускорения увеличение от 1,1 до 1,5 значения показателя колебательности $M$, используемого при синтезе параметров системы ИФАПЧ, приводит к уменьшению длительностей переходного процесса.

### *Выводы*

Предложена приближенная методика определения длительности переходных процессов в $\text{СЧ}^{\text{ЗН}}_{\text{ДСМ}}$ на основе системы ИФАПЧ пятого порядка с использованием последовательных во времени способа ускорения УРС с ограничением на диапазон изменения токов ЗН и способа

ускорения «FastLock». Применение ускоряющих способов приводит к уменьшению длительности переходных процессов установки по частоте примерно в 1,2 раза, что оценено количественно. Приближенная методика проверена на модели, разработанной в среде визуального моделирования Simulink системы математических расчетов MatLab. Эта модель соответствует обобщенной схеме $СЧ^{ЗН}_{ДСМ}$ на рис. 1. Сравнение результатов расчетов длительностей ПП по этой модели и по приближенной методике показало достаточную для инженерной практики точность.

***Литература***

1. *Борисов В.И., Зинчук В.М.* Помехозащищённость систем радиосвязи. Вероятностно-временной подход. М.: Радио и связь, 1999. 252с.

2. Помехозащищённость систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью / Под ред. *В.И. Борисова*. М.: Радио и связь, 2003. 640 с.

3. *Николаев. В.И., Смирнов С.Н.* Времяскоростные возможности радиосвязи с ППРЧ в условиях РЭП // Теория и техника радиосвязи: науч.-техн. сб. 2002. Вып. 2. С. 36–40.

4. *Гордонов А.Н., Резвая И.В*. Астатическая система ИФАПЧ, оптимизированная по длительности подстройки // Радиотехника. 1992. № 4. С. 48–52.

5. LMX2487 1-GHz to 6-GHz High Performance Delta-Sigma Low-Power Dual PLLatinum™ Frequency Synthesizers With 3-GHz Integer PLL. Texas Instruments Incorporated. Data Sheet. 2016.

6. ADF4159 Direct Modulation/Fast Waveform Generating, 13 GHz, Fractional-N Frequency Synthesizer. Analog Devices Incorporated. Data Sheet. 2017.

7. *Романов С.К., Тихомиров Н.М., Марков И.А.* Переходные процессы в системе ИФАПЧ с дробными делителями частоты и элементами коммутации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2008. №3(72). С. 53–69.

8. *Романов С.К*. Уменьшение времени переходных процессов в синтезаторах частот методом линеаризации режима работы системы ФАПЧ. // Теория и техника радиосвязи: науч.-техн. сб. / ОАО «Концерн «Созвездие». Воронеж. 2008. Вып. 4. С. 41–49.

Статья поступила в редакцию 12 марта 2018 года

УДК 621.391

# РЕАЛИЗОВАННЫЕ И ПОТЕНЦИАЛЬНО ВОЗМОЖНЫЕ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ И СВЯЗИ

© Авторы, 2018

**В.А. Маковий**, д.т.н. директор НТЦ, e-mail: Makovij@mail.ru
**А.Н. Голубинский**, д.т.н., доцент, начальник отдела, e-mail: annikgol@mail.ru
АО «Концерн «Созвездие»

*Получены аналитические выражения, позволяющие количественно оценить потенциальное увеличение средней скорости передачи информации при ретрансляции. Предложена методика выбора корреспондентов для построения маршрута передачи с наибольшей возможной скоростью, основанная на их радиовидимости и географическом расположении. Получена расчетная формула для оценки отношения средних задержек доставки пакета при двухчастотной ретрансляции относительно одночастотной.*

***Ключевые слова:*** *геометрическая маршрутизация, скорость передачи информации, радиолиния, ретрансляция, формула Введенского, множественный доступ, двухчастотный ретранслятор, среднее время задержки пакета.*

# IMPLEMENTED AND POTENTIAL DATA TRANSMISSION RATES WITHIN AUTOMATED CONTROL AND COMMUNICATION SYSTEMS

© All rights reserved, 2018

**V.A. Makovij**, D.Sc. in Engineering Science, Head of R&D Center, e-mail: Makovij@mail.ru
**A.N. Golubinskij**, D.Sc. in Engineering Science, Associate Professor, Head of Department, e-mail: annikgol@mail.ru
JSC «Concern «Sozvezdie»

*This article represents the resulted analytical expressions that allow to make the quantitative estimation of a potential increase in the average data transmission rate during retranslation. In addition, the authors offer a method for selecting calling parties in order to route a transmission path at the highest possible data transmission rate based on the radio visibility and geographic position of such parties. The authors have obtained the calculation formula for estimation of average packet delays in the double-frequency retranslation mode instead of the single-frequency retranslation mode.*

***Keywords:*** *geometric routing, data transmission rate, radio link, retranslation, Vvedenskij formula, multiple access, double-frequency retransmitter, average packet delay time.*

Современные системы автоматического управления войсками основываются на разнообразных системах связи. Повышение устойчивости и оперативности обуславливает переход к сетецентрическим принципам организации систем связи и управления, что сопровождается увеличением количества передаваемой информации. В тактическом звене управления радиосвязь является основным видом связи [1]. Уменьшение времени доведения информации от источника до потребителя увеличивает эффективность системы управления, в интересах которой функционирует система радиосвязи. Основные технические параметры классических радиосредств, такие как шумовая температура приёмных устройств, коэффициент усиления антенно-фидерного тракта, мощность передающих устройств, минимально необходимое отношение энергии передаваемого символа к спектральной плотности шума на входе приёмника, приблизились к своим предельно достижимым значениям, и значительный прогресс в этой области не ожидается.

Высокую надёжность доведения информации современные системы радиосвязи обеспечивают за счёт применения различных методов адаптации к фактически существующим условиям распространения радиоволн и электромагнитной обстановки в точке приёма. Наиболее часто используются следующие виды адаптации:

– по частоте;

– по ширине, занимаемой сигналом, полосе частот;

– по виду сигнально-кодовой конструкции;

– по скорости манипуляции или по длительности канального символа;

– по параметрам кода с исправлением и обнаружением ошибок;

– по мощности передающей радиостанции;

– по диаграмме направленности (пространственная избирательность).

Основным результатом совместного применения перечисленных видов адаптации, с точки зрения потребителя услуг радиосвязи, является возможность создания достаточно большого поля сплошного покрытия, в каждой точке которого будет возможна радиосвязь между любыми корреспондентами системы. Однако для каждой конкретной пары точек этого поля достижимая скорость связи может заметно отличаться [2, 3].

Общеизвестно, что при наличии в этом поле нескольких абонентов возможна организация связи с ретрансляцией. При этом существует большое количество методов построения маршрута в сети [3, 4]. Однако вопросы совместной оптимизации канала и маршрута прохождения в сети адаптивной радиосвязи практически не рассматривались. В условиях, когда связь между точками поля доступа может быть осуществлена как с ретрансляцией, так и без неё, необходимо разработать методику, позволяющую сделать этот выбор при минимальном служебном трафике.

***Целью работы*** является анализ методов увеличения скорости передачи информации в адаптивной радиолинии, основанных на замене радиолинии несколькими последовательно соединенными радиолиниями, и поиск методов расчёта оптимальных маршрутов с учётом географического расположения корреспондентов.

Известно, что, согласно формуле Введенского, мощность сигнала уменьшается обратно пропорционально четвертой степени расстояния между передатчиком и приемником. В связи с этим скорость передачи информации ($R_и$) при фиксированной мощности передатчика ($P_{прд}$) ограничена для уверенного приема (для фиксированной ошибки) сообщений (пакетов) расстоянием между передатчиком и приемником ($r$).

Исследуем вопрос о возможности увеличения скорости передачи информации при односкачковой ретрансляции относительно передачи данных без ретрансляции в УКВ диапазоне. На рис. 1 схематично представлено расположение приемника ($A$), передатчика ($B$) и приемопередающего ретранслятора ($C$). На рисунке обозначено: $h_1$, $h_2$, $h_3$ – высоты антенн передатчика, приемника и ретранслятора соответственно; $r_1 = r_{AB} = |AB|$, $r_2 = r_{AC} = |AC|$, $r_3 = r_{CB} = |CB|$ – расстояния между соответствующими точками; $R_{и1}$ – скорость передачи информации напрямую от одного абонента ($A$) другому абоненту ($B$), т.е. за один «скачок»; $R_{и2\,(AC)}$, $R_{и2\,(CB)}$ и $R_{и2\,\Sigma}$ – соответственно скорость передачи информации от абонента ($A$) ретранслятору ($C$), от ретранслятора ($C$) абоненту ($B$) и итоговая скорость передачи информации от абонента ($A$) абоненту ($B$) через ретранслятор ($C$).

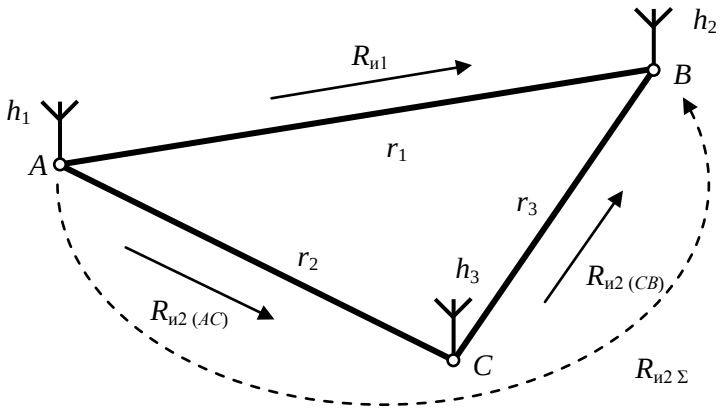



Рис. 1. Схема для определения изменения скорости передачи информации при ретрансляции относительно передачи без ретрансляции

Важным условием при решении задачи об изменении скорости передачи информации при ретрансляции является равенство мощностей передатчиков без ретрансляции ($P_{прд1}$) и при наличии ретрансляции ($P_{прд2}$), т.е.

$$P_{\text{прд1}} = P_{\text{прд2}} . \qquad (1)$$

Для решения поставленной задачи воспользуемся лучевой моделью радиолинии (рис. 2).

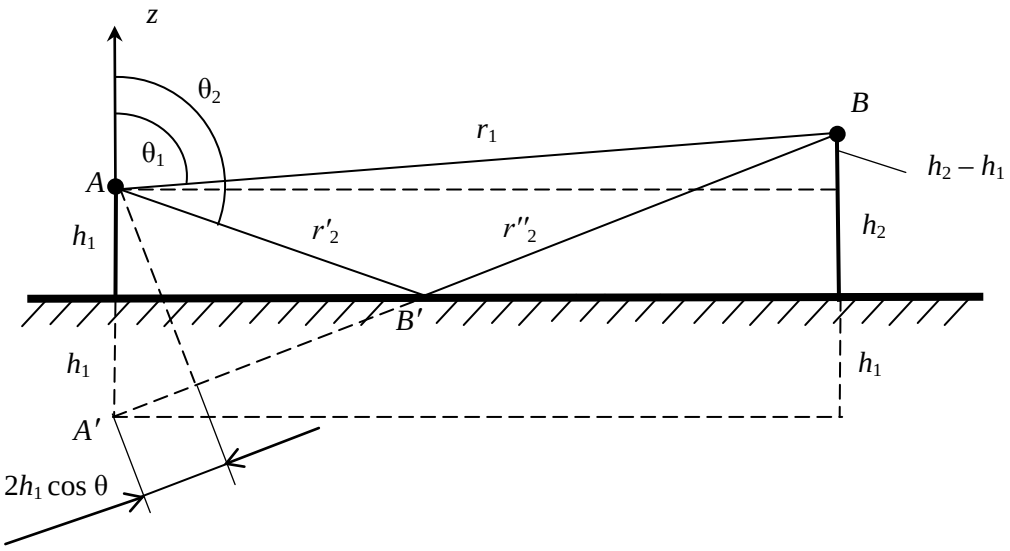



Рис. 2. Лучевая модель радиолинии

Следует отметить, что лучевая модель (отражательная трактовка) может быть применена, если антенны расположены на линии прямой видимости и достаточно высоко подняты [5, 6]. При строгом выполнении второго условия область, существенная для распространения радиоволн (доминантная область), должна лежать над земной поверхностью. В большинстве практических случаев это недостижимо. Тем не менее, для ориентировочных расчетов лучевая модель пригодна, когда высота расположения антенн превышает длину волны: $h_1$, $h_2 > \lambda$, где $\lambda$ – длина волны.

Математическая формализация лучевой модели радиолинии для случая плоской поверхности приводит к интерференционным формулам, которые описывают интерференцию двух волновых процессов.

При высотах антенн много меньше горизонтального расстояния ($h_1 << r$, $h_2 << r$) и относительно пологом падении ($\theta_1 \approx \theta_2 = \theta \approx 90^\circ$, т.е. достаточно малых углах скольжения) можно считать отражающие свойства земной поверхности очень хорошими (коэффициент отражения $\rho \approx -1$) [5]. В результате для данных условий можно получить упрощенную интерференционную формулу [5–7]. Указанная формула для условия

$$r > \frac{18 h_1 h_2}{\lambda} \qquad (2)$$

преобразуется в квадратичную формулу Введенского и для амплитуды вектора напряженности электрического поля в точке приема имеет следующий вид [5]:

$$E_{m\,\text{прм}} = \frac{\sqrt{60 P_{\text{прд}} D_{\text{прд}}}}{r^2} \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda}, \qquad (3)$$

где $D_{\text{прд}}$ – коэффициент направленного действия (КНД) передающей антенны.

Соответствующее выражение для мощности в точке приема, полученное на основе формулы Введенского, выглядит следующим образом:

$$P_{\text{прм}} = P_{\text{прд}} G_{\text{прд}} G_{\text{прм}} \frac{h_1^2 h_2^2}{r^4}, \qquad (4)$$

где $P_{\text{прд}}$, $G_{\text{прд}}$ и $P_{\text{прм}}$, $G_{\text{прм}}$ – мощности и коэффициенты усиления антенн для передатчика и приемника соответственно.

Из выражения (4) следует, что мощность принимаемого сигнала в области действия формулы Введенского не зависит от несущей частоты (длины волны).

Запишем выражение, определяющее длительность посылки передаваемого сообщения, то есть время передачи данных напрямую от одного абонента (*A*) другому абоненту (*B*)

$$\tau_1 = \frac{I}{R_{\text{и1}}}, \qquad (5)$$

где $I$ – размер пакета данных.

Итоговую скорость передачи информации от абонента (*A*) абоненту (*B*) через ретранслятор (*C*) можно рассчитать, используя выражение

$$R_{и2\Sigma} = \frac{I}{\tau_{2\Sigma}} = \frac{I}{\tau_{2(AC)} + \tau_{2(CB)} + \tau_{ПР}}, \quad (6)$$

где $\tau_{2(AC)}$, $\tau_{2(CB)}$ и $\tau_{2\Sigma}$ – соответственно время передачи пакета данных (длительность посылки) от абонента (*A*) ретранслятору (*C*), от ретранслятора (*C*) абоненту (*B*) и итоговое время передачи пакета от абонента (*A*) абоненту (*B*) через ретранслятор (*C*); $\tau_{ПР}$ – время переключения ретранслятора.

Записав выражения для времени передачи пакета данных для соответствующих скоростей передачи информации

$$\tau_{2(AC)} = \frac{I}{R_{и2(AC)}}, \ \tau_{2(CB)} = \frac{I}{R_{и2(CB)}} \quad (7)$$

и подставляя соотношения (7) в (6), получим

$$R_{и2\Sigma} = \frac{R_{и2(AC)} R_{и2(CB)}}{R_{и2(AC)} + R_{и2(CB)} + \frac{\tau_{ПР}}{I} R_{и2(AC)} R_{и2(CB)}}. \quad (8)$$

Выражение для скорости передачи информации связано с мощностью сигнала следующим образом [8]:

$$P_с = E_b R_и, \quad (9)$$

где $P_с$ – мощность сигнала; $E_b$ – энергия, затрачиваемая на передачу одного бита информации (битовая энергия).

Из формулы (9) очевидно, что для передачи информации с требуемым качеством (т.е. с определенной величиной ошибки) при увеличении скорости передачи информации ($R_и$) для фиксированного значения битовой энергии ($E_b$) (которая взаимосвязана со значением ошибки) требуется увеличение мощности принимаемого сигнала ($P_{прм}$).

Учитывая выражение (4), запишем формулы для скорости передачи информации на соответствующие расстояния:

$$R_{и1} = \frac{P_{прм1}}{E_b} = \frac{P_{прд1} G_{прд} G_{прм}}{E_b} \frac{h_1^2 h_2^2}{r_1^4};$$

$$R_{и2} = \frac{P_{прм2}}{E_b} = \frac{P_{прд2} G_{прд} G_{прм}}{E_b} \frac{h_1^2 h_2^2}{r_2^4}. \quad (10)$$

Таким образом, отношение скоростей передачи информации

$$\frac{R_{и2}}{R_{и1}} = \frac{P_{прд2}}{P_{прд1}} \frac{r_1^4}{r_2^4} \quad (11)$$

при выполнении условия равенства мощностей (1) приобретает вид

$$\frac{R_{и2}}{R_{и1}} = \frac{r_1^4}{r_2^4}. \quad (12)$$

Следовательно,

$$R_{и2} = R_{и1} \frac{r_1^4}{r_2^4}. \quad (13)$$

То есть чем больше требуется скорость передачи информации при той же мощности передатчика и прочих равных условиях, тем ближе необходимо располагать приемник относительно передатчика (отношение скоростей передачи информации обратно пропорционально четвертой степени отношения расстояний между приемником и передатчиком). В качестве примера рассмотрим типовую пакетную радиостанцию УКВ диапазона, обеспечивающую ориентировочные значения расстояний ($r$) для уверенного приема сообщений (пакетов), равные следующим величинам для соответствующих скоростей передачи информации ($R_и$): 32 кбит/с ~ 16 км; 64 кбит/с ~ 13 км; 128 кбит/с ~ 11 км; 256 кбит/с ~ 10 км [9].

Подставляя выражение (13) для различных участков радиотрассы в формулу (8), получим

$$R_{и2\Sigma} = \frac{R_{и1} \frac{r_1^4}{r_2^4} R_{и1} \frac{r_1^4}{r_3^4}}{R_{и1} \frac{r_1^4}{r_2^4} + R_{и1} \frac{r_1^4}{r_3^4} + \frac{\tau_{ПР}}{I} R_{и1} \frac{r_1^4}{r_2^4} R_{и1} \frac{r_1^4}{r_3^4}} = \frac{R_{и1} r_1^4}{r_2^4 + r_3^4 + \frac{\tau_{ПР}}{I} R_{и1} r_1^4}. \quad (14)$$

В результате отношение скоростей передачи информации (выигрыш)

$$\frac{R_{и2\Sigma}}{R_{и1}} = 1 \Big/ \left( \frac{r_2^4 + r_3^4}{r_1^4} + \frac{\tau_{ПР}}{I} R_{и1} \right) = 1 \Big/ \left( \frac{r_2^4 + r_3^4}{r_1^4} + \frac{\tau_{ПР}}{\tau_1} \right). \quad (15)$$

Полученное выражение (15) позволяет оценить потенциальные возможности увеличения скорости передачи информации при односкачковой ретрансляции относительно передачи данных без ретрансляции.

Из анализа формулы (15) видно, что наибольшее увеличение скорости возможно при расположении ретранслятора (*C*) посередине радиотрассы между абонентами (*A*) и (*B*), т.е. для $r_2 = r_3 = r_1/2$

$$\max\left[\frac{R_{и2\Sigma}}{R_{и1}}\right] = 1\Big/\left(\frac{1}{8}+\frac{\tau_{ПР}}{\tau_1}\right). \qquad (16)$$

Таким образом, в идеальном случае при мгновенном переключении ретранслятора с приема на передачу возможно потенциальное увеличение скорости передачи информации в 8 раз.

В качестве примера рассмотрим УКВ диапазон частот ($f$), который составляет от 30 до 108 МГц, что соответствует длине волны (λ) от 2,8 до 10 м. Примем, что высоты антенн $h_1=h_2=h_3=5$ м, скорость передачи информации $R_и=16$ кбит/с, размер сообщения (пакета) $I=260$ байт.

Определим возможность применения формулы Введенского. На основе условия (2) получим для наибольшего значения длины волны λ=10 м расстояние $r>45$ м, для наименьшего значения длины волны λ=2,8 м – расстояние $r>161$ м.

Оценим для указанных параметров на основе выражения (16) потенциальные возможности увеличения скорости передачи информации при ретрансляции относительно передачи данных без ретрансляции для времени переключения ретранслятора, не превышающего 10% от длительность посылки (т.е. $\tau_{ПР}/\tau_1<0{,}1$) [9]. В результате максимальное отношение скоростей передачи информации $\max[R_{и2\Sigma}/R_{и1}]\approx 4{,}4$. В данном случае очевидна целесообразность применения ретранслятора для увеличения скорости передачи информации.

Приведем выражение, позволяющее оценить потенциальное увеличение скорости передачи информации при *N*-скачковой ретрансляции (т.е. при *N* скачках):

$$\gamma(N) = \max\left[\frac{R_{и2\Sigma(N)}}{R_{и1}}\right] = \left[\frac{1}{(N+1)^3} + N\frac{\tau_{ПР}}{\tau_1}\right]^{-1}. \qquad (17)$$

Из формулы (17) видно, что при односкачковой ретрансляции ($N$=1) выражение приобретает вид (16), а случай передачи данных без ретрансляции соответствует $N$=0 (γ=1).

На рис.3 приведен график, на котором изображены зависимости максимального отношения скорости передачи информации при *N*-скачковой ретрансляции относительно скорости передачи данных без ретрансляции для $\tau_{ПР}/\tau_1=0{,}1$ (точки на штриховой линии) и $\tau_{ПР}/\tau_1=0{,}05$ (точки на штрихпунктирной линии). Из графиков на рис. 3 видно, что наибольшее потенциальное увеличение скорости для $\tau_{ПР}/\tau_1=0{,}1$ возможно при односкачковой, а для $\tau_{ПР}/\tau_1=0{,}05$ – при двухскачковой ретрансляции.

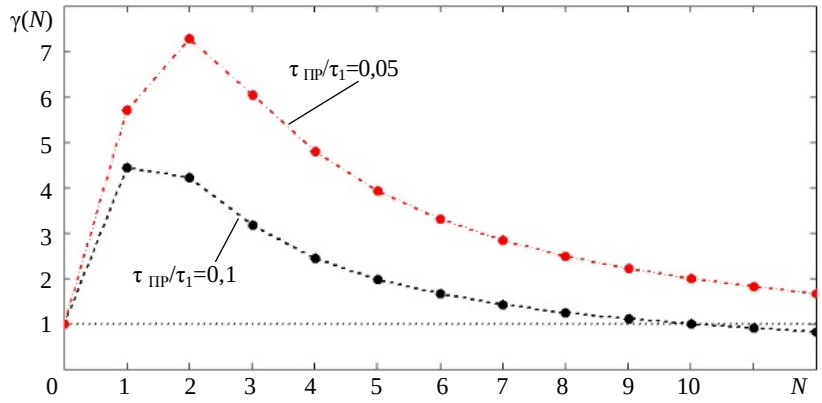



Рис. 3. Зависимость максимального отношения скоростей передачи информации от количества ретрансляций

Рассмотрим случай, когда длина радиотрассы увеличивается, при этом пусть выполняется равенство $r_2 = r_3 = r_1/\sqrt{2}$ (т. е. *ABC* – прямоугольный треугольник с равными катетами); тогда максимальное отношение скоростей передачи информации $\max[R_{и2\Sigma}/R_{и1}]\approx 1{,}7$. Очевидно, что

относительно предыдущего случая уменьшение отношения скоростей передачи информации обусловлено увеличением длины радиотрассы, а также влиянием инерционности ретранслятора.

Определим условия, при которых целесообразно использование ретрансляции для построения маршрута передачи с потенциально возможной скоростью. В качестве примера рассмотрим типовую пакетную радиостанцию с выходной мощностью 40 Вт. На рис. 4 приведён график зависимости скорости передачи информации в логарифмическом масштабе от расстояния между корреспондентами при односкачковой ретрансляции. Сплошной линией изображена соответствующая зависимость без ретрансляции ($R_{и\,БР}$), а штрихпунктирной линией – при наличии односкачковой ретрансляции ($R_{и\,max\,ОР}$) для случая максимального выигрыша по скорости при равных расстояниях от передатчика до ретранслятора и от ретранслятора до приемника ($r = r/2 + r/2$). При этом для передачи информации без ретрансляции за первоначальное (наибольшее) значение принималась величина $R_{и\,0} = 512$ кбит/с, а расстояние для уверенного приема сообщений $r_0 = 8$ км (дальность связи до 8 км). Значения дальностей для соответствующих более низких скоростей передачи информации вычислялись по формуле (18), полученной на основе выражения (12):

$$r = r_0 \sqrt[4]{\frac{R_{и0}}{R_и}} . \qquad (18)$$

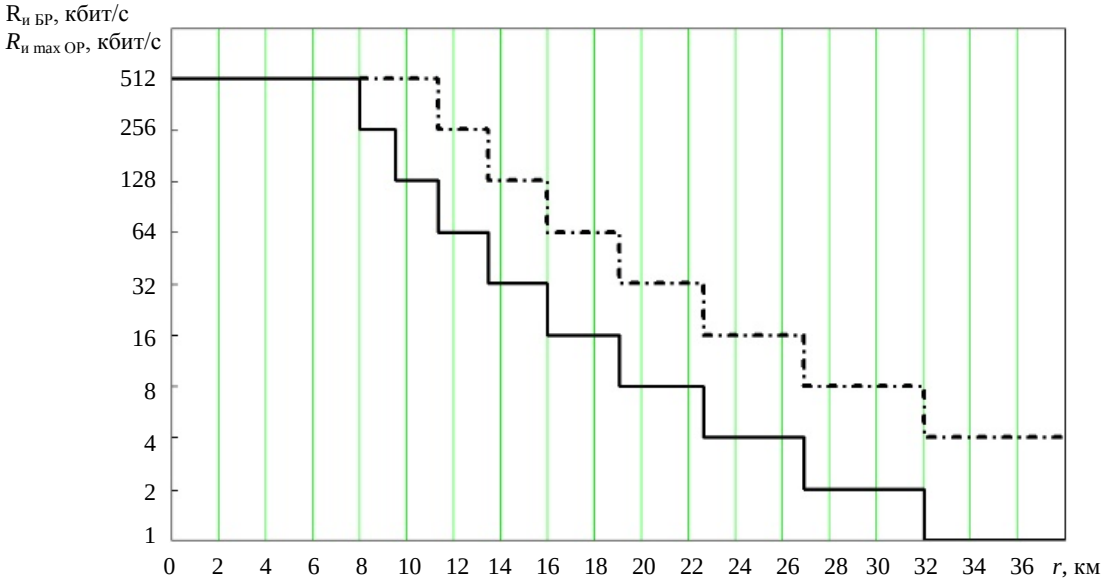



Рис. 4. Зависимость скорости передачи информации от расстояния между корреспондентами при односкачковой ретрансляции

При этом на рис. 4 потенциально возможная скорость передачи информации при использовании ретрансляции ($\tau_{ПР}/\tau_1$=0,1) принималась для соответствующих значений расстояний равной $R_{и\,max\,ОР}$ =4 $R_{и\,БР}$; уменьшение величины $\max[R_{и2\,\Sigma}/R_{и1}]\approx 4{,}4$ ровно до 4 было обусловлено заданным набором режимов скоростей с фиксированным отношением соседних скоростей, равным 2.

В таблице приведены скорости передачи информации без ретрансляции ($R_{и\,БР}$) и максимально возможные скорости при односкачковой ретрансляции ($R_{и\,max\,ОР}$), предельные расстояния для уверенного приема сообщений без ретрансляции ($r_{БР}$) и диапазоны расстояний между передатчиком и приемником, при которых целесообразно увеличение скорости передачи при использовании односкачковой ретрансляции.

Рассмотрим графическое представление областей возможного расположения ретрансляторов для односкоростных радиостанций. Примем, что все радиостанции имеют одинаковую дальность связи на каждой из возможных скоростей. На рис. 5 графически представлен критерий организации радиосвязи между одинаковыми односкоростными радиостанциями *A* и *B*.

Таблица

| № режима скорости | $R_{\text{и БР}}$, кбит/с | $r_{\text{БР}}$, км | $R_{\text{и max ОР}}$, кбит/с (изменение режима скорости) | $r_{\text{ОР max1}} \div r_{\text{ОР max2}}$, км |
|---|---|---|---|---|
| V1 | 512 | 8 | 2048 (не реализовано) | – |
| V2 | 256 | 9,5 | 1024 (не реализовано) | – |
| V3 | 128 | 11,3 | 512 (V3→V1) | 8÷11,3 |
| V4 | 64 | 13,5 | 256 (V4→V2) | 11,3÷13,5 |
| V5 | 32 | 16 | 128 (V5→V3) | 13,5÷16 |
| V6 | 16 | 19 | 64 (V6→V4) | 16÷19 |
| V7 | 8 | 22,6 | 32 (V7→V5) | 19÷22,6 |
| V8 | 4 | 26,9 | 16 (V8→V6) | 22,6÷26,9 |
| V9 | 2 | 32 | 8 (V9→V7) | 26,9÷32 |
| V10 | 1 | 38,1 | 4 (V10→V8) | 32÷38,1 |

Окружности с центрами в точках *A* и *B* определяют области уверенного обмена информацией на скорости V1, а окружность с центром в точке расположения радиостанции-ретранслятора (*C*) соответствует области уверенного обмена информацией с ретранслятором на скорости V1. Варианты взаимного расположения, показанные на рис. 5, соответствуют случаям:

– связь без ретрансляции возможна (*а*);

– связь без ретрансляции невозможна (*б*);

– связь с ретрансляцией невозможна (*в*).

Если радиостанция позволяет осуществлять обмен на N различных скоростях, то эти скорости будем обозначать как V1… V*N*, причём V1>V2>V3>…>V*N*.

При организации радиосвязи между двумя корреспондентами с односкачковой ретрансляцией необходимо из имеющихся в наличии радиостанций выбрать конкретную радиостанцию, используемую для этой цели (ретранслятор). Предлагаемый метод основан на информации о расположении корреспондентов и ранжировании потенциальных областей расположения всех радиостанций, которые могут быть задействованы для ретрансляции. Рассмотрим его реализацию в случае трехскоростных радиостанций (рис. 6).

На рис. 6 обозначены области, в которых обеспечиваются следующие режимы ретрансляции:

22 – при расположении в этой области ретранслятора возможна ретрансляция со скоростями V2 между корреспондентом *A* и ретранслятором и со скоростью V2 между ретранслятором и корреспондентом *B*. Такой режим работы радиолинии между корреспондентами *A* и *B* будем обозначать как V2&&V2. Знак «&&» обозначает радиолинию с одной ретрансляцией и соответствующими скоростями от корреспондента *A* до ретранслятора и от ретранслятора до корреспондента *B*;

12 – при расположении в этой области ретранслятора возможна ретрансляция со скоростями V1 между корреспондентом *A* и ретранслятором и со скоростью V2 между ретранслятором и корреспондентом *B*. Такой режим работы радиолинии между корреспондентами *A* и *B* будем обозначать как V1&&V2;

21 – при расположении в этой области ретранслятора радиолиния между *A* и *B* будет работать в режиме V2&&V1;

23 – при расположении в этой области ретранслятора радиолиния между *A* и *B* будет работать в режиме V2&&V3;

32 – при расположении в этой области ретранслятора радиолиния между *A* и *B* будет работать в режиме V3&&V2;

31 – при расположении в этой области ретранслятора радиолиния между *A* и *B* будет работать в режиме V3&&V1;

13 – при расположении в этой области ретранслятора радиолиния между *A* и *B* будет работать в режиме V1&&V3;

33 – при расположении в этой области ретранслятора радиолиния между *A* и *B* будет работать в режиме V3&&V3.

Для выбора ретранслятора, обеспечивающего максимальную при конкретном расположении радиостанций скорость передачи между корреспондентами *A* и *B*, проверяем, что скорости передачи информации радиолинии с различными режимами односкачковой ретрансляции соотносятся следующим образом:

(V1&&V1)>
(V1&&V2) = (V2&&V1) >
(V2&&V2) >
(V1&&V3)= (V3&&V1)>
(V2&&V3)= (V3&&V2)>
(V3&&V3).

Соотношение скоростей может быть уточнено по результатам полевых испытаний радиостанций с конкретным протоколом передачи данных.

Предлагаемая методика выбора радиостанции, используемой в качестве ретранслятора при организации радиолинии от корреспондента *A* до корреспондента *B* для трехскоростных радиостанций, заключается в последовательном поиске потенциального ретранслятора в соответствии с приведёнными выше неравенствами:

– в области 11;

– если подходящая радиостанция не найдена – в областях 12 и 21;

– если подходящая радиостанция не найдена – в области 22;

– если подходящая радиостанция не найдена – в областях 13 и 31;

– если подходящая радиостанция не найдена – в областях 23 и 32;

– если подходящая радиостанция не найдена – в области 33.

Предложенная методика выбора предпочтительных радиостанций для построения маршрута (геометрическая маршрутизация) может использоваться как самостоятельно, так и как часть более общей стратегии построения маршрута, позволяя резко уменьшить количество проб и сократить объём служебного трафика между радиостанциями.

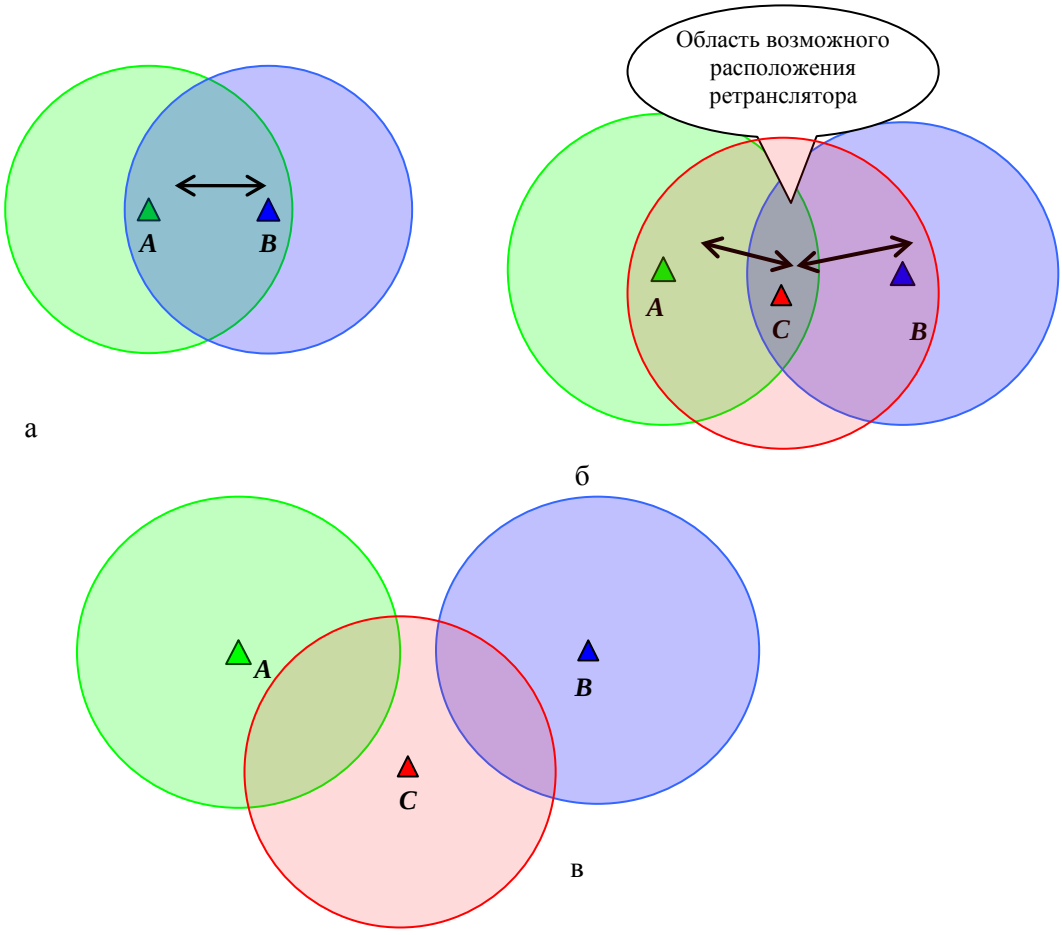



Рис. 5. Варианты взаимного расположения односкоростных радиостанций и ретранслятора

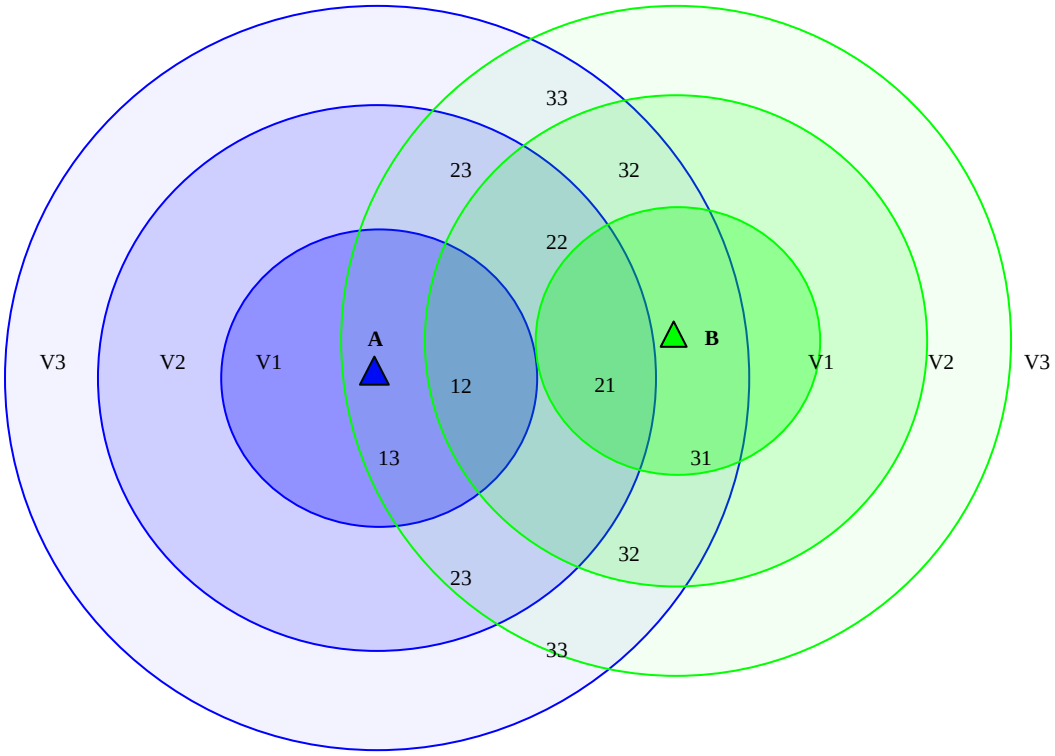



Рис. 6. Обозначение областей возможного расположения ретранслятора

Для определения фактических зон уверенного обмена на каждой из скоростей может быть применена одна из геоинформационных систем в сочетании с расчётными методами. В общем случае необходимо проводить расчеты с учетом сферичности Земли, осуществляемые с помощью нескольких подходов.

Первый подход применим в зоне освещенности [6] при расстояниях между передатчиком и приемником $r<0{,}8R_0$, где расстояние прямой видимости

$$R_0 = 3{,}57(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})\,[\text{км}]; \qquad (19)$$

для указанных значений высот антенн $R_0 \approx 16$ км, т.е. подход справедлив при расстояниях $r<12{,}8$ км, при этом в интерференционных формулах проводят замену высот антенн $h_1$, $h_2$ их соответствующими приведенными высотами $\tilde{h}_1$, $\tilde{h}_2$.

Второй подход используется в зоне полутени ($0{,}8R_0<r<1{,}2R_0$) и зоне тени ($r>1{,}2R_0$), при этом возможно:

– строгое решение задачи дифракции на сфере [10]: классическое решение задачи о распространении радиоволн вокруг сферической полупроводящей поверхности земного шара заключается в решении системы уравнений Максвелла, составленных для воздуха и земной поверхности, при учете соответствующих граничных условий. Однако в данном методе присутствует вычислительная трудность для получаемого решения – выражения для векторов напряженности электрического и магнитного поля получаются в виде очень медленно сходящегося ряда, составленного из функций Лежандра, Ханкеля и Бесселя [6, 10];

– применение расчетной формулы Фока для двух поднятых антенн [6], которая получена на основе альтернативного метода решения задачи дифракции вокруг земного шара (данный метод лишен недостатка, который присущ классическому методу решения задачи дифракции на сфере).

Заметим, что более общим случаем является распространение радиоволн на неоднородной трассе с учетом сферичности Земли, при этом используются соответствующие расчетные выражения [6, 11].

Будем считать, что ретрансляция осуществляется на той же частоте, что и прием (одночастотный ретранслятор – один передатчик на частоте $f_1$, один приемник на частоте $f_1$). При этом в системе радиодоступа применяется протокол случайного множественного доступа P-ALOHA (PURE ALOHA – «Чистая Алоха», простая, несинхронизированная или бесщелевая Алоха) [12, 13]. По указанному протоколу пакеты данных передаются разными

абонентскими станциями в случайные моменты времени, моменты начала передачи между собой не синхронизированы, а длина сообщений не фиксирована [12, 13]. В случае наложения передаваемых разными абонентскими станциями пакетов происходит конфликт доступа (коллизия), и искаженные пакеты подлежат повторной передаче.

Нормированная пропускная способность [13] (средняя пропускная способность [14], нормированная канальная проходимость [12]) для протокола P-ALOHA имеет вид [12–14]

$$S = G\,\mathrm{e}^{-2G}, \qquad (20)$$

где $G$ – нормированный полный информационный обмен [13] (интенсивность поступления пакетов [14], нормированный канальный трафик [12]). Максимальное значение $S_{\max} = 1/(2\mathrm{e}) = 0{,}184$ достигается при $G_0$=0,5 (в среднем 18,4% от всех передаваемых пакетов не подвергаются коллизиям). Таким образом, в канале с чистым алгоритмом ALOHA может быть использовано лишь 18,4% ресурса связи.

Рассмотрим двухчастотный ретранслятор (один передатчик на частоте $f_1$ или $f_2$, два приемника на частотах $f_1$ и $f_2$), применяемый для передачи пакетов данных от абонента ретранслятору и от ретранслятора другому абоненту (рис. 7). Допустим, что ретранслятор может одновременно принимать пакеты данных на частотах $f_1$ и $f_2$.

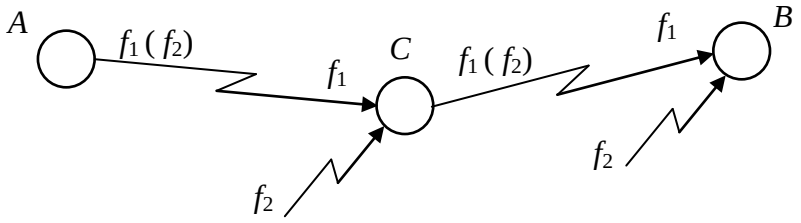



Рис. 7. Схема двухчастотной ретрансляции

Будем считать, что при использовании двухчастотного ретранслятора организована поочередная передача посылок на частотах $f_1$ и $f_2$ (вместо передачи всех посылок на частоте $f_1$, что соответствует применению одночастотного ретранслятора). Таким образом, средняя частота успешного поступления пакетов при двухчастотной ретрансляции $\Lambda_2$ (пакет/с) может быть уменьшена в 2 раза относительно средней частоты успешного поступления пакетов $\Lambda_1$ при одночастотной ретрансляции, то есть

$$\Lambda_2 = \frac{\Lambda_1}{2} \text{ или } \frac{\Lambda_2}{\Lambda_1} = \frac{1}{2}. \qquad (21)$$

Таким образом, нормированная пропускная способность при двухчастотной ретрансляции также уменьшится в 2 раза:

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{I\,\Lambda_2 / R_{\text{и}}}{I\,\Lambda_1 / R_{\text{и}}} = \frac{\Lambda_2}{\Lambda_1} = \frac{1}{2}. \qquad (22)$$

Получим зависимость изменения нормированного полного информационного обмена $G_2/G_1$ от нормированной пропускной способности $S_1$ при уменьшении средней частоты успешного поступления пакетов в 2 раза. Из выражения (20) видно, что данное уравнение является трансцендентным относительно $G$ и функциональная зависимость $G(S)$ в явном виде отсутствует.

Для аппроксимации $G(S)$ на интервале $G \in [0; G_0]$, что соответствует диапазону изменения аргумента $S \in [0; S_{\max}]$, предлагается использовать следующую функциональную зависимость:

$$G \approx G_0 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{S}{S_{\max}}}\right), \qquad (23)$$

которая ведет себя идентично исходной функциональной зависимости и при $S$=0 имеет значение $G$=0, а при $S$=$S_{\max}$=1/(2e)≈0,184 соответствует $G$=$G_0$=1/2=0,5.

Оценим относительную ошибку аппроксимации следующим образом:

$$\delta = \frac{\left| \int_0^{G_0} S_a(G)\,\mathrm{d}G - \int_0^{G_0} S(G)\,\mathrm{d}G \right|}{\int_0^{G_0} S(G)\,\mathrm{d}G} \cdot 100\%, \qquad (24)$$

где $S(G)$ и $S_a(G)$ – соответственно исходная

функциональная зависимость (20) и аппроксимирующая зависимость, полученная на основе (23):

$$S_a(G) \approx -\frac{S_{\max}}{G_0^2}G^2 + 2\frac{S_{\max}}{G_0}G. \qquad (25)$$

Интегралы, входящие в (24), имеют следующие значения:

$$\int_0^{G_0} S(G)\,\mathrm{d}G = -\frac{G_0}{2}\mathrm{e}^{-2G_0} - \frac{1}{4}\mathrm{e}^{-2G_0} + \frac{1}{4} = \frac{1}{4} - \frac{1}{2\mathrm{e}};$$

$$\int_0^{G_0} S_a(G)\,\mathrm{d}G = \frac{2}{3}S_{\max}G_0 = \frac{1}{6\mathrm{e}}. \qquad (26)$$

В результате относительная ошибка аппроксимации

$$\delta = \frac{3\mathrm{e}-8}{3\mathrm{e}-6}\cdot 100\% \approx 7{,}186\,\%. \qquad (27)$$

Таким образом, зависимость изменения нормированного полного информационного обмена от нормированной пропускной способности на основе выражения (23) имеет вид

$$\frac{G_2}{G_1} = \frac{\sqrt{S_{\max}} - \sqrt{S_{\max} - S_2}}{\sqrt{S_{\max}} - \sqrt{S_{\max} - S_1}} = \frac{\sqrt{S_{\max}} - \sqrt{S_{\max} - S_1/2}}{\sqrt{S_{\max}} - \sqrt{S_{\max} - S_1}}. \qquad (28)$$

График данной зависимости представлен на рис. 8. Заметим, что при $S_1 \to 0$, вычислив соответствующий предел, получим $G_2/G_1=0{,}5$; при $S_1=S_{\max}$ значение $G_2/G_1=1-1/\sqrt{2}\approx 0{,}293$.

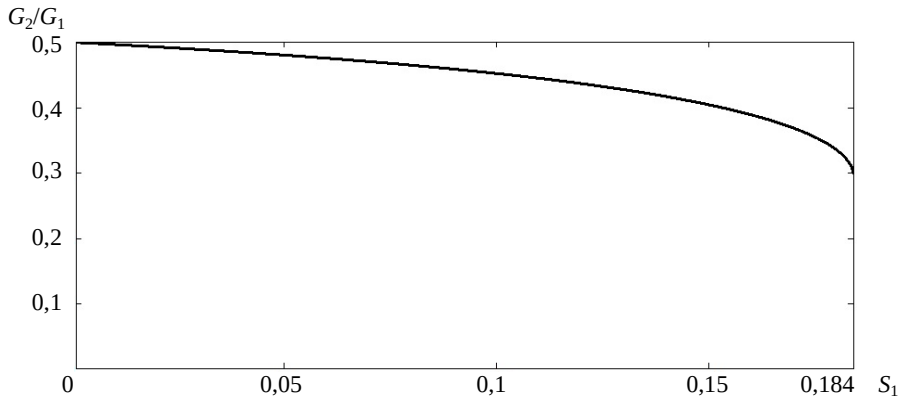



Рис. 8. Зависимость изменения нормированного полного информационного обмена от нормированной пропускной способности

Важной мерой качества в системах со случайным доступом является среднее время задержки при передаче пакета [12]. Запишем выражение для расчета среднего времени задержки при передаче пакета [15]:

$$\overline{\tau} = (\tau_{\mathrm{p}} + T + \overline{x})\cdot(\mathrm{e}^{2\Lambda_t T} - 1) + \tau_{\mathrm{p}} + T = (\tau_{\mathrm{p}} + T)\,\mathrm{e}^{2\Lambda_t T} + \overline{x}\,(\mathrm{e}^{2\Lambda_t T} - 1), \qquad (29)$$

где $T$ – длительность пакета (для приведенных ранее значений параметров $T=I/R_{\text{и}}=\tau_1=$ = (260 байт/пакет)/(16 кбит/с) ≈ 127 мс/пакет, а при увеличении скорости передачи информации в 4 раза $T$ = (260 байт/пакет)/(64 кбит/с) ≈ ≈ 32 мс/пакет);

$\tau_{\mathrm{p}}$ – время распространения сигнала ($\tau_{\mathrm{p}}=r_2/c$=(8 км)/($3\cdot10^8$ м/с)≈27 мкс/пакет);

$\overline{x}$ – среднее значение случайного времени задержки (при повторной передаче сообщения задерживаются на случайную, равномерно распределенную в диапазоне $(0\ldots x_{\max})$ величину $x$, чем достигается разнос пакетов во времени);

$\Lambda_t$ – интенсивность суммарного потока сообщений от всех станций (пакет/с), общая частота поступления сообщений ($\Lambda_t=\Lambda+\Lambda_r$, где $\Lambda_r$ – частота отклоненных данных).

Заметим, что протокол P-ALOHA может быть использован и при передаче сообщений разного объема (длительности). Тем не менее, для оценки средней задержки можно применять выражение (29), при этом $T$ будет иметь смысл среднего времени передачи сообщения, которое можно выразить через средний объем сообщения [15].

Учитывая, что для исследуемых расстояний выполняется условие $\tau_{\mathrm{p}} << T$, перепишем выражение (29) в следующем виде:

$$\overline{\tau} = (T + \overline{x})\cdot(\mathrm{e}^{2\Lambda_t T} - 1) + T = T\,\mathrm{e}^{2\Lambda_t T} +$$

$$+\overline{x}\,(\mathrm{e}^{2\Lambda_t T}-1)=(\overline{x}+T)\,\mathrm{e}^{2\Lambda_t T}-\overline{x}\,. \qquad (30)$$

В результате получим выражение для нормированного среднего времени задержки при передаче пакета:

$$\frac{\overline{\tau}}{T}=\left(\frac{\overline{x}}{T}+1\right)\mathrm{e}^{2G}-\frac{\overline{x}}{T}, \qquad (31)$$

где $G=\Lambda_t T$.

Используя аппроксимацию нормированного полного информационного обмена (23), окончательно получим аналитическое выражение для нормированного среднего времени задержки при передаче пакета:

$$\frac{\overline{\tau}}{T}=\left(\frac{\overline{x}}{T}+1\right)\exp\left[2G_0\left(1-\sqrt{1-\frac{S}{S_{\max}}}\right)\right]-\frac{\overline{x}}{T}. \qquad (32)$$

Следует отметить, что при $x_{\max}=43T$, т.е. $\overline{x}=x_{\max}/2=21{,}5\,T$, зависимость $\overline{\tau}/T$ от $S$, рассчитанная на основе полученного аналитического выражения (31), – сплошная линия на рис. 9 с удовлетворительной точностью совпадает с соответствующими зависимостями, полученными на основе моделирования [12, 14]. В качестве примера на рис. 9 пунктирной линией с точками представлена зависимость из [12].

Отношение средних задержек доставки пакета от нормированной пропускной способности при уменьшении средней частоты успешного поступления пакетов в 2 раза на основе выражения (32) имеет вид

$$\frac{\overline{\tau}_2}{\overline{\tau}_1}=\frac{\left(\frac{\overline{x}}{T}+1\right)\exp\left[2G_0\left(1-\sqrt{1-\frac{S_1}{S_{\max}}}\right)\right]-\frac{\overline{x}}{T}}{\left(\frac{\overline{x}}{T}+1\right)\exp\left[2G_0\left(1-\sqrt{1-\frac{S_1}{2S_{\max}}}\right)\right]-\frac{\overline{x}}{T}}. \qquad (33)$$

Соответствующая зависимость, полученная на основе (33), представлена на рис. 10. Заметим, что при $S_1=0$ отношение задержек $\overline{\tau}_2/\overline{\tau}_1=1$; при $S_1=S_{\max}$ указанное отношение $\overline{\tau}_2/\overline{\tau}_1\approx 0{,}218$.

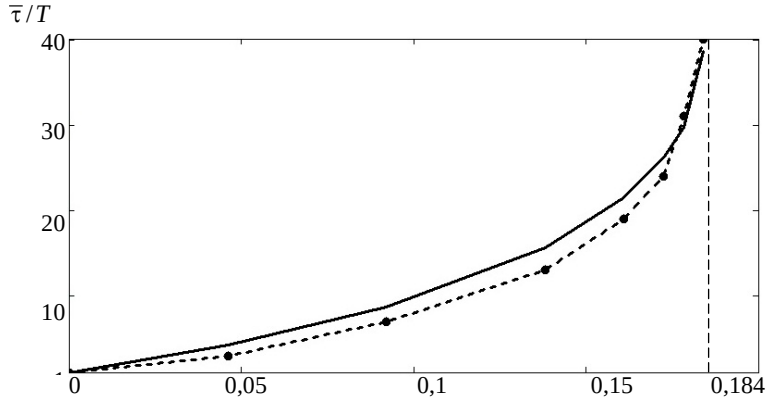



Рис. 9. Зависимость нормированного среднего времени задержки при передаче пакета от нормированной пропускной способности

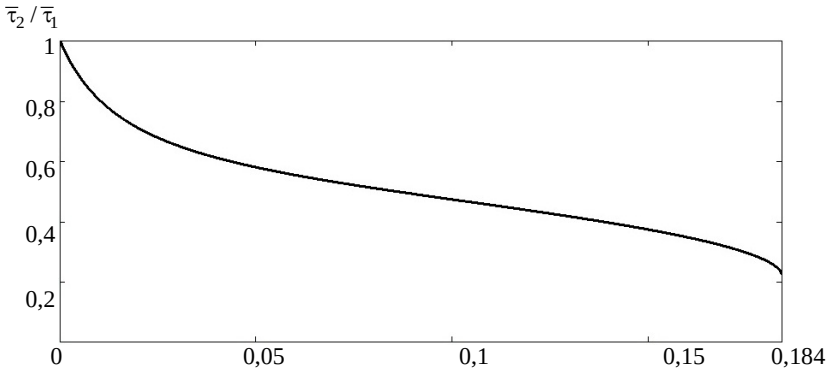



Рис. 10. Зависимость отношения средних задержек доставки пакета от нормированной пропускной способности

Так как ретранслятор может одновременно принимать пакеты данных на частотах $f_1$ и $f_2$, то общая средняя задержка при передаче пакета равна средней задержке на любой из частот: $\overline{\tau}_2 = \overline{\tau}_2(f_1) = \overline{\tau}_2(f_2)$. Применение двухчастотной ретрансляции позволяет уменьшить среднее время доставки пакета.

***Выводы***

Полученные в работе аналитические выражения позволяют количественно оценить выигрыш по скорости передачи информации при использовании ретрансляции. Также получены расчетные формулы для оценки отношения средних задержек доставки пакета при двухчастотной ретрансляции относительно одночастотной.

Сформулировано понятие геометрической маршрутизации как одного из этапов построения маршрута передачи данных. Предложена методика выбора корреспондентов для построения маршрута передачи с наибольшей возможной скоростью, основывающаяся на их радиовидимости и географическом расположении. Приведены графические материалы, иллюстрирующие работу предложенной методики. Результаты работы найдут применение при разработке нового поколения средств радиосвязи в тактическом звене управления.

***Литература***

1. *Макаренко С.И., Сапожников В.И., Захаренко Г.И., Федосеев В.Е.* Системы связи / Под. общ. ред. С.И. Макаренко. Воронеж: издательство ВАИУ, 2011. 285 с.

2. *Вишневский В.М, Портной С.Л, Шахнович И.В.* Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. М.: Техносфера, 2009. 472 с.

3. *Таненбаум Э., Уэзеролл Д.* Компьютерные сети. СПб.: Питер, 2012. 960 с.

4. *Олифер В.Г., Олифер Н.А.* Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. СПб.: Питер, 2016. 992 с.

5. *Никольский В.В., Никольская Т.И.* Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 544 с.

6. *Долуханов М.П.* Распространение радиоволн. М.: Связь, 1972. 336 с.

7. *Черный Ф.Б.* Распространение радиоволн. М.: Сов. радио, 1972. 464 с.

8. *Зюко А.Г., Ковский Д.Д., Коржик В.И., Назаров М.В.* Теория электрической связи. М.: Радио и связь, 1999. 432 с.

9. Радиостанция Р-168-25У-2. Технические условия ИТНЯ.464511.245-05ТУ.

10. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Гл. ред. физ.-мат. лит. изд-ва «Наука», 1973. 720 с.

11. *Фейнберг Е.Л.* Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. М.: Наука. Физматлит, 1999. 496 с.

12. *Прокис Дж.* Цифровая связь. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.

13. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1104 с.

14. *Григорьев В.А., Лагутенко О.И., Распаев Ю.А.* Сети и системы радиодоступа. М.: Эко-Трендз, 2005. 384 с.

15. *Камнев В.Е., Черкасов В.В., Чечин Г.В.* Спутниковые сети связи. М.: «Альпина Паблишер», 2004. 536 с.

Статья поступила в редакцию 2 марта 2018 года

УДК 621.391

# СТАБИЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ СВЯЗИ И УПРАВЛЕНИЯ В ЧАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕЖИМА РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

© Авторы, 2018

**А.В. Мержвинский**, начальник отдела, e-mail: meralb@mail.ru
**Б.М. Попов**, консультант, e-mail: bmp49@yandex.ru
АО «Концерн «Созвездие»

*Для систем с памятью, допускающих хаотическое поведение и являющихся подсистемами более сложной системы (надсистемы), предложен способ стабилизации их функциональных характеристик посредством автотрансформации хаотического поведения в поведение гистерезисное. Такая трансформация базируется на автоматическом изменении структуры системы, придающем ей логистическую гибкость, способность опережающей адаптации к вариациям потребностей надсистемы.*

***Ключевые слова:*** *системы управления реального времени, системы связи, системный анализ, гистерезисная преемственность.*

# STABILIZATION OF FUNCTIONAL CHARACTERISTICS OF COMMUNICATION AND CONTROL SYSTEMS IN TERMS OF REAL-TIME MODE OF OPERATION

© All rights reserved, 2018

**A.V. Merzhvinskij**, Head of Department, e-mail: meralb@mail.ru
**B.M. Popov**, Consultant, e-mail: bmp49@yandex.ru
JSC «Concern «Sozvezdie»

*For systems featuring memory devices that allow for the chaotic behavior and serve as subsystems incorporated into a more sophisticated system (supersystem), the authors offer a method intended to stabilize the system performance by means of the automatic transformation of the chaotic behavior into the hysteresis behavior. Such a transformation is based on the automatic variation of the system structure, which provides logistic flexibility and the ability of fast adaptation to variations of supersystem needs.*

***Keywords:*** *real-time control systems, communication systems, system analysis, hysteresis continuity.*

Действие предлагаемого способа стабилизации характеристик рассматривается применительно к системе связи, реализующей организацию и предоставление услуг связи для транспортных объектов системы управления, функционирующей в режиме реального времени. В этом режиме предоставление связных ресурсов должно не просто соответствовать ритму событий в системе управления, а производиться с реактивностью, превосходящей темп этих событий. Это обстоятельство неизбежно требует превентивного предоставления связных ресурсов, так как задержка их предоставления ведёт к сбою системы управления.

В идеальном варианте предоставление услуг связи для системы управления, функционирующей в режиме реального времени, должно осуществляться мгновенно, без временной задержки на реализацию процесса подготовки требуемого сетевого соединения. В некоторых системах управления с детерминированным числом объектов управления для этого применяется стратегия с предварительным распределением и закреплением каналов связи за транспортными объектами системы управления. При столь жёсткой организации системы связи система управления получает канал связи мгновенно, и предоставление услуг связи здесь является по сути вневремённым (безынерционным). Однако эта стратегия слишком ресурсоёмка, уязвима в плане живучести и, по понятным причинам, не может быть распространена на системы с переменным составом и большим числом объектов управления, охваченных сетью связи, причём такой сетью, которая в общем случае не является полносвязной, но любой её узел можно соединить с любым другим узлом той же сети транзитом через другие узлы этой же сети составным каналом связи, образуемым из простых каналов связи с помощью средств коммутации.

 ISSN 1995-7009

Далее будет показано, что при учёте принципов построения и характера совместного функционирования систем управления и сетей связи представляется возможным нахождение иной стратегии, обеспечивающей непрерывное поддержание системы связи в алертном состоянии (high degree of alert), то есть в состоянии готовности к незамедлительному предоставлению необходимых услуг связи – соединению любых транспортных объектов системы управления.

В классическом системном анализе выделяют четыре типа поведения системы: броуновское – когда каждый элемент системы ведет себя непредсказуемо, хаотически; лапласовское – детерминированное поведение, когда, зная текущее поведение каждого элемента, можно описать все прошлое и все будущее системы, что соответствует системе связи с закреплением каналов; марковское − когда поведение системы зависит от предыдущего состояния, но не зависит от предпредыдущего, иначе говоря, при фиксированном настоящем будущее независимо от прошлого. Поэтому, хотя для марковских цепей разработан мощный математический аппарат, применение этого аппарата к сетям связи, где процессы идут асинхронно и настоящее не фиксируется, неуместно.

Но есть самое сложное поведение – дарвиновское, которое связано с так называемой гистерезисной преемственностью. Состояние системы зависит здесь от предыдущего состояния системы, но от него оно зависит меньше, чем от более ранних состояний (предшествующих предыдущему). Это поведение называется дарвиновским, так как оно характерно для систем живого, и, учитывая, что технологии природы намного превосходят человеческие, оно является наиболее эффективным и не требует специальных средств управления. Под этот четвертый тип поведения пытались создать внятную математическую модель такие математики, как А.Н. Колмогоров [1], но задача оказалась для него непосильной. Методы формального описания гистерезисных преобразователей, которые развивались М.А. Красносельским и его учениками [2], основывались на развитой ими операторной трактовке этих преобразователей – представлении преобразователей как операторов, определённых на достаточно богатых функциональных пространствах, зависящих от своего начального состояния. Но мы рассматриваем функционирование систем в реальном масштабе времени, а реальное время бесконечно и, значит, начального состояния не имеет по определению. Поэтому указанный М.А. Красносельским путь в достаточно богатые функциональные пространства для нас не актуален.

Впрочем, практика показывает, что математический, алгоритмический подход к построению сложных кибернетических систем излишне абсолютизирован. Явление гистерезиса, обнаруженное в различных областях естествознания (физике, механике, биологии, химии), несмотря на отсутствие здесь его строгих моделей, находит широкое практическое применение. В частности, присоединение к природной активности основано на таком основополагающем принципе действия, как принцип разделения эффектов, реализация которого обеспечивается гистерезисным механизмом. Дело в том, что протеканию процессов в природных системах свойственно сначала возникновение импульсного эффекта с выделением энергии, затем, через короткий промежуток времени и иногда в другом месте, эффекта с поглощением энергии. Если их суметь разделить, то можно перенаправить поток природной активности (или активности надсистемы) в нужное для системы русло. Эта задача успешно решается внедрением в систему агентов-преобразователей гистерезисного типа, реализующих накопление с насыщением. В тепловых насосах эту роль выполняет хладагент, в радиоприёмных устройствах – диполь Герца и т. д.

В технике новые производительные силы выявляются отнюдь не благодаря созданию математических теорий и моделей. Так, электричество ещё в середине XVIII века считалось неким трудноуловимым флюидом, но после открытия *лейденской банки* в 1745 году электричество научились накапливать, далее – транспортировать из одной *лейденской банки* в другую и, в конце концов, использовать в промышленных целях и масштабах, и процедура его транспортирования позволила открыть способы получения механических эффектов. И, хотя физическая сущность электричества до сих пор не определена, это не мешает нам его производить и широко использовать. Мы гораздо чаще, чем думаем, применяем методы, не имеющие рационального обоснования. Здесь уместно вспомнить 11-й тезис о Л. Фейербахе [3]: «Философы лишь различным образом объясняли мир, но дело заключается в том, чтобы изменить его». Поэтому нашей целью является не поиск абстрактной объяснительной модели, а нахождение способа автоматической трансформации (изменения) си-

стемы связи, способного без затрат дополнительного ресурса обеспечить непрерывную адаптацию сети к целям надсистемы, без выдачи со стороны надсистемы к системе каких-либо управляющих воздействий.

Особое место среди систем с гистерезисными свойствами занимают экономические системы. Формальное описание в рамках теории систем гистерезисные явления в экономике получили лишь в последние десятилетия [4, 5]. Одна из основных причин этого факта – отсутствие возможности проведения экспериментов в сфере экономики. Поэтому математическое моделирование экономических систем с гистерезисными свойствами в какой-то мере является оправданным. И хотя и здесь, в силу существенной нелинейности процессов, общей модели не создано, получены частные модели функции продаж, представленные как некоторый преобразователь гистерезисного типа, учитывающий предысторию и, что еще более для нас интересно, инертность покупательского спроса. Интерес связан с тем, что наша система связи, рассматриваемая в качестве системы, реализующей предоставление необходимых системе управления услуг связи, в функциональном плане близка к экономическим системам.

Имеется немало экспериментальных результатов, показывающих, что различные нелинейные системы, допускающие хаотическое поведение, могут быть стабилизированы гармоническим внешним воздействием. Но запросы системы управления к системе связи имеют не гармонический, а спонтанный характер, что создаёт предпосылки к хаотичности функциональных характеристик системы связи. И далее будет показано, что и в нашем случае, благодаря наличию инертности в запросах системы управления и присущей системе связи структурной пластичности, система связи способна обеспечить опережающее производство и концентрацию наиболее популярного ресурса и предоставлять соединения системе управления практически мгновенно, в темпе приёма запросов на соединение, по сути – вневремённо.

Факт существования нелинейных систем, допускающих хаотическое поведение, характеристики которых могут быть стабилизированы отнюдь не гармоническим внешним воздействием, продемонстрируем на примере ассоциативного запоминающего устройства (АЗУ), быстродействующей буферной кэш-памяти ограниченного объема. В процессе работы вычислительной системы отдельные программы или блоки информации загружаются из основной (медленной) памяти в кэш-память – в принципе это может быть просто оперативная память на фоне памяти внешних устройств. При обращении к программе или за данными сначала проверяется их наличие в кэш-памяти. Если необходимая информация находится в кэш-памяти, она быстро извлекается. Это кэш-попадание. Если необходимая информация в кэш-памяти отсутствует (кэш-промах), то она выбирается из основной памяти, передается в работу и одновременно заносится в кэш-память. Повышение быстродействия вычислительной системы достигается в том случае, когда кэш-попадания реализуются намного чаще, чем кэш-промахи. Определение наиболее часто используемой информации производится не алгоритмически (это невозможно в силу спонтанности). Сохранение использованной информации в кэш-памяти позволяет «отбирать» информацию, которая чаще всего используется. Метод доказал свою эффективность по факту, так как, несмотря на спонтанность отдельных запросов, любой совокупности запросов свойственна некоторая серийность. Для исключения переполнения кэш-памяти – выбора отбрасываемой записи – используются разные стратегии вытеснения, но они просты и реализуются алгоритмически.

Понятно, что продуктивность управления в системах с броуновским поведением, где какая-либо упорядоченность отсутствует, близка к нулю. Далее будет показано, что системе связи практически без затрат может быть навязано дарвиновское поведение. Лозунг «анархия – мать порядка» имеет в кибернетике сомнительную репутацию, и мы, учитывая, что смена состояния в системе с дарвиновским поведением зависит от предпредыдущего состояния больше, чем от предыдущего, вправе поставить вопрос, а кто «дедушка и бабушка» порядка? Интуитивно понятно, что прапредками порядка в системах с дарвиновским поведением являются симбиоз и инерция. Анализ их действия позволит выявить основополагающий принцип, наделяющий систему «коэрцитивной силой», внутрисистемным свойством, переводящим поведение системы связи из броуновского в дарвиновский (гистерезисный) тип. Симбиоз и инерция являются теми эффектами, разделение которых создаёт условия для стабилизации функциональных характеристик системы связи. Инерции свойственна способность к накопле-

нию, а облигатным признаком симбиоза является развитие используемого ресурса.

Поскольку инерционность проявляется на всех уровнях реальности, то, как показано в [6], благодаря этому обстоятельству можно организовать работу сети так, чтобы ресурс наиболее востребованных соединений в сети концентрировался в нужное время в нужном месте. И такая непрерывная «нормализация» сетевого ресурса – самоактуализация сети – может быть осуществлена без затрат, посредством синтеза без анализа, как бы по инерции, но в симбиозе с системой управления.

Сети связи, как и любые сети, состоят из узлов и соединяющих их линий, а конкретно – из узловых станций (с функциями коммутации) и многоканальных линий связи, соединяющих эти станции. К узловым станциям через оборудование доступа абонентскими линиями подключены терминалы потребителей услуг связи. Сеть в общем случае не является полносвязной, но любой узел сети можно соединить с любым другим узлом той же сети транзитом через другие узлы этой же сети составным каналом связи, образуемым из простых каналов связи с помощью средств коммутации станций. Простой (несоставной) канал представляет собой часть пропускной способности линии связи, напрямую соединяющей два узла. Сетевые станции, имеющие общий канал сигнализации, при организации соединений оперируют не только простыми каналами, но и уже имеющимися их агрегациями (соединениями), представляя их рекурсивно: деталь для построения соединения – это 1) простой канал, а также 2) деталь для построения соединения, к которой подключён простой канал.

Созданные соединения не следует разрушать после освобождения, а по аналогии с механизмом кэш-памяти предлагается сохранять для повторного использования до тех пор, пока не понадобятся одиночные транзитные участки этих составных каналов (или совокупности, состоящие из уже соединённых одиночных участков) для образования новых составных каналов – соединений для удовлетворения новых предпочтений потребителей. В порядке соблюдения принципа дарвиновского отбора, при дефиците простых каналов, нужных для образования нового соединения, разрушению следует подвергать последние по времени образования соединения, ибо при высокой серийности все новации, влекущие реорганизацию, идут от маргинальных пользователей, а мейнстрим эксплуатирует организованные ресурсы. В результате такой стратегии, за счёт большей инерционности (активности) предпочтений тех или иных пользователей (транспортных объектов), возникает фильтрующий (вырезающий) «медленный» процесс концентрации пропускной способности на наиболее востребованных направлениях связи, обеспечивается накопление ресурса сетевых соединений между наиболее активными транспортными объектами для работы в наиболее востребованных направлениях связи. Данный «вырезающий процесс» действует как оператор гистерезисного типа и имеет консервативный характер, не требует для своей реализации какого-либо ресурса. Однако результат его действия имеет предметно-физическую специфику, поскольку, несмотря на свою медленность, он способен на опережающее приведение структуры сети связи в актуальное (алертное) для системы управления состояние. Отметим, делает он это непрерывно, поскольку актуальность изменчива, и никакая комбинация структур сети не может быть объявлена заранее окончательно актуальной. При резкой вариации предпочтений потребителей в коммутационном пространстве сети неактуальные структуры (соединения) автоматически исчезают, а актуальные − порождаются, как происходит в природе при действии дарвиновского «естественного отбора».

Важно отметить, что для получения столь существенного преимущества, имеющиеся принципы и методы реализации сетей связи не подлежат коренному пересмотру.

### *Заключение*

Таким образом показано, что при наличии некоторой стабильности предпочтений пользователей инфокоммуникационной сети к работе в тех или иных направлениях связи сохранение использованных соединений как следов их деятельности снимает априорную неопределённость и обеспечивает непрерывное действие механизма опережающей адаптации сетевых структур к вариациям в тематике и интенсивности пользовательских запросов. При этом и со стороны надсистемы не требуется ни контроля состояния, ни выдачи каких-либо управляющих воздействий.

Представляется, что данный подход может найти применение и в области проектирования

устройств с приставкой «нано», ибо приставка «нано» − не простая характеристика протяженности, отражающей чисто геометрические параметры объектов. Она отражает факт проявления на наноуровне качественно иных *организационно-функциональных-системных* свойств материалов, процессов и явлений, и здесь использование принципов, подходов и технологий природоподобной самоактуализации в условиях невозможности внешнего управления оказывается уместным.

Предложенный подход имеет корреляцию с понятием из классического системного анализа − «телеологические механизмы», – характеризующим материальный механизм через использование понятия «циклическая причинность», наблюдаемого в системе, где новые формы поведения посредством «обратной связи» находятся под влиянием прежних форм.

***Литература***

1. *Колмогоров А.Н.* Теория информации и теория алгоритмов. М.: Наука,1987.

2. *Красносельский М.А., Покровский А.В.* Системы с гистерезисом. М., 1983.

3. *Маркс К.* Экономическо-философские рукописи 1844 года и другие ранние философские работы. М.: Академический Проект, 2010.

4. *Семенов М.Е.* Математическое моделирование устойчивых периодических режимов в системах с гистерезисными нелинейностями. Воронеж: Издательство ВГУ, 2002. 104 с.

5. *Абополова Е.А., Кабулова Е.Г., Мишин М.Ю., Семёнов М.Е.* Динамическая модель рыночного равновесия в условиях гистерезисного поведения экономических агентов // Современная экономика: проблемы и решения. 2012. №7 (31). С. 146–155.

6. *Мержвинский А.В., Попов Б.М.* Технология самоактуализации сетей связи в режиме, опережающем режим реального времени системы управления // Теория и техника радиосвязи. 2018. № 1. С. 27–33.

Статья поступила в редакцию 13 марта 2018 года

УДК 621.396.4

# КЛЮЧЕВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ГРАЖДАНСКИХ РАДИОТЕХНОЛОГИЙ В АО «КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

© Автор, 2018

**В.В. Солопов**, начальник отдела, АО «Концерн» Созвездие», e-mail: vvs@sozvezdie.su

*Проведён анализ компетенций концерна по разработке и производству высокотехнологичной продукции гражданского назначения в рамках диверсификации деятельности предприятий ВПК в связи с ожидаемым существенным сокращением объёмов госзакупок. Предложены три направления выпуска высокотехнологичной гражданской продукции. Приведены актуальные данные по техническим параметрам и технологическим особенностям для трёх сегментов гражданских радиотехнологий, предлагаемых для освоения в концерне. Рассмотрены технологические особенности и тенденции развития каждого из трёх направлений. Предложен принцип проведения работ по диверсификации и коммерциализации производства гражданского направления. Рассмотрены и проанализированы различные комплексные проекты (бизнес-кейсы), а также виды продукции и основные потребители для каждого из направлений гражданских радиотехнологий.*

***Ключевые слова:*** *инновационное развитие, диверсификация, мобильная радиосвязь, цифровая обработка сигналов, промышленный интернет вещей, широкополосный беспроводный доступ, автоматизация, мониторинг.*

# KEY TRENDS IN DEVELOPMENT OF RADIO COMMUNICATION TECHNOLOGIES FOR CIVIL APPLICATIONS AT CONCERN «SOZVEZDIE»

© All rights reserved, 2018

**V.V. Solopov**, Head of Department, JSC «Concern «Sozvezdie», e-mail: vvs@sozvezdie.su

*The article represent a complete analyses of concern's competencies in development and production of high-tech products for civil applications under the program of diversification of defense contractors in connection with the expected considerable government procurement phase-out. The author offers three key trends in production of high-tech equipment for civil applications. Additionally, the article contains up-to-date data on technical parameters and technological features for three segments of non-military radio communication solutions to be implemented by the concern. The author has reviewed technological features and tendencies for development of each three trends. The author offers a concept of diversification and commercialization of production for civil applications, including the review and analysis of different complex projects (business cases) and types of products and key consumers for each of the trends in development of radio communication technologies for civil applications.*

***Keywords:*** *innovative development, diversification, mobile radio communication, digital signal processing, Industrial Internet of Things, broadband wireless access, automation, monitoring.*

Основной движущей силой современной экономики в мире является инновационное развитие, скорость которого в последнее время экспоненциально растет. Характерной чертой современного общества является высокий уровень развития информационных и телекоммуникационных технологий и их интенсивное использование органами государственной власти, бизнес-сообществом и гражданами. Отрасль инфокоммуникационных технологий (ИКТ) меняется с каждым днём, внедряются новые технологии, новые услуги и новые операционные модели работы операторов связи.

В Российской Федерации в 2017 году принят ряд документов стратегического планирования, предусматривающих меры, направленные на стимулирование развития ИКТ и их использование в большинстве отраслей экономики. Это прежде всего государственная программа «Цифровая экономика», принятая 28.07.2017 г. [1], предполагающая внедрение сквозных технологий промышленного интернета в большинстве отраслей экономики, «Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года», «Стратегия развития отрасли информационных технологий в Российской Федерации на 2014–2020 годы и на перспективу до 2025 года», «Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации», дорожная карта «Развитие отрасли информационных технологий», Государственная программа Россий-

ской Федерации «Информационное общество (2011–2020 годы)».

В течение всего периода преобразований цифровизация коснётся всех сфер экономики, бизнеса и государственного управления. Данный процесс создаёт основу будущей цифровой экономики, которая приведёт к повсеместной интеллектуализации всех аспектов экономики государства и социальной сферы.

Наиболее заметными тенденциями последующих десятилетий будут *цифровизация, информатизация, большие данные* и *искусственный интеллект*, которые позволят автоматизировать все управленческие и технологические процессы и внедрить интеллектуальные функции реального времени для поддержки режимов самовосстановления, самонастройки и способности активного и интеллектуального реагирования на изменяющиеся рыночные условия и кризисы. В таком меняющемся мире будут успешными только те компании, которые основаны на модели открытости и сотрудничества.

Оборонные предприятия России должны использовать накопленный инновационный потенциал для конверсии, диверсификации производства и выпуска высокотехнологичной продукции гражданского назначения [2].

На протяжении всего советского периода Концерн «Созвездие», ранее называемый Воронежский НИИ связи (ВНИИС), был головным предприятием отрасли по созданию систем и средств сухопутной и морской подвижной радиосвязи гражданского назначения. Одной из первых в мире во ВНИИСе была разработана радиотелефонная система общего пользования «Алтай», введённая в эксплуатацию в Москве в 1963 г. и ставшая прообразом сотовых систем связи.

Во ВНИИСе была разработана система радиосвязи «Транспорт» для нужд Министерства путей сообщения (в настоящее время – РЖД), в которой было 4 подсистемы и более 40 модификаций унифицированной аппаратуры.

Были разработаны системы ведомственной мобильной радиосвязи «Лен», «Колос», «Маяк», «Виола», «Акватория» и др. В СССР значительное внимание уделялось разработкам радиальнозоновых систем связи – «Волемот», «Заря», аналоговых сотовых систем «Союз-СПР» (аналог стандарта NMT-450), радиоудлинителям телефонных линий «Лес», «Нива», а также радиорелейным системам миллиметрового диапазона, таким как «Луч» и др. Всего по документации ВНИИС было произведено около 2 млн. радиостанций народнохозяйственного назначения.

В последние годы (в период 2008–2011 гг.) было разработано и налажено серийное производство оборудования AstraMAX для построения сетей широкополосного беспроводного доступа (ШБД) на базе технологии мобильного WiMAX. В настоящее время в Концерне «Созвездие» работы по гражданской тематике прекращены, и Концерн практически полностью выведен с рынка продукции мобильной радиосвязи гражданского назначения.

Тем не менее, Концерн «Созвездие» обладает всеми необходимыми компетенциями по разработке и производству высокотехнологичной продукции гражданского назначения. Концерн «Созвездие» является предприятием полного цикла (разработка, производство, сопровождение жизненного цикла продукции) и располагает квалифицированными научно-техническими, производственными и управленческими кадрами, а также технологическим и производственным оборудованием, лицензионным программным обеспечением и инфраструктурой, необходимыми для разработки и производства высокотехнологичной продукции в сфере гражданских радиотехнологий.

Функциональные и конструктивные требования к изделиям гражданского назначения в части кибербезопасности и помехозащищённости, возможности организации распределённых сетевых структур, обеспечения гарантированной задержки передачи, устойчивости к климатическим и механическим воздействиям, воздействиям агрессивных сред, искробезопасности, надёжности и бесперебойности функционирования во многом аналогичны освоенной в концерне технологии производства радиосредств военного назначения, и данная технология может быть использована при производстве изделий гражданского назначения.

Для конверсии, диверсификации производства и перехода на выпуск высокотехнологичной продукции гражданского назначения в Концерне «Созвездие на научно-техническом совете от 12 июля 2017 г. выбраны следующие направления:

- Профессиональная мобильная радиосвязь.
- Промышленный интернет вещей для различных отраслей.
- Широкополосный беспроводный доступ (Wi-Fi, LTE, 5G).

Проведение работ по диверсификации и коммерциализации производства гражданского направления должны выполняться в Концерне «Созвездие» по принципу создания для каждого из направлений *центров сквозных технологий,* объединяющих следующие этапы:

- разработка продуктовых линеек;
- изготовление оборудования;
- системное проектирование бизнес-кейсов для различных отраслей и применений;
- поставка оборудования;
- сопровождение жизненного цикла изделий;
- техническая поддержка.

Рассмотрим подробно каждое из направлений гражданских радиотехнологий.

## *1. Профессиональная мобильная радиосвязь*

### *1.1. Технологии и тенденции развития систем профессиональной мобильной радиосвязи*

Под профессиональной мобильной радиосвязью (ПМР) понимается система сухопутной подвижной радиосвязи, которая используется ограниченными группами пользователей, объединёнными по профессиональному признаку. Это могут быть сети оперативного, диспетчерского, административно-хозяйственного, производственно-технологического и аналогичного назначения. Они используются силовыми структурами и правоохранительными органами, аварийными и муниципальными службами, энергетическими, транспортными и производственными предприятиями и т. д. Именно поэтому сети ПМР часто называют ведомственными и корпоративными сетями радиосвязи.

Технологическое пространство цифровых стандартов ПМР в Российской Федерации представлено следующим образом:

1. Стандарт **TETRA**. На территории РФ он внедряется с 2002 г., до недавнего времени занимал первое место по количеству абонентов цифровых стандартов ПМР.

2. Стандарт **DMR** находится на втором месте и в ближайшее время, по оценкам аналитиков, опередит стандарт TETRA. Это связано с многими факторами. Во-первых, сетевое и абонентское оборудование DMR дешевле; во-вторых, выпускается в стандартных ПМР-диапазонах частот (150, 400 МГц); в-третьих, позволяет работать и в цифровом, и в аналоговом режиме, что особенно важно, когда потребитель хочет перевести существующую аналоговую сеть на цифровую; в-четвертых, может работать как в симплексном режиме, так и в полудуплексном/дуплексном. В последней версии стандарта DMR реализована функциональность транкинговых систем ПМР.

3. Стандарт **APCO-25,** североамериканский стандарт, который не получил широкого распространения в системах гражданского назначения РФ. Он применяется только в отдельных сетях подвижной радиосвязи МВД в некоторых регионах России, ФСО, а также в сети Каспийского трубопроводного консорциума.

4. Стандарт **GSM-R** разработан Европейским институтом стандартов электросвязи (ETSI) для систем радиосвязи и управления железнодорожным движением. В РФ он развернут на Калининградской железной дороге. Также введена в эксплуатацию система стандарта GSM-R на некоторых участках Северокавказской и Октябрьской железных дорог.

В Концерне «Созвездие» принято решение разрабатывать и внедрять стандарт DMR (Digital Mobile Radio), разработанный ETSI как единый общеевропейский стандарт цифровой профессиональной радиосвязи. Стандарт DMR является открытым, и документация стандарта DMR находится в открытом доступе на сайте ETSI [3]:

- ETSI TR 102 398 DMR General System Design (общее описание системы),
- ETSI TS 102 361-1 DMR Air Interface Protocol (протокол радиоинтерфейса),
- ETSI TS 102 361-2 DMR Voice and Generic Services (голосовые и основные услуги),
- ETSI TS 102 361-3 DMR Data Protocol (протокол передачи данных),
- ETSI TS 102 361-4 DMR Trunking Protocol (протокол транкинговой связи).

Любой производитель имеет возможность скачать стандарт с сайта ETSI и на основании своего собственного комплекта КД начать производство оборудования DMR. Для проверки совместимости оборудования различных производителей имеется ряд сертифицированных лабораторий, которые выдают сертификат совместимости, и оборудование признаётся соответствующим стандарту DMR.

В основе технологии DMR лежат механизмы TDMA (Time Division Multiple Access – многостанционный доступ с временным разделением каналов), что позволяет разместить два временных интервала на одной несущей частоте с сеткой 12,5 кГц.

#### *1.1.1. Радиоинтерфейс DMR*

Структура радиоинтерфейса стандарта DMR представлена на рис. 1.2 [4]. На одном частотном канале (12.5 кГц) построены два независимых TDMA канала (тайм-слота).

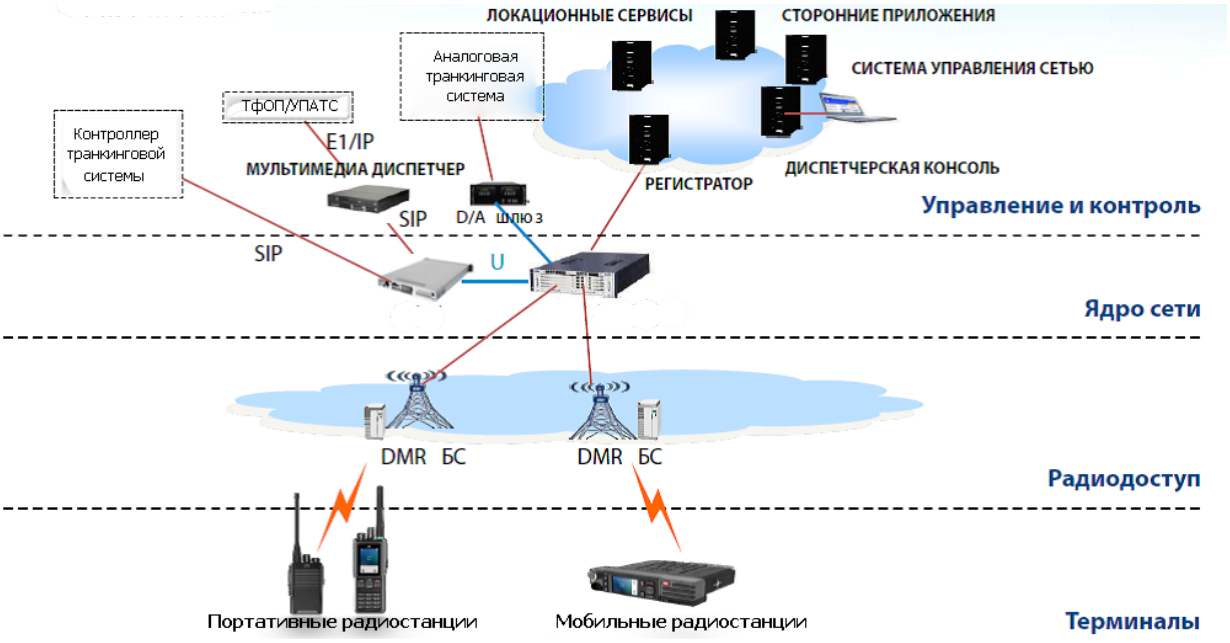



Рис. 1.1. Структурная схема системы ПМР, построенной на оборудовании DMR

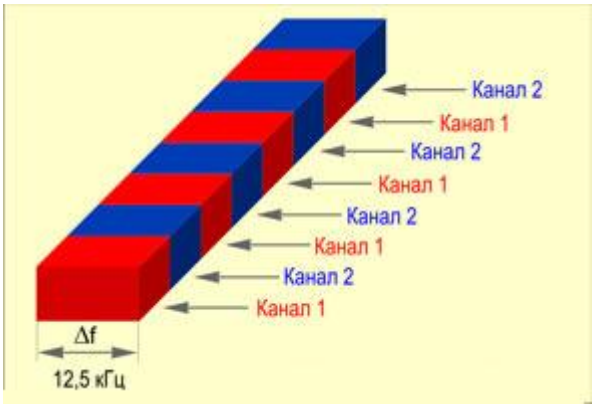



Рис. 1.2 Структура радиоинтерфейса DMR

В рамках стандарта DMR предполагается реализация двух режимов работы: режим прямой связи без ретранслятора – симплексная связь (Direct mode), режим связи через ретранслятор (Repeater mode) (рис. 1.3) – с поддержкой технологии двухчастотного симплекса с дуплексным разносом (FDD – Frequency Division Duplex). Во втором режиме возможны два одновременных независимых голосовых соединения на одном частотном канале. При этом задействуются оба логических TDMA канала, что позволяет вести два независимых соединения.

Следует отметить, что в режиме прямой связи (без использования ретранслятора) в настоящее время задействуется лишь один логический канал из двух доступных. В этом случае преимущества прямого режима по отношению к аналоговому режиму в части увеличения канальной ёмкости не будет.

### *1.1.1. Качество речи в стандарте DMR*

Основное требование к системе ПМР – надёжная, качественная голосовая связь. В системе DMR применяется вокодер, использующий алгоритм линейного предсказания с алгебраическим кодовым возбуждением (ACELP), который хорошо адаптирован для использования в условиях сильных акустических помех. Для обнаружения ошибок при передаче в канале радиосвязи и их исправления в канальном кодировании применяется технология прямой коррекции ошибок – Forward Error Correction (FEC).

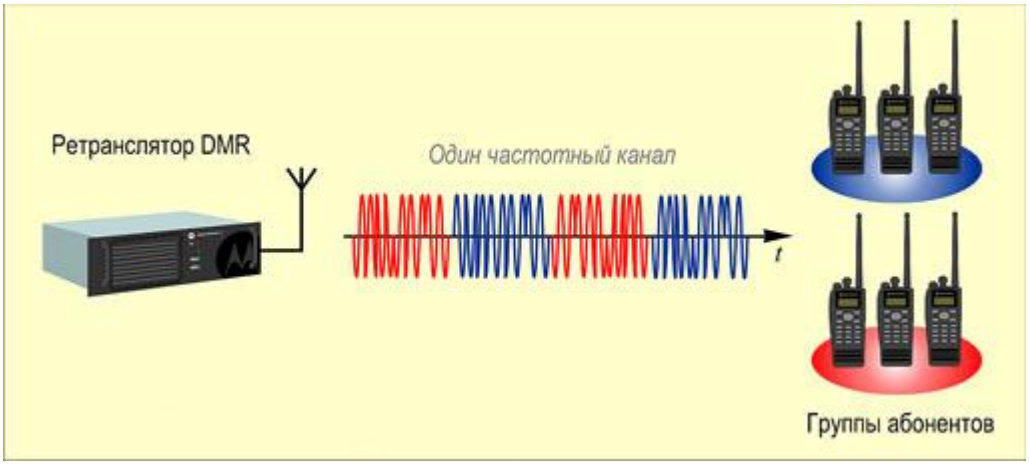



Рис. 1.3. Схема организации связи в стандарте DMR через ретранслятор

Кроме того, речевой вокодер, используемый в стандарте DMR, содержит функцию подавления фонового шума. Поэтому внешние акустические шумы по радиоканалу не передаются, и принимающая сторона их не слышит. На рис. 1.4 представлен сравнительный график качества речи в зависимости от расстояния для систем с аналоговой и цифровой технологиями. Из рис. 1.4 видно, что для заданного минимального приемлемого качества речи цифровая система имеет преимущество и в качестве речи, и в покрытии.

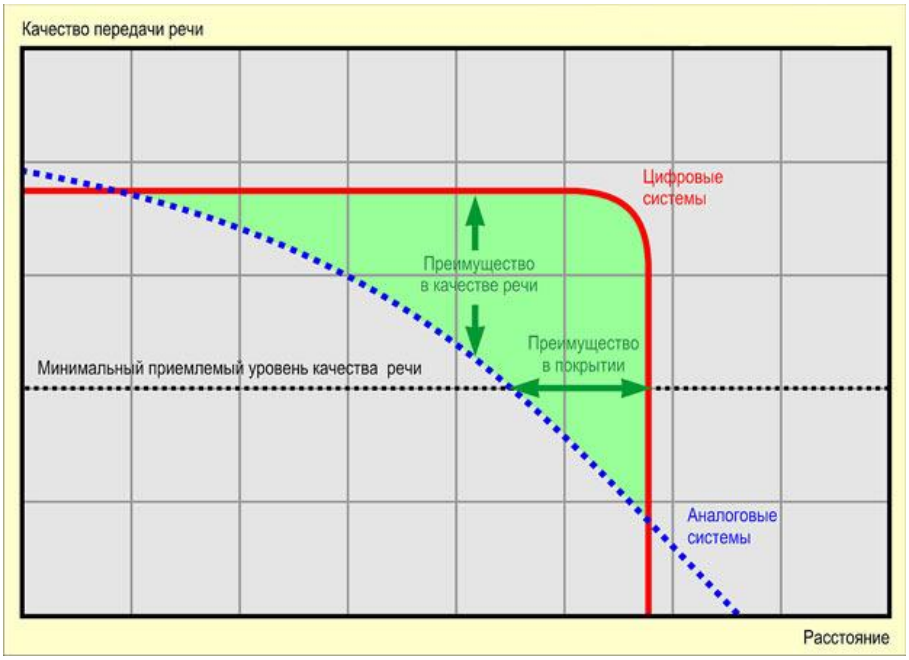



Рис. 1.4. Зависимость качества речи от расстояния в аналоговой и цифровой системах

*1.1.2. Основные функциональные возможности стандарта DMR*

В рамках стандарта DMR реализованы следующие типы вызовов:

- индивидуальный вызов «радиоабонент – радиоабонент»;
- групповой вызов «радиоабонент – группа радиоабонентов»;
- групповой вызов «радиоабонент – все радиоабоненты»;
- передача пакетных данных с канальной скоростью 2 кбит/с.

Стандарт DMR отличает быстрое установление вызова (до 200 мс) и поддержка режима «поздний вход» для групповых вызовов.

Стандарт DMR постоянно совершенствуется в рамках ETSI, реализуя расширенные функциональные возможности ПМР. К основным функциональным возможностям цифрового стандарта DMR следует отнести:

- цифровую обработку сигнала;
- управление расходом аккумуляторной батареи;
- приоритетный аварийный вызов;
- улучшенный режим «свободные руки»;
- встроенный приёмник GPS сигналов для реализации приложений по контролю местоположения;
- удалённое управление;
- одновременную передачу голоса и данных;
- работу в аналоговом режиме, что особенно актуально при постепенной миграции аналоговых систем ПМР к цифровым.

### *1.1.3. Возможные пути эволюции ПМР*

Анализ показывает [5], что системы ПМР прошли несколько этапов развития: переход от аналоговых к цифровым системам, расширение возможностей таких стандартов, как DMR, по передаче данных и пр. Дальнейшая эволюция сетей ПМР будет связана с повышением качества и быстродействия, внедрением новых сервисов, в том числе передачи данных.

Такие сети в перспективе должны обеспечивать новый уровень обслуживания пользователей и в сфере безопасности, и в корпоративной среде; они должны связать широкополосными каналами сотрудников с базами данных компаний и организаций, с интегрированными системами контроля и видеонаблюдения. Это станет возможным как за счёт развития традиционных стандартов ПМР, так и за счёт привлечения для нужд профессиональной радиосвязи технологий, изначально ориентированных на предоставление мобильных услуг для массового рынка.

В среднесрочной и долгосрочной перспективе (по прогнозам, к 2025 году) в системах профессиональной радиосвязи ожидается переход к системам пакетной передачи по IP-протоколу (концепция All-over-IP), которые обеспечат передачу голоса и данных по пакетным сетям с гарантированным качеством. В этом случае потребность в отдельных сетях цифровой радиосвязи, ориентированных на передачу голоса и не обеспечивающих достаточную скорость передачи данных, отпадёт. В качестве наиболее вероятного кандидата на возможную замену стандартов ПМР в среднесрочной и долгосрочной перспективе рассматривается технология LTE (рис. 1.5).

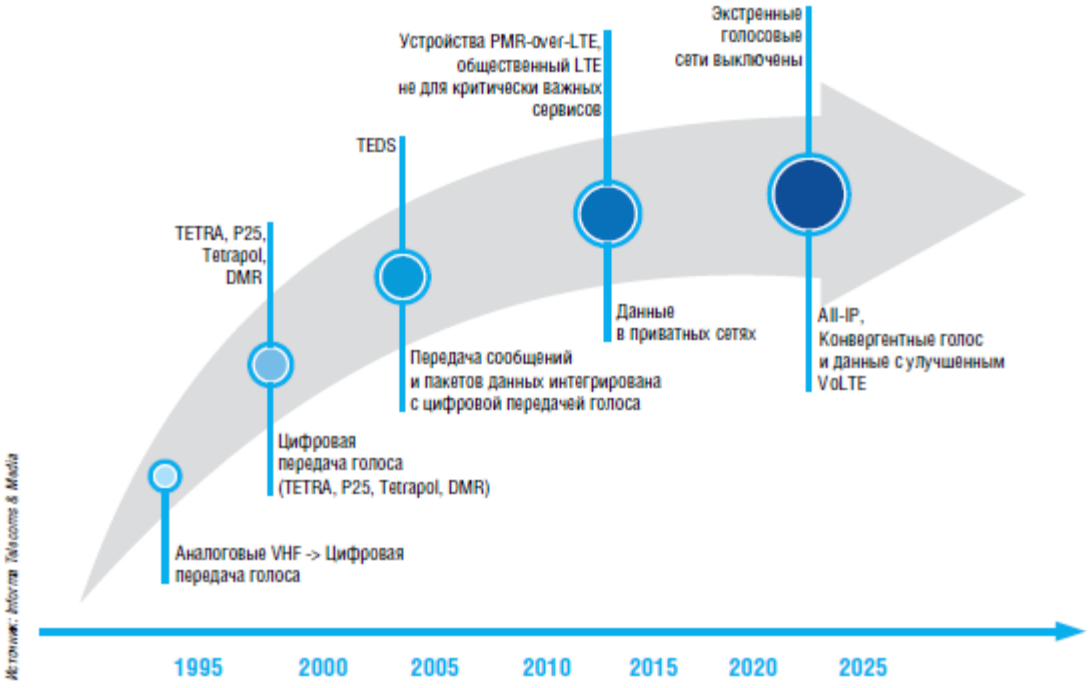



Рис. 1.5. Эволюция технологий ПМР

Однако в нынешнем стандарте LTE, планируемом к использованию в качестве стандарта ПМР, и в особенности экстренными службами, пока не решены следующие вопросы (см. рис. 1.6):

- быстрый вызов (ответ на вызов в течение 0,2 с);
- вызов абонента одной кнопкой (Push-to-Talk);
- высококачественный голосовой канал в IP-канале;
- подавление фоновых шумов;
- шифрование на уровне радиоинтерфейса;
- приоритетность вызовов;
- возможность осуществления экстренной связи даже в случае занятости всех ресурсов сети;
- групповой звонок и широковещание;
- одновременная работа через БС и напрямую;
- звонки с терминала на терминал без участия базовой станции.

И хотя данный функционал возможно обеспечить в виде OTT-сервисов поверх протокола IP в уже существующем стандарте LTE, например на коммерческих сетях сотовых операторов, надёжность и эффективность таких решений оказывается ниже жёстких требований международного стандарта профессиональной связи PPDR. По этой причине 3GPP (организация – разработчик стандарта LTE) инициировала доработку спецификаций стандарта LTE в целях поддержки на сетях 4G функциональности ПМР. Ожидается, что 12-й релиз LTE сохранит все преимущества стандарта LTE, добавив к ним все специальные функции, требуемые системами связи для чрезвычайных ситуаций. Отдельно оговорена необходимость в максимальной степени обеспечить техническую общность между коммерческими и специальными сетями, что создаст условия, способствующие выработке для обеих систем наиболее технически продвинутых и экономически эффективных решений.

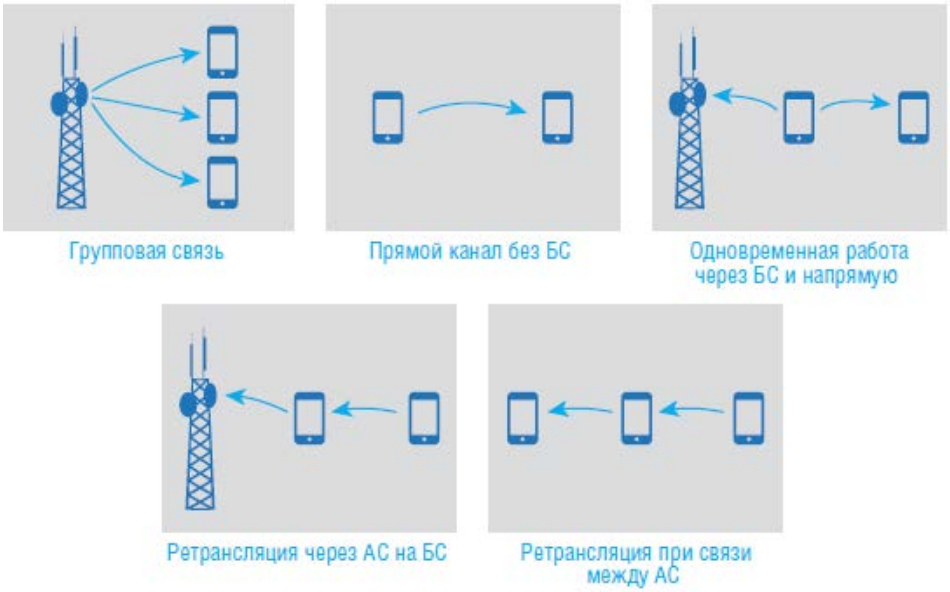



Рис. 1.6. Расширение функционала LTE для использования ПМР экстренными службами

## *1.2. Комплексные проекты (бизнес-кейсы) ПМР, виды продукции и основные потребители*

### *1.2.1. Исходные данные для анализа бизнес-кейсов и потребителей сегмента ПМР*

Развитие профессиональной подвижной связи, в первую очередь, связано с удовлетворением потребностей органов общественной безопасности и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. Органы общественной безопасности и помощи при чрезвычайных ситуациях играют важнейшую роль в жизни общества. К организациям общественной безопасности (или службам экстренной помощи) относятся полиция, служба пожарной охраны, служба здравоохранения, скорая помощь и служба ГОЧС.

Основными потребителями ПМР являются следующие три сегмента:

- государственный сегмент,
- корпоративный сегмент,
- сегмент малого и среднего бизнеса.

Рассмотрим подробно каждый из сегментов.

### *1.2.2. Государственный сегмент*

Крупнейшие потребители государственного сегмента ПМР приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

| Службы | Численность, чел. |
|---|---|
| Росгвардия [6] | 340 000 |
| МВД РФ (без муниципальной полиции) [7] | 1 032 884 |
| МЧС РФ [8] | 288 565 |
| Скорая помощь Минздрава РФ | 150 000 |
| ФСИН РФ[9] | 296 000 |
| ФССП РФ[10] | 74 559 |
| ФСО РФ | 25 000 |
| Погранслужба | 120 000 |
| Таможенная служба | 68 000 |
| ФСКН (наркоконтроль) | 40 000 |
| Налоговая служба | 166 000 |
| Городские и районные администрации, диспетчерские службы (водоканал, газ), энергетические службы и др.) | 170 000 |
| **Итого** (включая муниципальную полицию) | 3 075 000 |

Крупнейшими потребителями корпоративного сегмента ПМР являются следующие предприятия крупного бизнеса:

- системообразующие добывающие предприятия нефтегазовой отрасли, включая трубопроводный транспорт (нефтепроводы и газопроводы);
- другие предприятия в сфере добычи полезных ископаемых (угледобывающие предприятия, песчаные, каменные и прочие карьеры, месторождения полезных ископаемых и пр.);
- предприятия нефтехимической промышленности;
- металлургические предприятия;
- предприятия сферы производства и распределения энергии, газа и воды (основными потребителями являются водоканалы, атомные электростанции, энергосбытовые компании, теплосети и пр.);
- транспортные предприятия, включая
  - ОАО «РЖД», метрополитены;
  - аэропорты;
  - морские и речные порты;
  - крупные автомобильные перевозчики;
- крупные банки (Сбербанк, ВТБ и др.) и службы инкассации.

По оценкам, общая численность потребителей в корпоративном сегменте составляет 1 800 000 пользователей.

### *1.2.3. Сегмент предприятий малого и среднего бизнеса*

Для предприятий малого и среднего бизнеса услуги ПМР, как правило, предоставляют коммерческие операторы ПМР. К сегменту предприятий малого и среднего бизнеса относятся:

- службы такси, экспедиторские и курьерские службы;
- частные охранные предприятия;
- строительные компании;
- другие компании СМБ.

По оценкам, общая численность потребителей ПМР в сегменте среднего и малого бизнеса составляет 1 200 000 пользователей.

Суммарное расчётное количество потребителей государственного, корпоративного и сегмента СМБ составляет 5,8 млн. чел. В расчёте принято, что на двух сотрудников указанных служб будет приходиться одна радиостанция ПМР с учётом замены оборудования каждые 4–5 лет.

Комплексные проекты (бизнес-кейсы) ПМР представляют собой в соответствии с рис. 1.1 поставки абонентских станций (возимых и носимых), базовых станций и ретрансляторов (ядро сети), а также инфраструктурного оборудования (шлюзов, сервис-приложений).

### *1.2.4. Рыночный потенциал сегмента профессиональной мобильной радиосвязи России*

С учётом исходных данных рыночный потенциал сегмента ПМР России на период до 2030 г. составляет 1245 млн. рублей.

В табл. 1.2 приведены данные по рыночному потенциалу сегмента ПМР России на период до 2030 года.

Таблица 1.2

| | Год | | |
|---|---|---|---|
| | 2018–2020 | 2021–2025 | 2025–2030 |
| АС госсегмент (тыс. шт.) | 1 080 | 1 800 | 2 700 |
| АС корпоративный сегмент (тыс. шт.) | 1 760 | 2 650 | 3 720 |
| БС (тыс. шт.) | 47 | 74 | 107 |
| Рынок, млн. руб.<br>(в среднем в год) | 257 200<br>64 300 | 404 300<br>80 860 | 584 520<br>116 900 |

## *2. Промышленный интернет вещей*

### *2.1. Технологии и тенденции систем промышленного интернета вещей*

Современная концепция *цифровой экономики* подразумевает, что телекоммуникационные решения будут использоваться не только для общения «человек–человек», но и «человек–машина» и «машина–машина». В ближайшие годы ожидается интенсивное развитие *интернета вещей* (Internet-Of-Things – IoT) в мире и его проникновение во все сферы жизни, в том числе в бизнес и частную жизнь.

На следующем этапе развития концепции интернета вещей процесс объединения устройств и сетей перейдёт от масштаба города в масштаб страны, а затем в масштаб планеты. Сети, связывающие отдельные мегаполисы и страны, объединяются в глобальную «сеть сетей».

Завершающим этапом развития данной концепции станет «интернет всего», или «всеобъемлющий интернет», который позволит подключить ко всемирной сети буквально все, что только возможно.

Интернет вещей сегодня представляет из себя сеть слабо связанных между собой разрозненных сетей, каждая из которых имеет свое специфическое назначение. Для каждого типа взаимодействия между сетями используются свои стандарты передачи данных (например, CoAP, ETSI SmartM2M, MQTT, LWM2M). По мере развития интернета вещей разрозненные сети будут объединяться в более связную сеть и стимулировать унификацию и стандартизацию протоколов и коммуникационных решений [11].

Сегодня к Интернету подключено 10 млрд. устройств. Ожидается, что к 2020 г. их количество составит 50–60 млрд. Резко возрастёт объём передаваемых данных, и потребуются аппаратные и программные средства для обработки и хранения такого объёма данных. В 2020 г. объём информации в мире достигнет 44 зеттабайт (1 зеттабайт = $10^{21}$ байт), при этом большая часть этого объёма будет создаваться датчиками и сенсорами без участия человека.

Российский объём информации в 2020 г. аналитики оценивают в 980 экзабайт (2,2% мирового объёма). Для обозначения совокупности подходов, методов и инструментов обработки таких объёмов данных появился специальный термин «большие данные» – Big Data. Особую актуальность вопрос больших данных приобретает с свете принятого «закона Яровой». По оценкам специалистов, объём затрат на построение инфраструктуры центров обработки данных (ЦОД) для обеспечения указанного закона может составить от 3 до 200 млрд. долл. США.

### *2.2. Бизнес-кейсы промышленного интернета вещей, виды продукции и основные потребители*

Внедрение технологий индустриального интернета вещей нацелено на повышение безопасности промышленных предприятий, снижение аварийности, издержек и технологических потерь, ликвидацию неэффективного и нецелевого расходования ресурсов и использования техники, оптимизацию бизнес-процессов, снижение экологической нагрузки, повышение культуры труда и уровня обслуживания. Применение оборудования отечественной разработки позволит качественно поднять уровень обеспечения кибербезопасности при реализации комплексных решений индустриального интернета вещей.

По мнению аналитиков компании J’son & Partners Consulting [12], внедрение современных инфокоммуникационных технологий в производственные процессы способствует практическому решению таких важнейших задач, как:

- рост рентабельности производства;

- повышение производительности оборудования;
- снижение материальных и энергетических затрат;
- оптимизация трудозатрат персонала;
- улучшение условий труда персонала;
- повышение качества выпускаемой продукции;
- рост конкурентоспособности на глобальном рынке.

Рассмотрим несколько направлений развития комплексных решений (бизнес-кейсов) индустриального интернета вещей.

### *2.2.1. Бизнес-кейс IoT для РЖД*

Разработка, внедрение и обслуживание линейки телекоммуникационного оборудования специального назначения для реализации комплексных решений индустриального интернета вещей в ОАО «РЖД» в сферах мониторинга инфраструктуры железных дорог, подвижного состава, грузов и специальной техники, автоматизации управления движением, автоматизации пассажирских и грузовых терминалов, депо и предприятий в рамках реализации проекта «Цифровая железная дорога»:

- мониторинг состояния рельсовых путей, дорожного полотна, грунтов, мостов, тоннелей и других элементов основной инфраструктуры железных дорог;
- автоматизация управления движением;
- мониторинг местоположения и состояния подвижного состава, грузов, ремонтной, диагностической и другой подвижной техники, включая автомобильную и строительную технику;
- автоматизация пассажирских и грузовых терминалов, в том числе мультимодальных, контейнерных и технологических складов, хранилищ жидких и сыпучих грузов и материалов;
- автоматизация технологических процессов и инфраструктуры депо, ремонтных и производственных предприятий, учебных, научных, рекреационных и спортивных объектов, включая автоматизацию систем безопасности, освещения, вентиляции, электро-водо-теплоснабжения;
- разработка и внедрение комплексных решений автоматизации, технический консалтинг, обучение персонала, клиентская поддержка, ремонт, модернизация, аренда.

*Номенклатура продукции бизнес-кейса IoT для РЖД*

Линейка телекоммуникационного оборудования (в том числе программно-определяемого) специального назначения для реализации комплексных решений индустриального интернета вещей для РЖД включает следующие продукты:

- встраиваемые телекоммуникационные модули для установки в контрольно-измерительные приборы, контроллеры и исполнительные устройства отечественного производства;
- внешние телекоммуникационные адаптеры для подключения к контрольно-измерительным приборам, контроллерам и исполнительным устройствам любых производителей;
- контроллеры и шлюзы телекоммуникационных сетей индустриального интернета вещей объектового уровня и уровня предприятия;
- программное обеспечение планирования, настройки, администрирования и сопряжения телекоммуникационных сетей индустриального интернета вещей с автоматизированными системами управления и системами обработки «больших данных».

### *2.2.2. Бизнес-кейс IoT для нефтегазовой промышленности*

Бизнес-кейс индустриального интернета вещей для нефтегазовой промышленности включает в себя следующие базовые компоненты:

- сенсоры и исполнительные устройства, имеющие подключение в выделенную сеть или в публичную сеть Интернет и способные взаимодействовать с различными специализированными облачными сервисами IoT;
- открытые аналитические платформы IoT и специализированные сервисы IoT на их основе;
- библиотеки открытых интерфейсов прикладного программирования (API), позволяющих интегрировать специализированные сервисы IoT с другими облачными сервисами.

### *2.2.3. Виды продукции индустриального интернета вещей*

**Модули:** специальные встраиваемые радиомодули для установки в контрольно-измерительные приборы и промышленные контроллеры отечественного производства

**Адаптеры:** внешние преобразователи для подключения к беспроводным сетям стандартных контрольно-измерительных приборов (WirelessHART, LoRaWAN, LPWAN)

**Контроллеры:** контроллеры полевых сетей объектового уровня с поддержкой международных стандартов связи промышленного интернета вещей (WirelessHART, ISA 100.11a, LTE-M)

**Шлюзы**: шлюзы и маршрутизаторы опорных беспроводных сетей уровня предприятия с поддержкой международных телекоммуникационных стандартов (Wi-Fi, LTE/5G)

**ПО:** программное обеспечение планирования, настройки и администрирования сетей индустриального интернета, сопряжения с АСУ ТП и обработки «больших данных»

**Услуги:** разработка и внедрение комплексных решений автоматизации производственных процессов, технический консалтинг, обучение персонала, клиентская поддержка, ремонт, модернизация, аренда

*2.2.4. Основные потребители продукции индустриального интернета вещей*

**Нефть/газ:** автоматизация добывающих и нагнетательных скважин, насосных станций, хранилищ, перерабатывающих заводов, отгрузочных терминалов, контроль трубопроводов

**Вода:** автоматизация водозаборов, насосных подстанций, пунктов распределения, очистных сооружений, контроль состояния трубопроводов водоснабжения и канализации

**Тепло и электроэнергия:** автоматизация электростанций всех типов, ТЭЦ, котельных, распределительных узлов, электроподстанций, контроль состояния теплотрасс и ЛЭП

**Транспорт:** автоматизация железнодорожных сетей предприятий, портов, грузовых терминалов, заправочных пунктов, автостанций, контроль состояния ж/д полотна, автодорог, мостов

**АПК:** автоматизация пищевых производств, хранилищ, ферм, теплиц, мониторинг состояния животных, почв, садов, виноградников, сложной сельскохозяйственной техники

**Автоматизация** перерабатывающей, тяжелой и лёгкой промышленности, машиностроения, мониторинг прочности строений и грунтов, загрязнений и вредных выбросов

*2.2.5. Рыночный потенциал промышленного интернета вещей*

*а) сегмент автоматизации технологического оборудования*

К сегменту автоматизации технологического оборудования можно отнести следующие компоненты в России:

- 460 000 промышленных предприятий;
- 170 000 скважин добычи нефти и газа;
- 1 500 нефтебаз и терминалов;
- 6 500 котельных мощностью более 20 Гкал/час;
- 100 000 котельных мощностью менее 20 Гкал/час;
- 5 000 организаций водопроводно-канализационного хозяйства;
- 485 ТЭЦ, 200 ГЭС, 1 000 магистральных электрораспределительных подстанций;
- 22 млн. кв. м. складов;
- 67 морских портов;
- более 200 узловых ж/д станций.

Таким образом, потенциальный объем рынка промышленного интернета вещей в сегменте автоматизации технологического оборудования составляет 400 млрд. руб. в год, а на период с 2018 по 2030 гг. – 4 000 млрд. руб.

*б) сегмент мониторинга инфраструктуры, территорий и акваторий*

К сегменту мониторинга инфраструктуры, территорий и акваторий можно отнести следующие компоненты в России:

- 10% всех пахотных земель мира;
- 6 млн. рек и озер, 30 тыс. водохранилищ;
- 4 000 000 кв. км морского шельфа;
- более 1 000 000 км трубопроводов различного назначения;
- более 200 000 км ЛЭП;
- около 1 000 000 км дорог с твердым покрытием, в т.ч. 50 000 км федеральных;
- более 85 000 км железных дорог общего пользования;
- около 80 000 мостов и переправ.

Таким образом, потенциальный объем рынка промышленного интернета вещей в сегменте мониторинга инфраструктуры, территорий и акваторий – 350 млрд. руб. в год, а на период с 2018 по 2030 гг. – 3 500 млрд. руб.

*в) сегмент мониторинга состояния сложной подвижной техники*

К сегменту мониторинга состояния сложной подвижной техники можно отнести следующие компоненты в России:

- 41 млн. легковых автомобилей, 6 млн. грузовиков и 1 млн. автобусов;
- в сельском хозяйстве – 428 000 тракторов, 200 000 сеялок, 170 000 культиваторов, 80 000 комбайнов;

- строительной и другой спецтехники – более 10 000 ед.;
- железнодорожных локомотивов – 20 000 шт., вагонов – 200 000 шт.;
- более 8 500 гражданских морских и речных судов.

Таким образом, потенциальный объем рынка промышленного интернета вещей в сегменте мониторинга состояния сложной подвижной техники составляет 250 млрд. руб. в год, а на период с 2018 по 2030 гг. – 2 500 млрд. рублей.

Для рассматриваемого направления промышленного интернета вещей суммарный потенциальный объем рынка в трёх сегментах составляет 400 млрд. руб. в год, а на период с 2018 по 2030 гг. – 4 000 млрд. рублей.

## *3. Широкополосный беспроводный доступ*

### *3.1. Технологии и тенденции систем широкополосного беспроводного доступа*

Согласно отчёту Global Mobile Radar ассоциации GSM Association, на начало 2017 года в мире насчитывалось 4,8 млрд. абонентов сетей мобильной связи (63% населения Земли), которые создавали 7,9 млрд соединений – в среднем 1,46 соединений на одну SIM-карту. Ожидается, что до 2020 года капиталовложения в инфраструктуру сотовых сетей связи будут составлять более 700 млрд долл. США и общее число мобильных абонентов увеличится до 5,7 млрд (2020 год), охватив 76% населения Земли [13]. В России количество SIM-карт составляет 257 млн., что соответствует 1,78 SIM-карты на каждого жителя.

В настоящее время технологическое пространство мобильных сетей в мире состоит из сетей второго поколения – 2G (45%), третьего – 3G (32%) и четвёртого – 4G или LTE (23%). Ожидается, что в 2020 году количество сетей 4G увеличится до 41%, и начнётся переход на 5 поколение – 5G. Одной из важнейших предпосылок для развития сетей 5G является дефицит частотного ресурса, необходимого для обеспечения приемлемого качества услуг, связанных с мобильной передачей данных, в условиях продолжающегося экспоненциального роста трафика и грядущей эры интернета вещей. Особенно остро стоит проблема нехватки частот в городах. Поэтому для сетей 5G будут использоваться не только низкие частоты (до 6 ГГц), но и высокие (десятки гигагерц), характеристики которых сильно отличаются от традиционных диапазонов для мобильной связи. Поэтому для сетей 5G будут использованы новые решения по архитектуре сети и новые методы доступа и модуляции.

Партнёрский проект 5G-PPP по разработке спецификаций технологий пятого поколения определил набор «входных» характеристик, которые служат ориентиром для нового стандарта (отчёт рабочей группы по архитектуре сети 5G-PPP Architecture Working Group) [14]. Например, по сравнению с лучшими из существующих в настоящее время характеристик сетей LTE скорость передачи данных в сетях 5G должна быть в 10–100 раз выше, время задержки – в 5 раз меньше, сети должны поддерживать в 100 раз больше устройств на единицу площади и т.п.

Последовательный переход от сетей LTE к 5G займёт более длительное время по сравнению с переходом от 3G к LTE, а именно с 2020 по 2025 годы. Первые сети 5G будут использовать достижения LTE-Advanced, поэтому вплоть до 2025 года будет актуальным производство оборудования как LTE, так и 5G.

### *3.2. Бизнес-кейсы систем широкополосного беспроводного доступа и основные потребители*

Производство абонентского оборудования общего пользования сегмента смартфонов и кнопочных телефонов на предприятиях Концерна «Созвездие» в настоящее время не представляется возможным в связи с отсутствием необходимых технологий массового производства, а производство партий продукции небольшого и среднего объёма приведёт к высокой себестоимости продукции и низкой конкурентоспособности. Но рынком также востребованы абонентские и базовые станции с повышенными требованиями по кибербезопасности и помехозащищённости, устойчивости к климатическим и механическим воздействиям, воздействиям агрессивных сред, искробезопасности, надёжности и бесперебойности функционирования. Такие базовые и абонентские станции будут использоваться на предприятиях нефтегазовой промышленности, местах добычи полезных ископаемых и в арктической зоне. Такие изделия можно объединить в один класс – изделия «специального применения».

К сегменту широкополосного беспроводного доступа сетей мобильной связи специального применения нужно отнести следующие изделия, производство которых возможно на предприятиях Концерна «Созвездие»:

*3.2.1. Бизнес-кейс систем широкополосного беспроводного доступа по стандарту IEEE 802.11 (Wi-Fi)*

1. Базовые станции, абонентские станции для специального применения, ретрансляторы, радиорелейное оборудование одноранговых сетей класса P2P, сетевые контроллеры стандарта IEEE 802.11 (Wi-Fi) на основе зарубежной ЭКБ.

2. Базовые станции (точки доступа операторского класса), абонентские станции, ретрансляторы, радиорелейное оборудование класса P2P, сетевые контроллеры стандарта IEEE 802.11 (Wi-Fi) на основе ЭКБ отечественной разработки.

*3.2.2. Бизнес-кейс систем широкополосного беспроводного доступа по стандарту LTE/5G*

1. Микросотовые базовые станции, абонентские терминалы, сетевые контроллеры – MicroLTE на основе зарубежной ЭКБ.

2. Мультистандартные БС с поддержкой LTE/5G/Wi-Fi.

3. Микросотовые базовые станции, абонентские терминалы, сетевые контроллеры – microLTE (в дальнейшем – по стандарту 5G) на основе отечественной ЭКБ.

*3.2.3. Основные потребители продукции ШБД*

Потребителями телекоммуникационного оборудования для беспроводных сетей связи являются:

- сети мобильной связи, строящиеся в экстремальных условиях, в том числе в арктической зоне;
- сети связи специального назначения для нужд государственного управления, обороны, безопасности и правопорядка;
- предприятия корпоративного сегмента, строящие сети ограниченного использования, то есть на предприятиях нефтегазовой промышленности, местах добычи полезных ископаемых.

*3.2.4. Рыночный потенциал продукции ШБД*

*а) сегмент широкополосного беспроводного доступа LTE/5G*

В 2016 году в России насчитывалось более 540 000 базовых станций сотовой связи и беспроводного доступа. Из них более 110 тыс. базовых станций стандарта LTE. Годовой прирост количества базовых станций LTE в 2016 году составил 54%, и дальнейшее строительство БС будет происходить за счёт построения микросотовых (MicroLTE) БС. Кроме того, для подключения БС к инфраструктуре сети требуется радиорелейное оборудование, для расширения зон охвата и закрытия «мёртвых зон» необходимо строить ретрансляторы. Рынком с высоким потенциалом является рынок абонентских станций и MicroLTE/5G БС специального применения (в арктической зоне РФ, в местах нефте-газодобычи, расположения трубопроводных систем).

Таким образом, потенциальный объем рынка станций LTE ориентировочно составляет 164 млрд. руб. в год, а на период с 2018 по 2030 г. – 2 300 млрд. рублей.

*б) сегмент широкополосного беспроводного доступа Wi-Fi*

По итогам 2016 г. в России построено около 80 000 точек публичного Wi-Fi-доступа. Для обеспечения работы сетей связи LTE/5G необходимо построить большую сеть разгрузочных сот (по стандарту Wi-Fi) в местах скопления людей. Потенциальным рынком широкополосного беспроводного доступа являются мультистандартные БС с поддержкой LTE/5G/Wi-Fi и базовые станции операторского класса, абонентские станции, ретрансляторы, радиорелейное оборудование класса P2P, сетевые контроллеры Wi-Fi.

Таким образом, потенциальный объем рынка станций LTE – ориентировочно 140 млрд. руб. в год, а на период с 2018 по 2030 г. – 2 000 млрд. рублей.

*в) сегмент абонентского оборудования широкополосного беспроводного доступа*

По информации консалтинговой компании J'son & Partners [16], в 2016 году в России было продано 26,4 млн. смартфонов и 10,8 млн. кнопочных телефонов. Средняя стоимость смартфона составляет 12,1 тыс. руб., а средняя стоимость телефона – 1,7 тыс. руб. Общий объём продаж абонентского оборудования в России в 2016 году составил 338 млрд. рублей.

Если тенденция продаж сохранится, то объём рынка смартфонов на период до 2030 г. составит 4 450 млрд. рублей.

Оборудование «специального применения» будет составлять, по оценке, 2–3%, поэтому потенциальный объём рынка продукции ШБД «специального применения» будет составлять на период до 2030 г. от 175 до 253 млрд. рублей.

***Выводы***

Анализ ключевых направлений развития гражданских радиотехнологий в части систем профессиональной мобильной радиосвязи, промышленного интернета вещей и широкополосного беспроводного доступа показал следующее:

1. Перспективы развития узкополосных систем ПМР связаны с цифровизацией. В РФ востребованным стандартом профессиональной радиосвязи в настоящее время является общеевропейский цифровой стандарт DMR.

2. В более долгосрочной перспективе технологическим направлением является использование технологии LTE в сегменте общественной безопасности и профессиональной радиосвязи.

3. Темпы роста закупок цифровых радиостанций и инфраструктуры ПМР в период с 2018 по 2025 г. будут составлять до 22% в год, и прогноз общего объёма закупок радиостанций ПМР в России в этот период составит 7 260 тыс. шт. в госекторе и 17 870 тыс. шт. в корпоративном секторе.

4. Общий объём рынка ПМР в России в денежном выражении на период с 2018 по 2030 гг. будет составлять 1 245 млн. руб.

5. Ожидается стремительное развитие интернета вещей. Общий объем рынка промышленного интернета вещей в России за период с 2018 по 2030 составит 9 500 млрд. руб.

6. Потенциальный объём рынка по продукции ШБД «специального применения» будет составлять на период до 2030 г. от 175 до 253 млрд. рублей.

7. Концерн «Созвездие» может занять достойное место в сегментах ПМР, промышленного интернета вещей и ШБД и способен обеспечить от 15% (в консервативном сценарии) до 25% (в оптимистическом сценарии), что соответствует от 254 млрд. руб. в консервативном сценарии до 425 млрд. руб. в оптимистическом сценарии.

***Предложения***

Для занятия Концерном «Созвездие» существенной доли в гражданских радиотехнологиях необходимо предпринять следующее:

1. Подготовить пакет предложений по стимулированию производства и приоритетному использованию в Российской Федерации телекоммуникационного оборудования, имеющего статус «телекоммуникационное оборудование российского происхождения».

2. Создать в Концерне «Созвездие» подразделение, например научно-технический центр, по профилю профессиональных и гражданских систем связи.

3. НТЦ профессиональных и гражданских систем связи целесообразно создавать на базе НТЦ-50 «Связь».

4. Директор вновь создаваемого НТЦ по профилю профессиональных и гражданских систем связи должен быть в ранге заместителя генерального директора.

5. Основные направления и компетенции нового НТЦ:

5.1. Разработка систем связи профессионального и гражданского назначения и широкополосного доступа.

5.2. Разработка инфраструктурного, базового и абонентского оборудования.

5.3. Организация контрактного производства оборудования.

5.4. Разработка системных проектов по системам профессиональной связи, системам «умный дом», «умный город», «умный регион» и аналогичным.

5.5. Системная интеграция оборудования профессионального и гражданского назначения.

5.6. Доработка оборудования по требованиям заказчика.

5.7. Маркетинг рынков и технологий профессионального и гражданского назначения.

5.8. Работа в международных органах по стандартизации систем мобильной связи, профессионального и гражданского назначения и широкополосного доступа.

5.9. Техническая поддержка поставленного оборудования.

Ежегодно в течение 2018–2025 гг. выделять из прибыли не менее 10% на НИОКР по разработке систем гражданских радиотехнологий.

***Литература***

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28.07.2017 г. № 1632-р «Об утверждении программы «Цифровая экономика Российской Федерации» [Эл. ресурс]. Режим доступа: www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_221756/

2. Диверсификация ОПК: как побеждать на гражданских рынках. Доклад экспертного совета председателя коллегии Военно-промышленной комиссии РФ [Эл. ресурс]. Режим доступа: www.instrategy.ru/projects/eco_opk/article367.htm

3. ETSI standards [Эл. ресурс]. Режим доступа: www.etsi.org/standards

4. DMR – современный стандарт профессиональной мобильной радиосвязи [Эл. ресурс]. Режим доступа: www.radioprofessional.info/dmr_new.php

5. Анализ состояния и перспектив рынка DMR в России. Февраль 2017 года. J'son & Partners Consulting [Эл. ресурс]. Режим доступа: www.json.ru

6. *Зотов В.* Интервью «Интерфаксу» главкома Росгвардии [Эл. ресурс]. Режим доступа: www.interfax.ru/russia/521469

7. «О некоторых вопросах Министерства внутренних дел Российской Федерации». Указ Президента РФ от 31.12.2017 г. [Эл. ресурс]. Режим доступа: publication.pravo.ru/Document/View/000120171

8. «О некоторых мерах Министерства Российской Федерации по ГО и ЧС и ликвидации последствий стихийных бедствий». Указ Президента РФ от 30.07.2016 г. № 2016 [Эл. ресурс]. Режим доступа: www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_205507

9. «Об установлении штатной численности работников уголовно-исполнительной системы». Указ Президента РФ от 27.11.2017 г. № 577.

10. «Вопросы Федеральной службы судебных приставов». Указ Президента РФ от 15.12.2016 г. № 670 [Эл. ресурс]. Режим доступа: www.base.garant.ru/12137241

11. *Семеновская Е.* Индустриальный интернет вещей. Перспективы российского рынка. Отчёт IDC MARKET SPOTLIGHT по заказу Ростелекома [Эл. ресурс]. Режим доступа: www.rt.ru

12. Мировой опыт внедрения проектов в сфере Индустриального (Промышленного) Интернета вещей. Примеры кейсов внедрения. Декабрь 2016 года. J'son & Partners Consulting [Эл. ресурс]. Режим доступа: www.json.ru

13. *David George, Tim Hatt, Ed Barker* Global Mobile Radar. January 2018 [Эл. ресурс]. Режим доступа: www.gsma.com

14. View on 5G Architecture [Эл. ресурс]. Режим доступа: https://5g-ppp.eu/wpcontent/ upload/2014/02/ 5G-PPP-5G-Architecture-WP-July-2016.pdf

Статья поступила в редакцию 5 марта 2018 года

**Адрес редакции:**

394018, г. Воронеж, ул. Плехановская, 14
АО «Концерн «Созвездие»,
редакция журнала «Теория и техника радиосвязи»
Тел.: (473) 259-37-05
Факс: (473) 235-50-88
E-mail: tnn@sozvezdie.su