

На правах рукописи



Ворфоломеев Артем Александрович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КВ РАДИОСРЕДСТВ
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СЕЛЕКЦИЕЙ
С УЧЁТОМ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Омск – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет» на кафедре «Средства связи и информационная безопасность».

Научный руководитель: **Кисмерешкин Владимир Павлович**
доктор технических наук, профессор
кафедры «ССИБ», ОмГТУ

Официальные оппоненты: **Петров Виктор Петрович**
доктор технических наук, профессор,
начальник ИЛ, СибГУТИ

Бондаренко Константин Александрович
кандидат технических наук, доцент
кафедры «ИСИБ», ОмГУПС

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Новосибирский государственный
технический университет» (НГТУ)

Защита состоится «25» декабря 2014 года в 12-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.178.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет» по адресу: г. Омск, пр. Мира 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «ОмГТУ» и в сети Интернет на сайте ФГБОУ ВПО «ОмГТУ» – www.omgtu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2014 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира 11, Омский государственный технический университет, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.178.01.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.178.01
доктор технических наук



В.Л. Хазан

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В радиосвязи специального назначения особое место отведено коротковолновой (КВ) радиосвязи как одному из базовых видов резервной связи. Учитывая огромные территории Российской Федерации (РФ) и ограниченные возможности гражданских сетей в экстремальной обстановке, можно ожидать, что занимаемое КВ-радиосвязью место в системе силовых структур станет ещё более значимым. Весомым преимуществом КВ связи является возможность обеспечения связи через протяженные труднодоступные пространства, например, водные, горные, лесные районы особенно характерные для территории РФ. КВ радиосвязь также находит широкое применение при проведении аварийно-спасательных работ, координации действий различных организаций и служб в районах стихийных бедствий. [1]

В последние годы системы КВ связи претерпевают изменения, в ведомствах создаются единые информационно-телекоммуникационные системы в масштабах конкретных ведомств. [2]

Следует отметить одновременно возросший интерес различных ведомств к КВ радиосвязи с подвижными объектами. Это обусловлено такими факторами, как простота использования, независимость от факторов в мировой экономической и политической обстановке, дешевизна и доступность аппаратуры, новые технологии обработки информации позволили значительно повысить надежность связи, а быстрое развитие цифровых технологий существенно расширить возможности КВ радиосвязи. Так, если ранее качество связи напрямую зависело от опыта и мастерства оператора, то сейчас оно обеспечивается программно-аппаратными средствами собственно аппаратуры связи. [1,3]

Значительный вклад в развитие комплексов КВ радиосредств, коротковолновых антенн и антенных систем внесли: А.Л. Бузов, О.В. Головин, В.М. Жуков, В.П. Кисмерешкин, Г.Т. Марков, В.А. Николаев, В.Л. Хазан, В.Д. Чельшев и другие отечественные и зарубежные ученые. Ведущие организации, определившие развитие КВ радиосредств, коротковолновых антенн и антенных систем: ОАО «ТНИИР «ЭФИР», ФГУП НИИР, Самарский филиал «СОНИИР», ОАО «РИМР», ОАО «ОНИИП», ОАО НПК НИИДАР, «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного».

Необходимо учитывать и вновь предъявляемые требования к узлам связи: нормирование времени развертывания мобильных узлов связи, использование цифровых радиоприемных устройств (РПУ) и цифрового фазирования антенн,

обработка принятых сигналов специализированными цифровыми вычислителями с последующей передачей в центр. [4]

Учитывая современное состояние техники КВ радиосредств, основные направления развития комплексов КВ радиосвязи задача повышения эффективности КВ радиосредств является актуальной.

Цель работы: повышение энергетической эффективности радиотрассы диапазона коротковолновых волн путём пространственно-временной селекции с учётом геофизических условий.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Определение степени согласованности характеристик направленности передающих и приемных КВ антенн с динамическими параметрами радиотрасс различной протяженности в условиях реального суточного изменения геофизических условий (ГФУ).

2. Определение зависимости ширины диаграммы направленности (ДН) в азимутальной и угломестной плоскостях от конфигурации размещения антенных элементов (АЭ) на плоскости и расстояния между АЭ в диапазоне рабочих частот КВ радиосредств.

3. Исследование характеристик КВ приемных многоканальных антенных комплексов на основе фазированных антенных решеток (ФАР) с эквивалентными АЭ, являющимися, в свою очередь, подрешетками различной конфигурации.

4. Определение параметров диапазонных излучателей с вертикальной поляризацией для использования в мобильных приемопередающих антенных комплексах и системах КВ радиосредств, выполненных на основе ФАР.

5. Развитие принципов построения и исследование основных параметров КВ приемных многоканальных антенных систем (ПрМАС) для различных вариантов размещения АЭ на поверхности земли.

6. Определение влияния характеристик пространственной и временной дискретизаций принимаемых сигналов на параметры КВ ПрМАС при условии управления положением формируемых ДН цифровым методом.

Основные методы исследования. Основаны на разработке математических алгоритмов для исследуемых задач с последующей их реализацией в среде моделирования. Вычислительные эксперименты применительно к отдельным антенным элементам проведены без использования их аналитических моделей с помощью программ имитационного моделирования.

Научная новизна работы:

1. Разработана методика оценки степени согласованности характеристик направленности передающих и приемных КВ антенн, учитывающая динамические параметры КВ радиотрасс различной протяженности, в условиях реального суточного изменения геофизических условий.

2. Произведена оценка влияния характеристик пространственной и временной дискретизации принимаемых сигналов на направленность и диапазонность приемного КВ радиоцентра.

3. Расширены требования к построению АФС с прямым аналого-цифровым преобразованием, повышающие эффективность приемных КВ радиоцентров: обеспечение оперативной перестройки направления, повышение надежности передачи информации, сокращение площади приемных АФС и времени развертывания на позиции.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Методика оценки степени согласованности характеристик направленности передающих и приемных КВ антенн с динамическими параметрами радиотрасс различной протяженности в условиях реального суточного изменения геофизических условий.

2. Результаты расчетов влияния характеристик пространственной и временной дискретизации принимаемых сигналов на параметры приемного КВ радиоцентра.

3. Рекомендации по расчету направленных свойств АФС в зависимости от конфигурации размещения единичных элементов антенных решеток.

4. Методологические и технические решения, повышающие помехоустойчивость системы КВ связи при воздействии мощных непреднамеренных электромагнитных помех и обеспечивающие оперативное изменение положения формируемых диаграмм направленностей (патенты на изобретения: №2426204, РФ, 2011 г., №2475958, РФ, 2013 г.).

Достоверность научных положений, рекомендаций и выводов основана на корректном применении методов цифровой обработки сигналов, теорий распространения радиоволн и антенн. Изложенные в работе положения теоретически обоснованы, результаты исследований антенных решеток с цифровой обработкой сигналов получены математическим моделированием и не противоречат выводам исследований, описанных в научной литературе для антенных решеток с аналоговой обработкой сигналов. Характеристики антенных элементов получены имитационным моделированием с помощью, получивших широкое распространение и положительно зарекомендованных программ MMANA и MMANA-GAL basic.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

1. Алгоритм оценки степени согласованности характеристик направленности передающих и приемных КВ антенн с динамическими параметрами радиотрасс различной протяженности в условиях реального суточного изменения ГФУ.
2. Результаты определения влияния характеристик пространственной и временной дискретизации принимаемых сигналов на параметры КВ ПрМАС.
3. Требования к построению коротковолновой приемной многоканальной антенной системы с прямым аналого-цифровым преобразованием и автоматизированной приемопередающей системы коротковолновой связи.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы использованы ОАО «Омский НИИ приборостроения» при проведении аван-проекта в рамках ГОЗ.

Апробация работы:

Положения диссертационной работы доложены на научно-технических конференциях: Юбилейная научно-техническая конференция 50 лет ОНИИП «Современное состояние и перспективы развития специальных систем радиосвязи и радиоуправления» (Омск, 2008), Международная Сибирская конференция по управлению и коммуникациям «International Siberian Conference on Control and Communications «SIBCON-2009» (Томск, 2009), II Всероссийская молодежная научно-техническая конференция «Россия молодая: передовые технологии в промышленность» (Омск, 2009), Конференция «Техника специального назначения – радиотехника, электроника и связь» V Международного технологического конгресса «Военная техника, вооружение и технологии двойного применения в XXI веке» (Омск, 2009), VII Международная научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск, 2009), XVI Международная научно-техническая конференция «Радиолокация. Навигация. Связь» – «RLNC – 2010» (Воронеж, 2010), III Всероссийская молодежная научно-техническая конференция «Россия молодая: передовые технологии в промышленность» (Омск, 2010), Международная научно-техническая конференция «Радиотехника, электроника и связь» – «РЭиС – 2011» (Омск, 2011), Международная Сибирская конференция по управлению и коммуникациям «International Siberian Conference on Control and Communications «SIBCON-2011» (Красноярск, 2011), VI Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, 2012), Российская научно-техническая конференция «Связь в высоких широтах» (Омск, 2014).

Публикации: основные результаты диссертации отражены в 18 публикациях, в том числе в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ опубликовано 5 научных работ, получено 2 патента на изобретения и 1 патент на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы из 93 наименований. Работа изложена на 150 страницах основного текста, содержит 46 рисунков и 6 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ:

Во Введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи.

В Главе 1 рассмотрены особенности применения КВ радиосредств в настоящее время и перспективные направления развития программно-технических средств. Выявлена проблема расхождения параметров радиотрассы и характеристик направленности антенн КВ систем связи, состоящая в расходящемся характере углов возвышения луча радиотрассы, передающей и приемной антенн. Рассмотрен один из методов сокращения площадей занимаемых антенными полями за счет масштабируемых многоканальных антенных комплексов на основе ФАР, где в качестве единичных АЭ используются активные вибраторные и рамочные антенны.

Результаты обзора состояния развития КВ радиосредств показали, что создаются отдельные устройства новых поколений техники с учетом технического прогресса и с использованием новых цифровых технологий. Создаваемые радиоцентры системно ориентированы на классический тип работы с корреспондентами, при этом системы наращивают количество одновременно работающих радиоабонентов на один радиоцентр за счет использования новых цифровых технологий. Радиоцентры не ориентированы на оперативную, интеллектуальную смену направлений работы с радиоабонентами по причине использования классических коммутаторов приемных антенн.

Динамика изменения характеристик направленности КВ антенн корпоративных систем связи указывает на повышение эффективности радиосвязи при подстройке луча ДН под параметры выделенного направления.

Перспективным направлением развития КВ радиосвязи представляется многоканальная приемная система связи созданная на базе фазированных антенных решеток (линейных, кольцевых, многокольцевых антенных решеток), в качестве

отдельных антенных элементов имеющая широкодиапазонные КВ антенны, обладающая цифровым диаграммообразованием независимым для каждого радиоабонента, имеющая приемные тракты обладающие прямым цифровым преобразованием, тракты цифровой обработки информации и транспортную сеть данных основанную на базе локальной вычислительной сети.

В Главе 2 сделана оценка степени согласованности характеристик направленности передающих и приемных КВ антенн с динамическими параметрами радиотрасс различной протяженности в условиях реального суточного изменения ГФУ. Определены зависимости значения ширины ДН в азимутальной и угломестной плоскостях от конфигурации размещения АЭ на плоскости и расстояния между ними. Исследованы характеристики масштабируемых КВ приемных многоканальных антенных комплексов на основе ФАР с эквивалентными антенными элементами, являющимися, в свою очередь, подрешетками различной конфигурации. Определен тип излучателя и его основные электрические характеристики, удовлетворяющие требованиям единичного антенного элемента цифровой ФАР.

Используя в качестве исходных данных графики реальных ГФУ и графики изменения значений критических частот $f_{кр F2}$ (слой ионосферы $F2$), проведены вычисления оценки степени согласованности характеристик передающей ромбической антенны $PG\frac{65}{4}1,0$ ($\lambda_0=18$ м) и приемной антенны бегущей волны $BC\frac{21}{8}\frac{4,5}{200}17$ с динамическими параметрами радиотрасс протяженностью $D = (1500, 2000, 2500$ и $3000)$ км.

Динамика углов возвышения радиолуча Δ_T , биссектрис ДН передающей $\Delta_{a(Tr)}$ и приемной $\Delta_{a(Rs)}$ антенн для оптимальных рабочих частот $f_{OPЧ F2}$ и радиотрассы протяженностью $D = 2500$ км в летних и зимних условиях распространения радиосигнала (для реальных ГФУ) показана на рисунке 1.

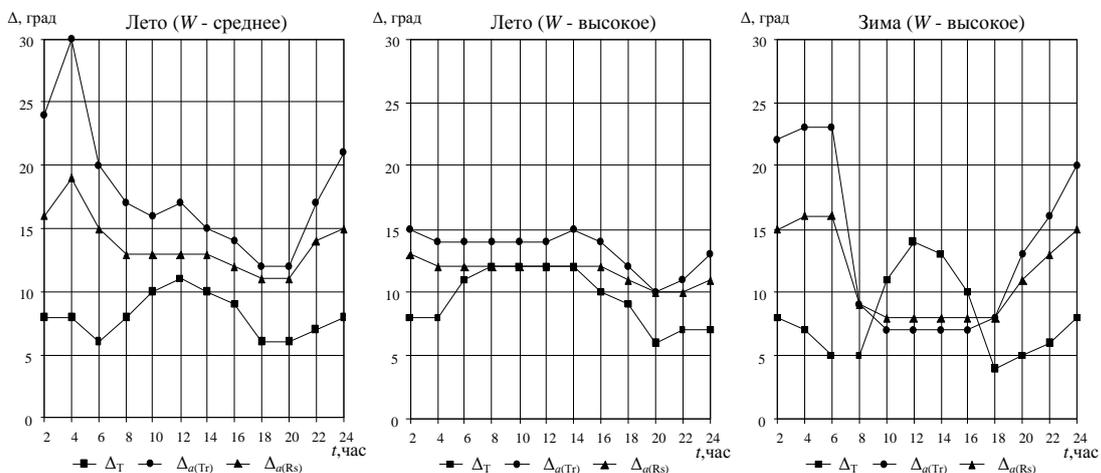


Рисунок 1 – Динамика углов возвышения Δ_T , $\Delta_{a(Tr)}$ и $\Delta_{a(Rs)}$ для трассы $D = 2500$ км.

На рисунках 2 – 5 показаны динамика значений коэффициента энергетических потерь $k_{ЭП}$, и значений $h_{\theta F2}$ для случаев приема сигнала от корреспондента и передачи сигнала корреспонденту на трассах протяженностью $D = 1500, 2000, 2500$ и 3000 км.

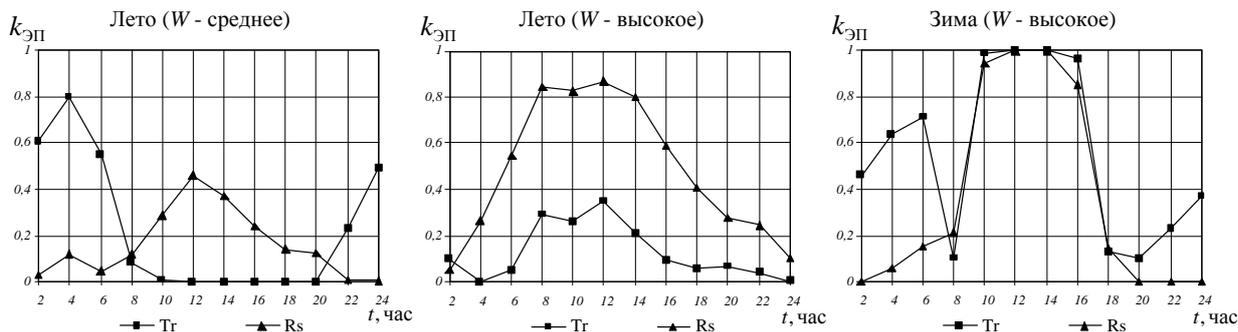


Рисунок 2 – Динамика $k_{ЭП}$ для радиотрассы протяженностью 1500 км.

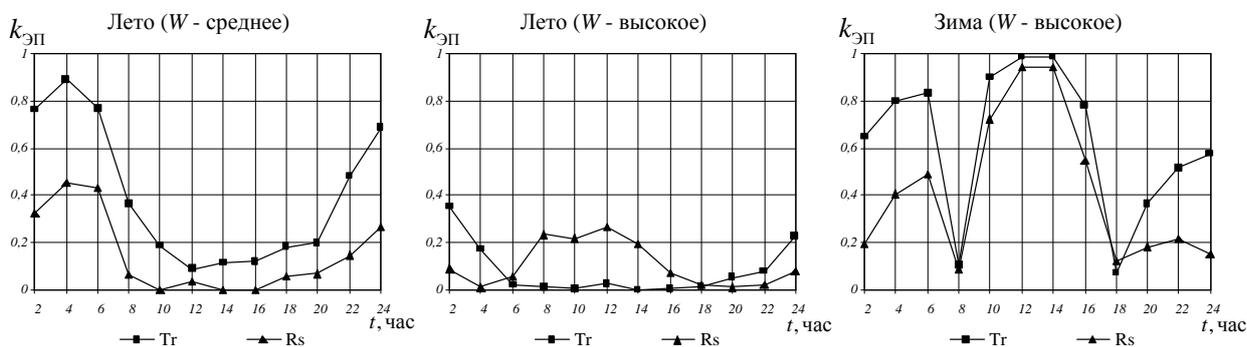


Рисунок 3 – Динамика $k_{ЭП}$ для радиотрассы протяженностью 2000 км.

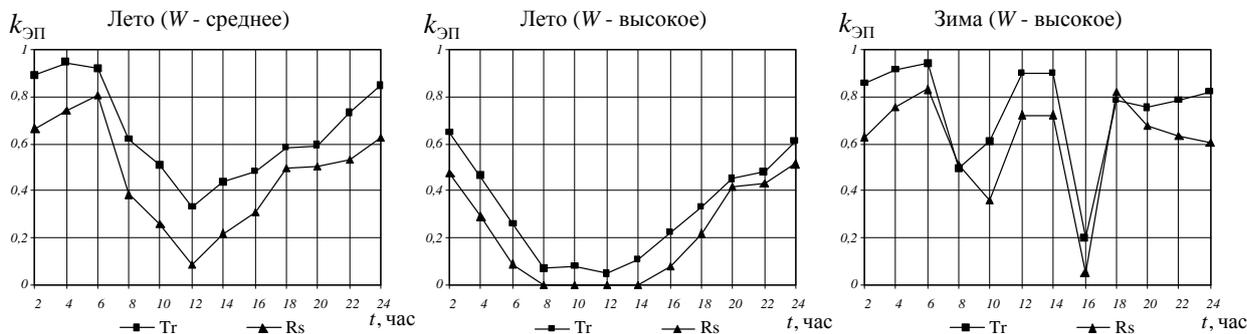


Рисунок 4 – Динамика $k_{ЭП}$ для радиотрассы протяженностью 2500 км.

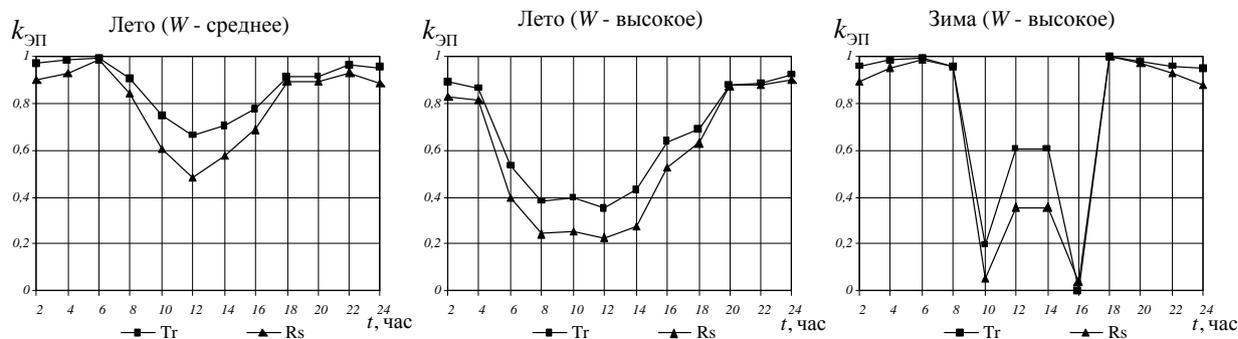


Рисунок 5 – Динамика $k_{ЭП}$ для радиотрассы протяженностью 3000 км.

Анализ графиков суточной динамики величин Δ_T , $\Delta_{a(Tr)}$ и $\Delta_{a(Rs)}$ показал:

1. Для типоразмеров используемых передающей ромбической антенны и приемной антенны бегущей волны на интервалах времени $t = 0 \dots 6$ часов и $t = 20 \dots 24$ часа в летний период со средним значением W , а также в зимний период с высоким значением W динамика необходимого угла возвышения радиолуча Δ_T и динамика углов возвышений биссектрис ДН передающей $\Delta_{a(Tr)}$ и приемной $\Delta_{a(Rs)}$ антенн носит расходящийся характер;

2. Для ГФУ, характеризующихся в летний период высоким значением W , величина расхождения необходимого угла возвышения радиолуча Δ_T и углов возвышений биссектрис ДН передающей $\Delta_{a(Tr)}$ и приемной $\Delta_{a(Rs)}$ антенн изменяет свои значения от $6^\circ \dots 8^\circ$ ($t = 2$ часа и $t = 20 \dots 24$ часа) до значений $0^\circ \dots 3^\circ$ ($t = 8 \dots 14$ часов);

3. Для типоразмеров используемых передающей и приемной антенн и радиотрассах протяженностью $D = 2000 \dots 3000$ км величина коэффициента энергетических потерь при передаче / приеме сигналов принимает значения $k_{ЭП(Tr,Rs)} \leq 0,1 \dots 0,2$ только для летних ГФУ с высоким значением W на интервале времени $t = 8 \dots 14$ часов и для летних ГФУ со средним значением W на радиотрассах протяженностью $D = 1500 \dots 2000$ км;

4. Для радиотрасс летних, зимних, со средним и высоким значениями W , протяженностью $D = 1500, 2000, 2500, 3000$ км $k_{ЭП(Tr,Rs)} \geq 0,4 \dots 0,8$, достигая в некоторых случаях (например, для зимних ГФУ с высоким значением W , $D = 1500, 2000$ км, $t = 10 \dots 16$ часов; для летних ГФУ со средним значением W , $D = 3000$ км, $t = 0 \dots 6$ часов, $t = 18 \dots 24$ часа) значения, близкого к единице (т. е. полной потере энергетического контакта с радиоабонентом как при приеме, так и при передаче радиосигнала).

Расходящийся характер углов возвышения лучей передающей и приемной антенн и углов возвышения радиотрассы показывает, что необходимы адаптивные под условия расхождения параметров радиотрассы технические решения.

Разработан алгоритм формирования диаграммы направленности приемной многоканальной антенной системы.

Ведение сеансов связи основано на координатах размещения всех АЭ ($1 \dots N$) на местности, значениях параметров прихода сигналов от радиоабонентов r_m (параметров радиотрасс), значениях рабочих частот (длин волн λ_m , $m = 1 \dots M$) сигналов, поступающих от радиоабонентов и режимах работы с каждым радиоабонентом (характере принимаемой информации).

Для каждого направления прихода радиолуча r_m , и, соответственно, положения в пространстве формируемых ДН, $m = 1, 2 \dots M$, определяются направляющие косинусы углов: $\cos \alpha_m = \cos(r_m \wedge X)$; $\cos \beta_m = \cos(r_m \wedge Y)$; $\cos \gamma_m = \cos(r_m \wedge Z)$, где обозначено:

$r_m^{\wedge}, X(Y, Z)$ – угол между единичным вектором r_m и положительным направлением осей; в сферической системе координат положение вектора r_m определяется координатами:

$$\theta_m = \gamma_m, \varphi_m = \arccos \frac{\cos(\alpha_m)}{\sin(\theta_m)}.$$

Для каждого i -го АЭ скалярным произведением векторов R_i и r_m определяется расстояние разности хода лучей $d_{i,m}$:

$$d_{i,m} = (R_i \cdot r_m) = |R_i| \{ [\cos \alpha_i \cdot \cos \alpha_m] + [\cos \beta_i \cdot \cos \beta_m] + [\cos \gamma_i \cdot \cos \gamma_m] \} = |R_i| \cdot \cos \psi_{i,m},$$

где $\psi_{i,m}$ – угол между направлениями векторов R_i и r_m ,

$$|R_i| = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2}, \cos \psi_{i,m} = \sin \theta_m \cdot \cos(\varphi_m - \varphi_i), \varphi_i = \arctg \left(\frac{Y_i}{X_i} \right).$$

Необходимая задержка по фазе сигнала поступающего с i -го АЭ составляет:

$$\Phi_{\Sigma i,m} = \frac{2\pi}{\lambda_m} \cdot d_{i,m} = \frac{2\pi |R_i| \cdot \cos \psi_{i,m}}{\lambda_m}.$$

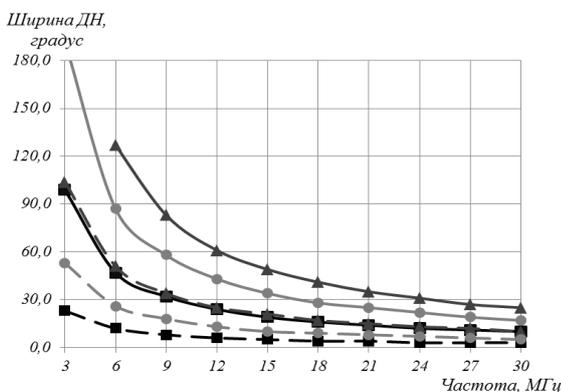
Сигнал на выходе i -го АЭ находят из выражения:

$$S_i(\Delta\varphi, \Delta\theta) = \cos(\Phi_{\Sigma i,m}) = \cos \left(\frac{2\pi |R_i|}{\lambda_m} \cdot \sin(\theta_m - \Delta\theta) \cdot \cos[(\varphi_m - \varphi_i) - \Delta\varphi] \right),$$

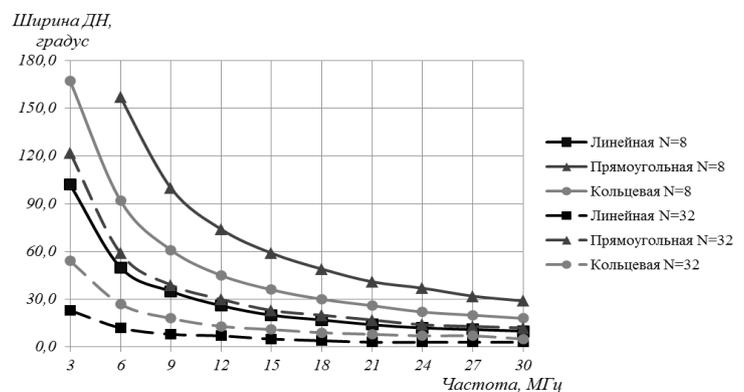
где $\Delta\varphi, \Delta\theta$ – текущие координаты прихода лучей, а нормированный сигнал на выходе ФАР находят из выражения:

$$S_{\Sigma}(\Delta\varphi, \Delta\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i(\Delta\varphi, \Delta\theta).$$

По результатам исследования определены зависимости ширины ДН по уровню 0,7 в угломестной и азимутальной плоскостях от частоты для линейной плоской антенной решетки (АР) с эквидистантным размещением АЭ, кольцевой АР и прямоугольной (плоской) АР. На рисунке 6 приведены графики зависимости ширины ДН по уровню 0,7 для $N = 8, 32$ и $D = 7,5$ м.



а) Азимутальное сечение



б) Угломестное сечение

Рисунок 6 – Зависимость ширины ДН по уровню 0,7 от частоты

Анализ зависимости ширины ДН по уровню 0,7 показывает, что использование цифровой ФАР линейной эквидистантной конфигурации повышает избирательность в выделенном направлении, использование цифровой ФАР кольцевой конфигурации обеспечивает оперативный избирательный прием по азимуту 360 градусов по М независимым каналам приема. Увеличение количества АЭ в АР и расстояния между ними приводит к сужению основного лепестка и уменьшению боковых лепестков ДН.

Следующим этапом исследования является АЭ цифровой АР, отвечающий требованиям: обеспечение излучения требуемой поляризации, ненаправленные свойства в азимутальной плоскости, минимальный угол отжатия ДН в угломестной плоскости и достаточно широкий лепесток, для формирования ДН с максимумом излучения под заданным углом относительно земной поверхности, диапазонность (характеристики и параметры элемента не должны резко изменяться в рабочем диапазоне частот), конструкция излучателя должна выдерживать механическую и ветровую нагрузку и отвечать требованиям мобильности.

Выбор АЭ в построении всей цифровой ФАР играет ключевую роль. В качестве единичных антенных элементов АР наиболее простыми решениями являются вертикальные симметричный и несимметричный вибраторы [5]. Возможность их применения объясняется, прежде всего, ненаправленными свойствами в азимутальной плоскости, не сложной конструкцией и малой площадью, занимаемой одной антенной, что даёт возможность расстановки данных антенн в требуемую конфигурацию АР на ограниченной площадке.

Более простой реализацией, является вертикально расположенный несимметричный вибратор, геометрические размеры которого являются наименьшими по сравнению с другими типами антенн. Такая антенна излучает радиоволны преимущественно вертикальной поляризации, что обеспечивает радиосвязь поверхностной и ионосферной радиоволнами.

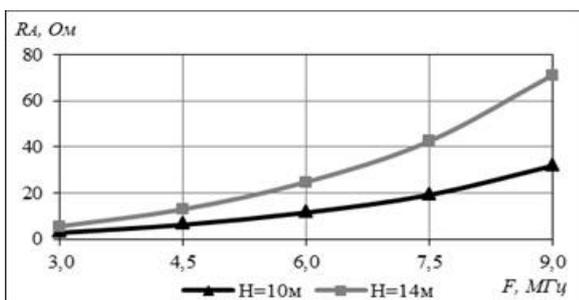
Перспективным типом диапазонного АЭ является вариант вертикальной экспоненциальной антенны, относящейся к классу «объемных» антенн. Этот класс характеризуется тем, что отношение их высоты к максимальному диаметру АЭ несимметричного вертикального излучателя ШВИ ≤ 10 (ШВИ – широкодиапазонный вертикальный излучатель). Излучатель «Нерпа-ШВИ» является несимметричным и имеет ряд недостатков (ограниченный диапазон рабочих частот, обусловленный резонансными свойствами рабочих полотен, зависимость угла отжатия от качества выполнения противовеса, содержащего до 120-ти проводов, низкая механическая

прочность конструкции), что порождает необходимость исследования параметров симметричного вертикального диапазонного излучателя (СВДИ) объемного типа.

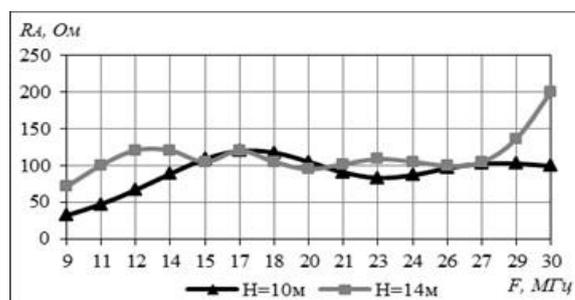
Задачи, решенные применением СВДИ: расширен диапазон рабочих частот, в котором изменение электрических параметров антенны минимальны; уменьшена площадь, занимаемая антенной; уменьшены значения минимального угла возвышения нижней границы ДН антенны; повышена надежность эксплуатации антенны за счет повышения механической прочности конструктивных элементов излучателя при одновременном сохранении значений электрических параметров в диапазоне рабочих частот.

Поставленные в исследовании задачи рассмотрены в два этапа: математическое моделирование антенны СВДИ с получением электрических параметров и, рассмотрение вопросов конструкции антенны СВДИ. Математическое моделирование антенны СВДИ проведено в программе MMANA-GAL v. 1.2 для высот 10 и 14 метров с количеством плеч равным 8 для реальной земли.

На рисунках 7, 8 приведены результаты моделирования электрических характеристик СВДИ для высот антенных элементов $l = 10$ (14) метров ($\theta = 40^\circ$; количество рабочих полотен $N = 8$).

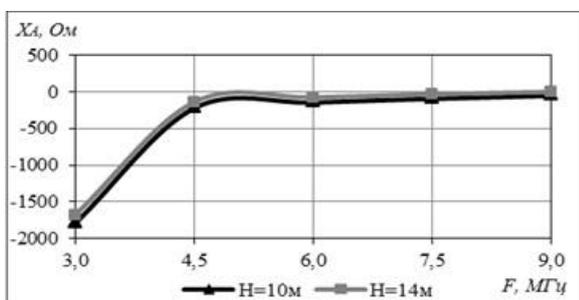


а) $F = 3 \dots 9$ МГц

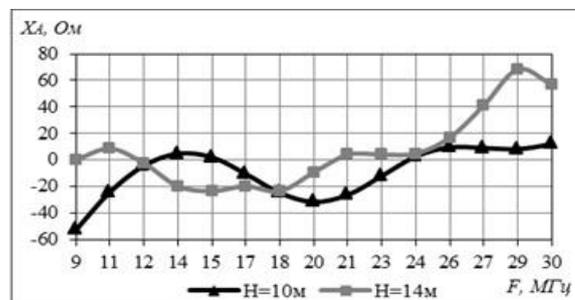


б) $F = 9 \dots 30$ МГц

Рисунок 7 – Зависимость значений активной составляющей R_A входного импеданса СВДИ от частоты



а) $F = 3 \dots 9$ МГц



б) $F = 9 \dots 30$ МГц

Рисунок 8 – Зависимость значений реактивной составляющей X_A входного импеданса СВДИ от частоты

Исследование параметров СВДИ показало, что данная антенна обладает ненаправленными свойствами в азимутальной плоскости, имеет небольшой (единицы градусов) угол отжатия ДН в угломестной плоскости и широкий лепесток, величина расширения лепестка зависит от высоты антенны и рабочей частоты, обладает диапазоном (возможна работа антенны с коэффициентом перекрытия 10 (3 – 30 МГц)), конструкция антенны выдерживает механическую и ветровую нагрузку, отвечает требованиям мобильности. Площадь, занимаемая антенной СВДИ, меньше площади занимаемой антенной «Нерпа-ШВИ» [6] за счет отсутствия противовеса антенны, содержащего до 120-ти проводов, заглубленных в грунт.

В Главе 3 рассмотрены принципы построения и основные параметры КВ ПрМАС для различных вариантов размещения АЭ на поверхности земли. Проведен анализ влияния характеристик пространственной и временной дискретизации принимаемых сигналов на параметры КВ ПрМАС в предположении того, что управление положением формируемых диаграмм направленностей осуществляется цифровым методом. Определены типовые схемы цифровой обработки сигналов (ЦОС) для обработки данных в ПрМАС. Произведена оценка трафика цифровых данных в ПрМАС и определена структура цифрового диаграммообразующего устройства.

Основным принципом построения КВ ПрМАС, определяющим их как самостоятельный класс устройств, является использование цифровых (нелинейных) элементов непосредственно в радиоприемных трактах. Такие тракты подключены к выходам упорядоченной совокупности антенных элементов, образующих АР [7, 8]. Таким образом, в ПрМАС цифровая обработка парциальных сигналов начинается, практически, прямо в антенне (антенном элементе), что позволяет реализовать КВ ПрМАС как многоканальный динамический пространственно-частотный фильтр с параметрическим управлением его характеристиками.

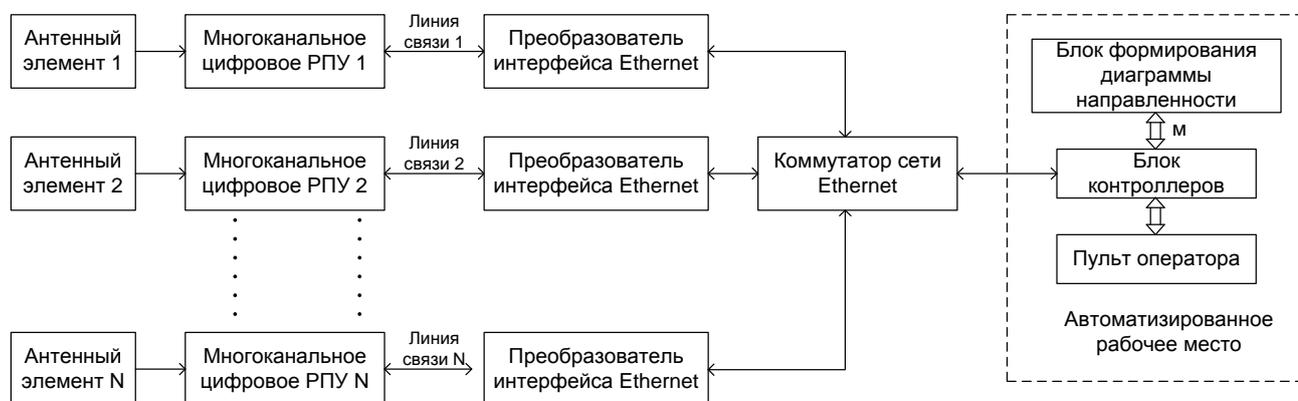


Рисунок 9 – Функциональная схема многоканального КВ ПрмЦ

Результаты исследования показали, что разработка КВ ПрМАС в соответствии с развитыми в диссертационной работе принципами обеспечивает возможность работы приемного центра (ПрмЦ) в условиях сложной помеховой обстановки. Эта возможность обусловлена параметрами тракта обработки парциальных выходных сигналов АЭ – уровнем блокирования тракта приема и обработки не менее 106 дБмкВ (0,2 В) при отстройке $\pm 5\%$ от частоты основного канала приема и динамическим диапазоном по интермодуляционным искажениям тракта приема и обработки не менее 105 дБмкВ при отстройке $\pm 5\%$ от частоты основного канала приема.

Разработка КВ многоканального ПрмЦ на основе КВ ПрМАС обеспечивает уменьшение линейных размеров площадок, занимаемых приемными антенно-фидерными устройствами (антенны типа VН) действующих ПрмЦ, в 8-10 раз при сохранении значений основных показателей (коэффициент усиления (КУ), круговой сектор приема по азимуту).

Характеристиками пространственной дискретизации сигналов, поступающих на ПрМАС от РА, являются: конфигурация размещения антенных элементов АЭ1...АЭN, входящих в состав ПрМАС, на местности (линейная АР – ЛАР, плоская АР – ПлАР); геометрические размеры и вид АР (регулярное эквидистантное расположение АЭ в АР, произвольное (нерегулярное, неэквидистантное) расположение АЭ в АР).

Для оценки диапазонности ПлАР и кольцевой антенной решетки (КАР) использован метод эквивалентного линейного излучателя [9]. На рисунке 10 показан процесс преобразования прямоугольной ПлАР в эквивалентную ЛАР (ЭкЛАР), которая, в общем случае, является неэквидистантной.

По результатам моделирования определены зависимости коэффициента направленного действия (КНД) (как отношение квадрата модуля полного вектора напряженности поля в данном направлении к среднему по всем направлениям квадрату модуля вектора) от α ($\alpha = R/\lambda$, R - радиус КАР, λ - длина волны принимаемого радиосигнала). Исходные данные моделирования: $f = 3...30\text{МГц}$; $R = 30\text{м}$; $\varphi_{0m} = 0^\circ$; $N = 8, 16, 24, 32$ (при $\Delta_{0m} = 10^\circ, 25^\circ, 40^\circ$). Графики зависимостей КНД КАР от величины α для различных значений N и Δ_{0m} приведены на рисунке 11.

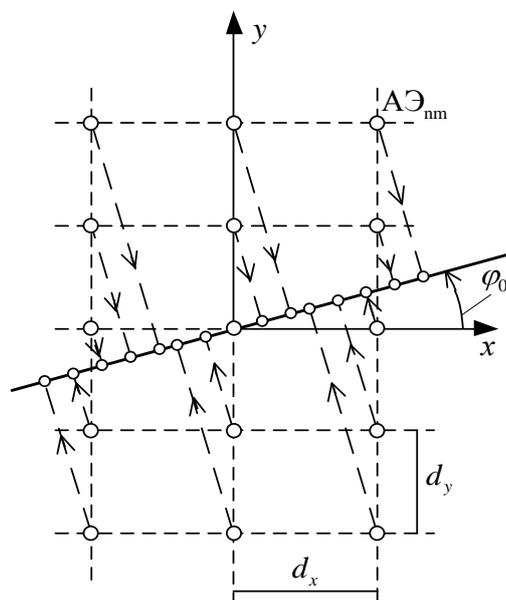


Рисунок 10 – Преобразование ПлАР в ЭкЛАР

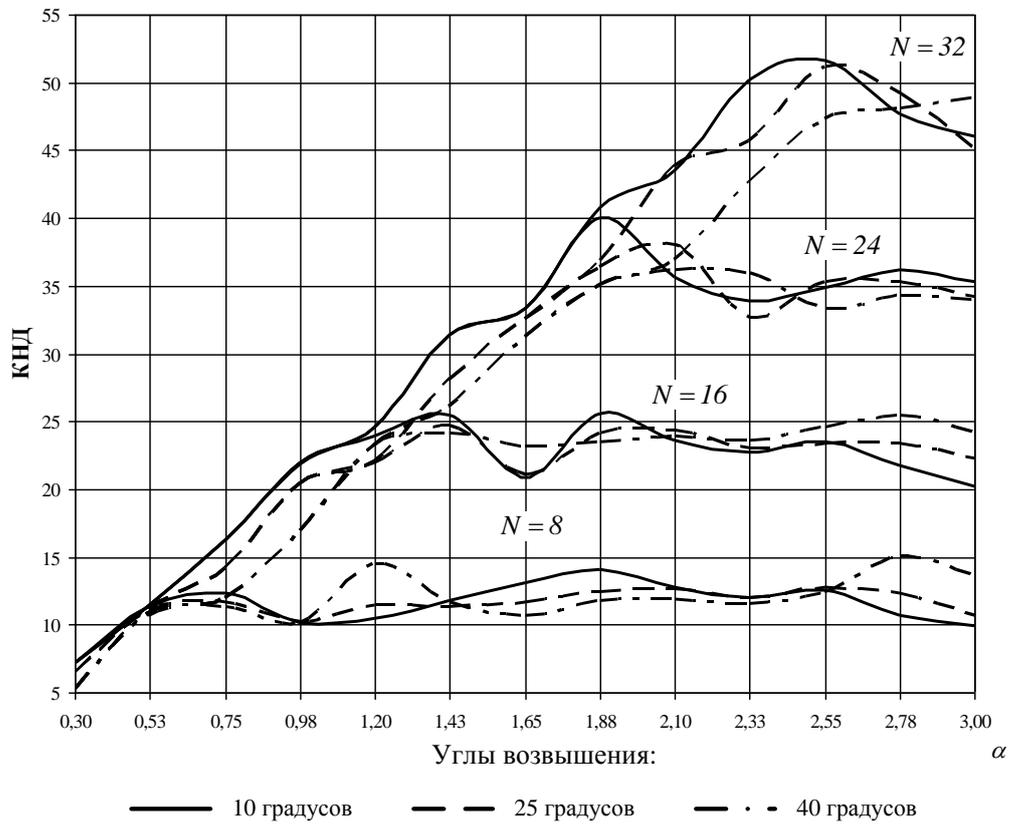


Рисунок 11 – Графики зависимостей КНД от α

На рисунках 12 и 13 показаны сечения ДН КАР ($N = 16, R = 30\text{ м}, f = 21\text{ МГц}$, $\varphi_{0m} = 120^\circ, \Delta_{0m} = 10^\circ, f_d = 60, 100, 150\text{ МГц}$) в угломестной и азимутальной плоскостях соответственно. Максимальные значения сформированной ДН (относительно случая при идеальных задержках фазы в i – м АЭ) отмечены цифрами.

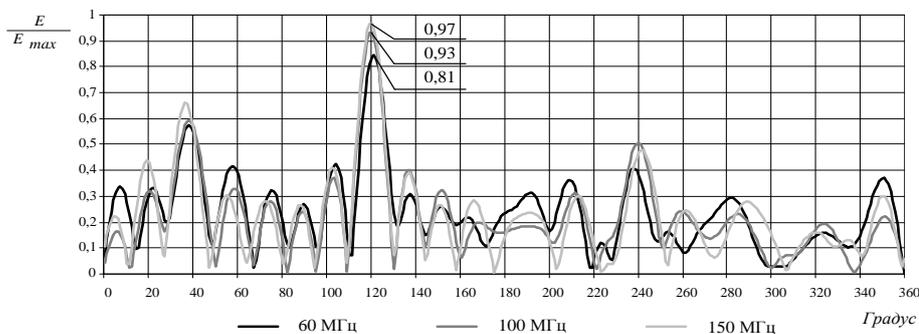


Рисунок 12 – Графики нормированных ДН КАР в азимутальной плоскости

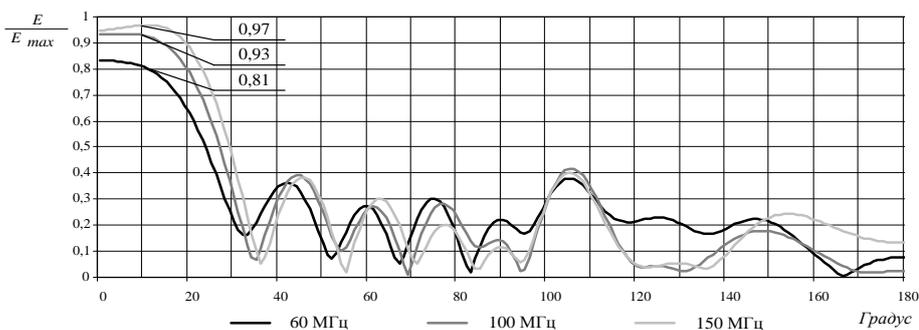


Рисунок 13 – Графики нормированных ДН КАР в угломестной плоскости

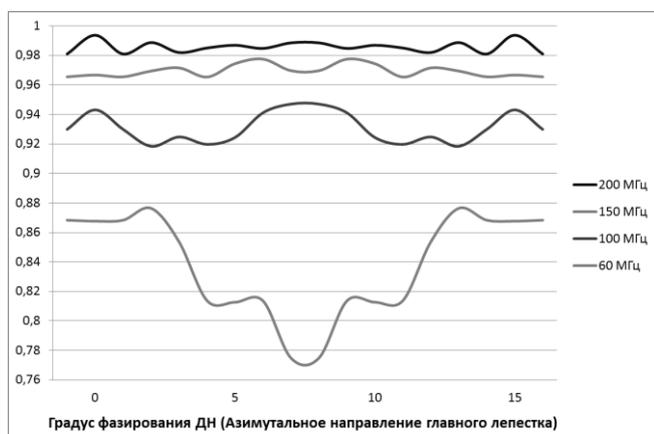
На рисунке 14 показаны зависимости значений максимума главного лепестка ДН КАР (нормированного к максимуму главного лепестка ДН с идеальным фазированием), сформированной цифровым способом, от азимутального угла на который производится фазирование ($N = 8, 16, 32$; $R = 30$ м, $f_{sm} = 21$ МГц, $\varphi_{0m} = 0...360^\circ$, $\Delta_{0m} = 10^\circ$, $f_\partial = 60, 100, 150, 200$ МГц). Т.о. на рисунке 14 отражена зависимость снижения энергетического потенциала КАР ($N = 8, 16, 32$, $R = 30$ м) при движении луча ДН в азимутальной плоскости ($\varphi_{0m} = 0...360^\circ$) с углом возвышения $\Delta_{0m} = 10^\circ$ на частоте принимаемого сигнала $f_{sm} = 21$ МГц.



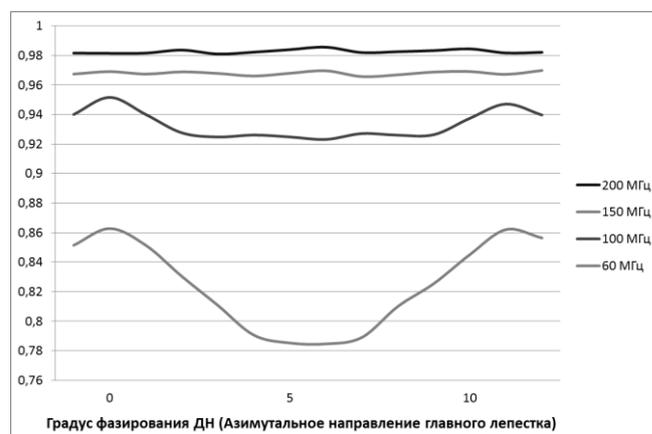
а) $\varphi_{0m} = 0...45^\circ$, $N = 8$



б) $\varphi_{0m} = 0...22,5^\circ$, $N = 16$



в) $\varphi_{0m} = 0...15^\circ$, $N = 24$



г) $\varphi_{0m} = 0...11,25^\circ$, $N = 32$

Рисунок 14 – Зависимости максимума главного лепестка ДН (нормированные к максимуму главного лепестка ДН с идеальным фазированием), от азимутального (сфазированного) угла, один сектор ($360^\circ/N$)

Анализ результатов моделирования показал, что величина коэффициента перекрытия по частоте КАР зависит от количества N АЭ и принимает значения от $K_{eng} = 1,31$ при $N = 8$ до $K_{eng} = 10,36$ при $N = 32$, при построении КАР с коэффициентом перекрытия по частоте $K_{eng} \geq 10$ необходимо использовать как минимум двухкольцевую АР, причем количество АЭ (N_1, N_2) в каждой из подрешеток (в

зависимости от задач, решаемых ПрМАС) может быть различным, для диапазона рабочих частот $f = 3 \dots 30 \text{ МГц}$ частота дискретизации в цифровых каналах (трактах) из состава многоканальных аналого-цифровых трактов (МАЦТ), $f_d = 150 \text{ МГц}$ является достаточной для обеспечения точности формирования положения ДН в пространстве. Дальнейшее увеличение частоты дискретизации до значения $f_d = 300 \text{ МГц}$ приводит к незначительному повышению (~2%) энергетической эффективности ПрМАС, что в большинстве случаев экономически нецелесообразно.

В Главе 4 определена структура и функциональные узлы КВ ПрМАС с прямым аналого-цифровым преобразованием и цифровым диаграммообразованием. КВ ПрМАС позволяет повысить помехоустойчивость системы при воздействии мощных непреднамеренных электромагнитных помех, обеспечивает оперативное изменение положений формируемых ДН и повышает их точность. Структурная схема такой системы приведена на рисунке 15.

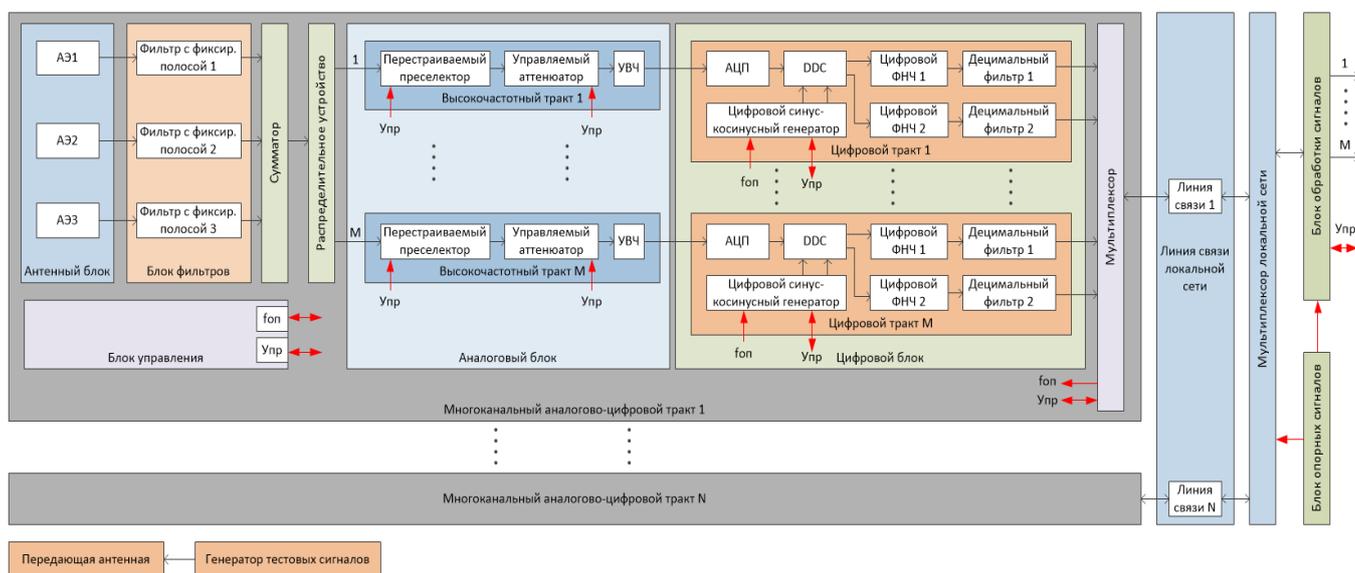


Рисунок 15 – Структурная схема КВ ПрМАС

Определена структура и функциональные узлы автоматизированной приемопередающей системы (АППСС) КВ радиосвязи, состоящей из ПрмЦ и передающего радицентра (ПрдЦ). Технические решения ПрмЦ соответствуют принципам построения ПрМАС с прямым аналого-цифровым преобразованием и цифровым диаграммообразованием. ПрдЦ содержит четыре КВ передающих тракта, передающую антенно-фидерную систему, блок сложения и коммутации высокочастотных сигналов и коммутатор локальной информационной сети. С применением аппаратуры беспроводного доступа ПрмЦ и ПрдЦ объединены в единую ЛИС АППСС.

В Заключении сформулированы основные следующие выводы диссертационной работы:

1. Результаты диссертационного исследования показывают, что использование приемной АР с цифровым формированием ДН на базе N АЭ и N приемных трактов вместо громоздких приемных антенн средней и высокой эффективности типа ВГДШ, БС, БС-2 позволяет:

- снизить на различных радиотрассах (летних, зимних, со средним и высоким значениями числа Вольфа, протяженностью от 1500 до 3000 км) энергетические потери от 40% до 100% по отношению к исследованным в работе типоразмерам передающей (РГ) и приемной (БС) антенн;
- сократить размер площади, необходимой для развертывания приемных антенн, в 8...10 раз;
- обеспечить оперативную перестройку луча главного лепестка ДН под изменяющие параметры радиотрассы, без проведения дополнительных работ по переориентированию приемных антенн (на практике развертывание мобильной приемной антенны типа VН-85/20 на мачте Б13 слаженной командой из 3-х человек составляет не менее 15-ти минут).

2. По результатам исследования конфигураций размещения АЭ в АР определено, что:

- увеличение количества АЭ в 4 раза (с 8-ми до 32-х) позволяет повысить направленность АР (сузить главный лепесток ДН) в диапазоне рабочих частот: ЛАР от 3,3 (30 МГц) до 4,3 (3 МГц) раза; КАР от 3,2 (30 МГц) до 3,6 (3 МГц) раза;
- увеличение расстояния между АЭ в 2 раза (с 5-ти до 10-ти) позволяет повысить направленность АР: от 1,8 до 2,2 раз для ЛАР и до ~2 раз для КАР.

3. Анализ влияния временной дискретизации на направленность АР указывает на следующие основные зависимости:

- увеличение частоты дискретизации приемных трактов КАР (для исследованных в работе конфигураций) с 60 МГц до 120 МГц приводит к увеличению энергетики главного лепестка сформированной ДН на ~30 %;
- величина главного лепестка ДН КАР с идеальным фазированием на ~3% больше величины главного лепестка ДН КАР с частотой дискретизации 150 МГц и на ~2% с частотой дискретизации 200 МГц.

Список литературы:

1. Березовский, В.А. Современная декаметровая радиосвязь: оборудование, системы и комплексы [текст] / В.А. Березовский, И.В. Дулькейт, О.К. Савицкий. – М.: Радиотехника, 2011. – 442 с.
2. Изгалин, С.П. Теоретические вопросы построения и развития ведомственных сетей ДКМВ радиосвязи [текст] / С.П. Изгалин и др. // Вестник академии военных наук. – 2009. – №3 (28). – С. 113–117.
3. Алехин, Ю.Н. Современные ВЧ радиокommunikационные системы – достойная альтернатива спутниковой связи [текст] / Ю.Н. Алехин, С.Г. Шаронин // Сети. – 1996. – №8. – С.39–43.
4. Березовский, В.А. Тенденции развития стационарных и мобильных комплексов радиосвязи [текст] / В.А. Березовский и др. // Вестник Академии Военных наук. – 2009. – №3 (28). – С.180–183.
5. Айзенберг, Г. З. Коротковолновые антенны [текст] / Г.З. Айзенберг и др. – 2-е изд.– М.: Радио и связь, 1985. – 536 с.
6. Патент № 2 289 180, РФ, МКИ H01Q 9/34. Широкополосный вертикальный излучатель [текст] / В.Ф. Маренко – Оpubл. 2006, Бюл. № 34.
7. Азаров, Г.И. Актуальные вопросы проектирования антенно-фидерных устройств средств радиосвязи и радиовещания: монография [текст] / Г.И. Азаров, Г.И. Трошин, А.С. Ильинский. – М.: Сайнс-Пресс, 2001. – 72 с.
8. Фролов, В.Л. Спутниковые измерения характеристик плазменных возмущений, создаваемых при нагреве ионосферы Земли мощным коротковолновым радиоизлучением стенда «Сура» [текст] / Фролов В.Л. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. – 2008. – Т. 51, № 11. – С. 915–925.
9. Марков, Г.Т. Антенны [текст] / Г.Т. Марков, Д.М.Сазонов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 528 с.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

[1] Ворфоломеев А.А. Схемы построения коротковолновых приемных многоканальных антенных систем [текст] / В.С. Будяк, А.А. Ворфоломеев, В.П. Кисмерешкин // Вестник Академии Военных наук. – 2009. – №3 (28). – С.43 – 46.

[2] Ворфоломеев А.А. Оценка энергетических потерь коротковолновых радиолиний [текст] / В.С. Будяк, В.П. Кисмерешкин, А.А. Ворфоломеев, О.В. Карасева // Омский научный вестник. – 2010. – №3 (93). – С. 258 – 263.

[3] Ворфоломеев А.А. Исследование динамики характеристик направленности коротковолновых антенн [текст] / В.С. Будяк, В.П. Кисмерешкин, О.В. Лиль, А.А. Ворфоломеев // Успехи современной радиоэлектроники. – 2011. – №11. – С. 43 – 48.

[4] Ворфоломеев А.А. Динамика характеристик направленности антенн коротковолновых систем связи [текст] / В.С. Будяк, В.П. Кисмерешкин, О.В. Лиль, А.А. Ворфоломеев // Антенны. – 2012. – Вып.1 (176). – С. 3 – 8.

[5] Ворфоломеев А.А. О влиянии временной дискретизации на направленность цифровой КВ приемной многоканальной антенной системы / А.А. Ворфоломеев // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2014. – №10. – С. 1 – 8. URL: <http://jre.cplire.ru/iso/oct14/2/text.pdf>

Другие статьи и материалы конференций:

[6] Ворфоломеев А.А. Разработка базовой технологии многоканального коротковолнового радиоприема с цифровым управлением положения формируемых диаграмм направленностей [текст] / В.С. Будяк, А.А. Ворфоломеев, П.В. Горяев, В.П. Кисмерешкин, В.П. Тушнолобов // Юбилейная науч.-техн. конф. «Современное состояние и перспективы развития специальных систем радиосвязи и радиоуправления»: Тез. докл., Омск: Изд. ФГУП «ОНИИП», 2008. – С.24 – 26.

[7] Vorfolomeev A.A. Improving Principles of Construction and Development of Circuits for HF Receiving Multichannel Antenna Systems [текст] / V.S. Budyak, A.A. Vorfolomeev // International Siberian Conference on Control and Communications «SIBCON-2009». Proceedings. Russia, Tomsk, 2009. – P.285 - 289.

[8] Ворфоломеев А.А. Анализ построения схем коротковолновых приемных многоканальных антенных систем [текст] / В.С. Будяк, А.А. Ворфоломеев, В.П. Кисмерешкин // Материалы II Всеросс. науч. – техн. конф. «Россия молодая:

передовые технологии в промышленность!», Омск: Изд. ОмГТУ, 2009. – Кн.1. – С.161 – 165.

[9] Ворфоломеев А.А. Об одной особенности динамики изменения характеристик направленности КВ антенн корпоративных систем связи [текст] / В.С. Будяк, В.П. Кисмерешкин, А.А. Ворфоломеев, О.В. Карасева // Материалы VII Междунар.науч.-техн. конф. «Динамика систем, механизмов и машин», Омск: Изд. ОмГТУ, 2009. – Кн.3. – С.272 – 276.

[10] Ворфоломеев А.А. Оценка согласованности характеристик направленности антенн и динамических параметров коротковолновых радиотрасс [текст] / В.С. Будяк, В.П. Кисмерешкин, А.А. Ворфоломеев, О.В. Карасева // Сб. докл. XVI Междунар. науч.-техн. конф. «Радиолокация. Навигация. Связь» – «RLNC – 2010», Воронеж: Изд. НПФ «Саквоее», 2010. – Т.2. – С.1476 – 1484.

[11] Ворфоломеев А.А. Влияние пространственно-временной дискретизации сигналов на характеристики КВ приемных многоканальных антенных систем [текст] / П.В. Горяев, В.С. Будяк, В.П. Тушнолобов, А.А. Ворфоломеев // Материалы III Всеросс. науч. – техн. конф. «Россия молодая: передовые технологии в промышленность!», Омск: Изд. ОмГТУ, 2010. – Кн.1. – С.146 – 151.

[12] Ворфоломеев А.А. Дискретизация в КВ приемных многоканальных антенных системах [текст] / В.С. Будяк, А.А. Ворфоломеев // Сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Радиотехника, электроника и связь» – «РЭС – 2011», Омск: Изд. «Радиотехника», ФГУП «ОНИИП», 2011. – С.274 – 281.

[13] Vorfolomeev A.A. Space – Time Discretization In HF Receiving Multichannel Antenna Systems / V.S. Budyak, A.A. Vorfolomeev // 2011 International Siberian Conference on Control and Communications «SIBCON-2011». Proceedings. Russia, Krasnoyarsk, 2011. – P.71 – 75.

[14] Ворфоломеев А.А. Дискретизация в приемных антенных системах [текст] / В.С. Будяк, А.А. Ворфоломеев // Докл. VI Всеросс. науч.-техн. конф. «Радиолокация и радиосвязь», М.: изд. JRE – ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2012. – Т.1. – С. 288 – 293.

[15] Ворфоломеев А.А. Антенные элементы узлов радиосвязи [текст] / В.С. Будяк, А.А. Ворфоломеев, О.В. Лиль // Сб. «Техника радиосвязи». – 2014. – Вып.1 (21). – С. 51-64.

[16] Патент №99250, РФ, МПК H01Q 9/18. Симметричный вертикальный диапазонный излучатель [текст] / А.А. Ворфоломеев, В.С. Будяк, О.В. Карасева – Оpubл. 2010, Бюл. №31.

[17] Патент №2426204, РФ, МКИ H01Q 21/00. Коротковолновая приемная многоканальная антенная система [текст] / В.С. Будяк, В.П. Кисмерешкин, В.П. Тушнолобов, П.В. Горяев, А.А. Ворфоломеев – Оpubл. 2011, Бюл. №22.

[18] Патент №2475958, РФ, МПК H04B 7/00, H04B 15/02. Автоматизированная приемо-передающая система коротковолновой связи [текст] / И.В. Дулькейт, Б.Г. Шадрин, В.С. Будяк, А.А. Ворфоломеев – Оpubл. 2013, Бюл. №. 5.