

На правах рукописи



Гениатулин Константин Агзамович

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ПРИ
ЧАСТОТНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНОМ ПЛАНИРОВАНИИ СИСТЕМ
СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ С ЗОНАЛЬНЫМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ**

05.12.04 Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Новосибирск – 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Носов Владимир Иванович.

Официальные оппоненты: Лозовский Игорь Филиппович,
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, ОАО НПО «НИИИП-НЗиК»,
начальник отдела 327.

Гельцер Андрей Александрович,
кандидат технических наук, доцент кафедры
Телекоммуникаций и основ радиотехники (ТОР)
ФГБОУ ВПО «Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Московский технический университет
связи и информатики» (МТУСИ),
факультет «Радио и телевидение»,
кафедра Систем и сетей радиосвязи и
телерадиовещания (СиСРТ).

Защита состоится « 09 » декабря 2014 г. в 14:00 час. на заседании диссертационного совета Д.212.173.08 при ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр-т Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета
к.т.н., доцент

Вихман Виктория Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Национальная система подвижной спутниковой связи (СПСС), которая бы полностью контролировалась и управлялась с российской территории, чрезвычайно важна как для индивидуальных пользователей, так и для многих государственных структур и промышленных корпораций страны. Первые подобные проекты датируются 90-ми годами. Однако, из-за отсутствия средств и (как следствие) конкурентоспособных отечественных разработок до сих пор на рынке присутствуют только зарубежные СПСС, такие как Thuraya, Inmarsat, Globalstar, ICO и др.

В условиях постоянного роста спектра услуг, предоставляемых системами спутниковой связи, увеличивающегося объема передаваемых данных, стремительного роста требований к скоростям их передачи, вопросы эффективного распределения частотного ресурса встают наиболее остро. При жестко ограниченном диапазоне частот, выделяемом для СПСС, а также не менее высоких требованиях к энергетике линий связи, используются различные способы обеспечения эффективного множественного доступа к спутниковому ретранслятору (СР). При этом наиболее широкое применение находят системы с зональным обслуживанием.

В рамках данного подхода при частотном планировании в пределах выделенной полосы частот на множестве лучей антенны СР определяется такое распределение частотных каналов, которое позволит использовать каждый частотный канал повторно максимально возможное число раз. Это обеспечивает эффективное использование частотного ресурса в системе, а возможность возникновения помех определяется совокупностью частотно-пространственных ограничений в зонах сети при назначении частотных каналов. В частности требуется, чтобы назначенные лучам некоторые комбинации частотных каналов были разнесены в пространстве на соответствующее этим комбинациям минимальное расстояние.

Реализация СПСС с зональным обслуживанием требует использования многолучевых антенн с узкими диаграммами направленностей (ДН) лучей. В частности, в рекомендациях Международного союза электросвязи (МСЭ) указаны требования к ширине луча ДН для спутниковых группировок из геостационарных СР - порядка 0,7-1 градусов. Наиболее эффективно такие лучи позволяют формировать антенные решетки (АР): линейные, плоские, концентрические круговые и др., в том числе с использованием технологий цифрового диаграммообразования. Большинство передовых зарубежных глобальных и региональных СПСС имеют узкие лучи ДН с цифровым формированием луча: Thuraya (спутники Турайя 1, 2 и 3); Inmarsat (Инмарсат-4); перспективные системы SkyTerra; Quasi-GEO компании Mitsubishi Electric и др. Вопросы использования антенн с цифровым формированием луча в спутниковой связи наиболее полно освещены в публикациях Слюсара В.И., Steele R., Gockler H.G.

При построении СПСС с зональным обслуживанием и, особенно с узкими лучами ДН, неизбежно возникают задачи оптимального частотно-территориального планирования (ЧТП) для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС). В целях достижения максимального эффекта необходимо учитывать степень взаимно-

го влияния лучей, формирующих отдельные парциальные зоны. В первую очередь она определяется пространственной конфигурацией диаграммы направленности антенны СР. Благодаря её анализу возможно определение ограничений на ЧТП сети.

Многообразие видов систем спутниковой связи, а также видов и типов используемых в них антенн не позволяет разработать универсальный метод присвоения частот, так как многие известные методы обладают ограничениями либо по точности получаемых результатов, либо по размерности задачи. Для разработки практически пригодных методов необходим учет особенностей постановки задач для различных случаев и поиск рациональных алгоритмов оптимизации. Поэтому актуальна задача анализа свойств различных алгоритмов оптимального присвоения частот в СПСС и поиск методов повышения их эффективности.

Следует отметить, что вопросы пространственного формирования лучей антенн спутниковых ретрансляторов подробно рассмотрены в работах зарубежных авторов (Hansen R. C., Balanis C. A., Monzingo R. A., Miller T. W.). В то же время, в отечественной литературе по данной тематике опубликованы лишь отрывочные материалы. В практической деятельности для расчёта условий ЭМС, особенно сетевых структур радиосвязи (наземного телевизионного вещания, радиорелейной и спутниковой связи), используются так называемые гарантированные огибающие ДН антенны в графической или аналитической форме, являющиеся результатом аппроксимации экспериментальных ДН реальных антенн. При этом структура боковых лепестков ДН антенны не учитывается в полной мере.

Кроме того, в научной литературе практически отсутствует информация о подходах к ЧТП в спутниковой связи как за рубежом (в том числе об алгоритмах, реализованных в существующих спутниковых системах), так и в отечественных публикациях. Это объясняется коммерческим характером иностранных разработок и отсутствием современных российских разработок в области СПСС с фазированными антенными решетками (ФАР), т.к. основной упор развития космической отрасли России сделан на развитие технологий VSAT.

При планировании наземных передающих сетей радиовещания применяются методы, основанные на использовании регулярной сетки элементарных треугольников, в вершинах которых располагаются передатчики. Также в последнее время при частотно-территориальном планировании сетей радиосвязи все чаще используется теория графов. Данной проблеме посвящены работы Arno G., Heil W., Jensen T. R., Struzak R.G., Gamst A., Быховского М.А., Дотолева В.Г., Дудкина С.Н., Зубарева Ю.Б., Гитлица М.В., Носова В.И., Зеленина А.Ю., Тигина Л.В.

Таким образом, центральным вопросом диссертационного исследования является разработка эффективных методов оптимального ЧТП на основе подходов, используемых в наземной связи, но применительно к спутниковым системам. Для этого моделируется граф, множество вершин которого однозначно соответствует множеству лучей многолучевой антенны. Ребрами соединяются те лучи, соответствующие парциальные зоны которых могут создавать друг другу недопустимые помехи. При разработке данного вопроса автор опирался на работы Носова В.И.

Цель работы и задачи исследования. Целью настоящей работы является исследование и разработка методов оптимального частотно-территориального плани-

рования сетей подвижной спутниковой связи с ФАР. Для достижения указанной цели в диссертационной работе потребовалось решение следующих задач:

1. Разработка методики определения частотно-пространственных ограничений в сетях подвижной спутниковой связи и определения энергетических параметров лучей АР, необходимых для проведения ЧТП сети с учетом множественности помех.

2. Разработка метода ЧТП, учитывающего требования к помехозащищенности сети, заданные частотно-пространственные ограничения и множественность помех.

3. Разработка методики оценки эффективности выделения частотного ресурса на основе анализа пропускной способности сети с учетом требований обеспечения электромагнитной совместимости.

4. Разработка метода оптимизации ЧТП, основанного на перераспределении частотного ресурса системы связи с учетом количества абонентов в луче.

5. Разработка программной модели и алгоритмов для экспериментального исследования методов ЧТП при частотно-территориальном планировании системы спутниковой связи.

Методы исследования. Для решения поставленных задач используются методы статистической радиотехники, теории вероятностей, теории графов, математического моделирования, теории распространения радиоволн, а также методы вычислительной математики и статистического моделирования. Часть результатов получена с использованием численных методов, реализованных на компьютере в среде Mathcad. Для подтверждения полученных теоретических результатов разработана программная модель и реализованы программные алгоритмы с применением языка программирования C++, с помощью которых выполнены экспериментальные исследования.

Научная новизна результатов работы. Результат диссертационной работы заключается в разработанных эффективных методах оптимального ЧТП для сетей подвижной спутниковой связи, аналоги которых в доступной литературе существуют для наземной мобильной связи, но отсутствуют для спутниковых систем. В диссертационной работе разработан ряд новых методов и методик:

1. Методика определения частотно-пространственных ограничений для СР с плоскими и концентрическими круговыми антенными решетками, с учетом влияния помех по боковым лепесткам и множественности помех.

2. Модифицированный метод ЧТП СПСС на основе координационных колец.

3. Методика оценки эффективности выделения частотного ресурса на основе анализа пропускной способности сети.

4. Метод координационных колец, модифицированный алгоритмами краска-вершина и вершина-краска, оптимизированный за счет перераспределения частотного ресурса системы связи с учетом количества абонентов в луче.

Достоверность полученных результатов. Достоверность научных результатов подтверждается корректными аналитическими выкладками и математическим моделированием, полнотой учета факторов, влияющих на ЭМС каналов, параметров спутниковых линий связи, характеристик антенных решеток, публикациями в российских рецензируемых научных журналах.

Основные положения работы, выносимые на защиту:

1. Методика определения частотно-пространственных ограничений для спутниковых ретрансляторов с плоскими и концентрическими круговыми антенными решетками позволяет учесть при ЧТП влияние боковых лепестков ДН АР и множественности помех в условиях неоднородности системы спутниковой связи и определить уровень помехозащищенности в отдельных лучах МЛА.

2. Модифицированный метод координационных колец позволяет решить задачу оптимального частотно-территориального планирования СПСС, обеспечив электромагнитную совместимость между работающими в совмещенном и соседнем каналах приема лучами МЛА с учетом частотных и энергетических ограничений сети.

3. Методика оценки пропускной способности сети, основанная на определении в условиях неоднородности СПСС уровня помехозащищенности каждого луча МЛА в зависимости от присвоенных ему частот, позволяет оценить эффективность выделения частотного ресурса и пространственного разнесения каналов при заданных требованиях к ЭМС.

4. Метод координационных колец, модифицированный алгоритмами краска-вершина и вершина-краска и оптимизированный за счет перераспределения частотного ресурса системы связи с учетом количества абонентов в луче, дает 6,4% прироста к пропускной способности сети.

5. Алгоритмы методов ЧТП и их программная реализация позволяют осуществить частотно-территориальное планирование системы спутниковой связи с повышенной помехоустойчивостью.

Практическая ценность результатов работы. Проведенные исследования, разработанные методики и полученные зависимости внедрены в учебный процесс и используются в научно-практической деятельности при рассмотрении вопросов частотно-территориального планирования СПСС в Институте ФСБ России (г. Екатеринбург), что подтверждается актом внедрения.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе в ФГБОУ ВПО СибГУТИ на кафедре Систем радиосвязи (СРС) и подтверждены актом использования.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

1. Российская научно-практическая конференция «Информатика и проблемы телекоммуникаций», г. Новосибирск, 2008, 2009, 2010, 2011 гг.

2. Российская научно-практическая конференция «Современные проблемы телекоммуникаций», г. Новосибирск, 2012, 2013, 2014 гг.

Публикации. Всего по теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе: 2 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 1 патент на программное обеспечение; 3 статьи в научных журналах; 9 тезисов докладов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Она содержит 164 страницы основного текста, 72 рисунка, 14 таблиц. В библиографию включено 69 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* приводится анализ актуальности исследуемого вопроса. Сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Приведены научные результаты, выносимые на защиту, указаны состав и структура диссертации.

Первая глава является обзорной и заканчивается постановкой задач исследования. Рассмотрение общих принципов построения многолучевых СПСС с зональным обслуживанием и международных стандартов позволило выделить наиболее перспективные конфигурации систем спутниковой связи для изучения вопросов обеспечения ЭМС при проведении ЧТП. Современные СПСС используют адаптивные многолучевые ФАР с узкими лучами, применяющие технологии цифрового формирования лучей, для реализации которой на борту СР осуществляется бортовая обработка сигналов и используются диаграммообразующие схемы.

Проведенный обзор действующих и перспективных СПСС с зональным обслуживанием позволил определить границы базовых параметров СР и абонентских терминалов для исследования методов частотно-территориального планирования. Требуемые эквивалентная изотропно-излучаемая мощность ЭИИМ и коэффициент усиления многолучевой антенны (МЛА) выбраны исходя из рекомендаций МСЭ для СПСС, работающих в L диапазоне частот. С учетом того, что подавляющее большинство действующих СПСС используют портативные терминалы, аналогичные используемым в Thuraya, для исследования ЧТП взяты технические характеристики антенн абонентских устройств, тип модуляции и рабочие диапазоны частот, принятые для данной системы.

Реальные сети подвижной спутниковой связи имеют нерегулярную и неоднородную структуру. В то же время, в угломерной спутниковой проекции зона обслуживания всегда будет иметь вид правильной гексагональной структуры, что позволяет проводить в них ЧТП на основе регулярной гексагональной модели сети.

ДН антенны СР имеет боковые лепестки, которые в условиях множественности помех могут оказать значительное влияние на помехозащищенность системы при малых размерностях кластера.

В доступной литературе практически отсутствуют методы ЧТП для спутниковых систем связи с зональным обслуживанием, которые бы позволили учесть указанные факторы.

В этой связи, в результате рассмотрения существующих методик планирования сетей мобильной радиосвязи, в т.ч. основанных на универсальной гексагональной модели сети, сделан вывод о необходимости совершенствования существующих и разработки новых эффективных методов частотно-территориального планирования.

Во *второй главе* рассмотрены характеристики ДН плоских и кольцевых концентрических антенных решеток, которые используются в современных СПСС с зональным обслуживанием. В результате определены перспективные конфигурации антенной решетки СПСС для исследования и разработки методик осуществления оптимального частотно-территориального планирования, получены выражения для расчета их ДН в аналитическом виде.

Исследование параметров эквидистантной плоской АР показало, что при её использовании для обеспечения ширины главного лепестка на уровне половинной мощности 1° размерность решетки должна быть не менее $N \times M = 100 \times 100$ элементов. Поэтому такие решетки в составе ФАР в спутниковой связи практически не используются.

Узкой ширины луча ДН при меньшем числе элементов позволяют добиться ФАР, построенные на основе неэквидистантной концентрической кольцевой антенной решетки (ККАР). При этом сравнительно малое количество элементов (около 200) обеспечивают ширину ДН около 1° и низкий уровень боковых лепестков (от -22 до -27 дБ) в пределах зоны видимости спутника.

Для исследования в рамках данной работы выбрана ККАР, оптимизированная по радиусу колец R_m . Несмотря на то, что такая решетка состоит всего из 201 элемента, она обеспечивает максимальный уровень боковых лепестков не более $-22,94$ дБ и ширину ДН на уровне половинной мощности, равную $0,933^\circ$. На рисунке 1 приведена нормированная диаграмма направленности луча ДН данной ККАР, смоделированная в пакете MathCAD и её сечение в плоскости $\varphi=0$.

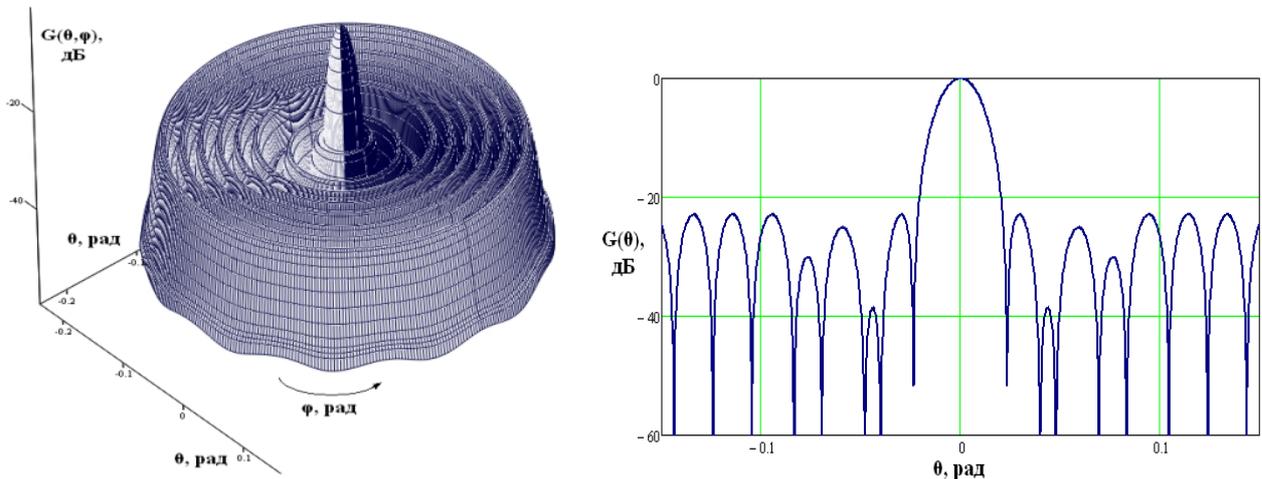


Рисунок 1 – График зависимости $G(\theta, \varphi)$ ККАР

Рассмотрена методика построения зоны покрытия лучей антенной решеткой. Для построения регулярной сети использована *угловая спутниковая проекция* с координатами (β_1, β_2) .

Для обратного перехода к геоцентрической системе координат получены выражения:

$$\varphi = \arcsin \frac{H \cos(\beta_1) \operatorname{ctg}(\beta_2) - \sqrt{(H \cos(\beta_1) \operatorname{ctg}(\beta_2))^2 - (\operatorname{ctg}^2(\beta_2) + 1)(H^2 - R^2)}}{R(\operatorname{ctg}^2(\beta_2) + 1)}, \quad (1)$$

$$\Delta\lambda = \arcsin(\tan(\varphi) \cdot \sin \beta_1 \cdot \operatorname{ctg}(\beta_2)) + \lambda_s, \quad (2)$$

где φ, λ – географическая широта и долгота точки N ; λ_s – долгота подспутниковой точки CP ; R – радиус Земли; H – радиус орбиты CP .

Для удобства построения гексагональной сети предложено перейти к координатам $(x; y)$ на плоскости, проходящей по касательной к земной сфере. Формулы для перехода к координатам на плоскости:

$$x = (H - R) \tan(\beta_1), \quad y = (H - R) \tan(\beta_2). \quad (3)$$

По методике Машбица Л.М. построена зона обслуживания СР в геоцентрической проекции (рисунок 2а), выведенного на геостационарную орбиту 90° в.д. Многолучевая антенная решетка формирует 40 узких лучей, каждый из которых имеет ширину ДН равную 1° . Позиция 90° в.д. выбрана исходя из того, что дуга 80° - 90° в.д. оптимальна для формирования рабочей зоны, максимально охватывающей Россию. Соответствующая зона обслуживания в угловой спутниковой проекции приведена на рисунке 2б.

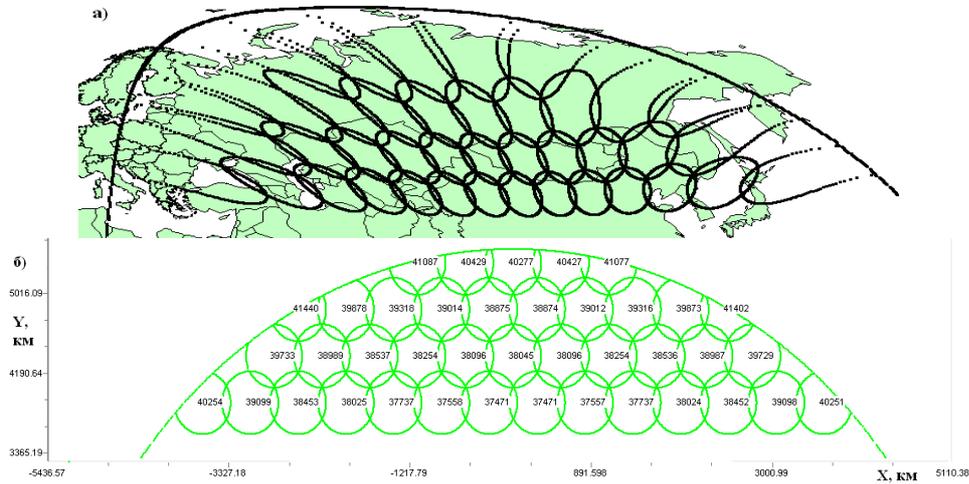


Рисунок 2 – Зона обслуживания СР на геостационарной орбите 90° в.д.

а) в географических координатах б) в угловой спутниковой проекции

Пересечение зон обслуживания лучей осуществляется на уровне -3 дБ ДН АР, которое является оптимальным и, как правило, применяется на практике. Как видно на рисунке 2б гексагональная сеть спутниковой связи носит регулярную структуру. В то же время при проведении ЧТП необходимо учитывать её неоднородность, вызванную различной наклонной дальностью в каждом из лучей, которая может варьироваться от 37,4 до 40,4 тыс. км (на рисунке 2б наклонная дальность d , км указана в центрах лучей).

Получены выражения для энергетического расчета линий связи, необходимые для ЧТП. Результирующее значение сигнал/(шум+помеха) (Signal Interference + Noise Ratio, SINR) на линии вверх определяется выражением:

$$\left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}} + P_{\text{инт}}} \right)_{\text{вверх}} = \frac{P_{\text{аб.терм}}}{P_{\text{ш.спутн}} + P_{\text{инт}}} = \frac{\text{ЭИИМ}_{\text{аб.терм}} \cdot G_{\text{спутн}_0} \cdot G(\theta, \varphi)}{k \cdot B \cdot T_{\text{спутн}} \cdot L_{\text{вверх}} \cdot L_{\text{доп}} + P_{\text{инт}}}, \quad (4)$$

где $P_{\text{инт}}$ – мощность интерференционной помехи от других лучей МЛА, использующих тот же частотный канал, что и рассматриваемый; $G(\theta, \varphi) = 20 \lg(F(\theta, \varphi)/F(0, 0))$ – нормированная функция множителя решетки в логарифмическом масштабе; $G_{\text{спутн}_0}$ – коэффициент усиления антенны в направлении максимума ДН; $L_{\text{доп}}$ – дополнительные потери сигнала в атмосфере.

Результирующее отношение SINR на линии вниз:

$$\left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}} + P_{\text{инт}}} \right)_{\text{вниз}} = \frac{P_{\text{спутн}}}{P_{\text{ш.аб.терм}} + P_{\text{инт}}} = \frac{\text{ЭИИМ}_{\text{спутн}_0} \cdot G(\theta, \varphi) \cdot G_{\text{аб.терм}}}{k \cdot B \cdot T_{\text{аб.терм}} \cdot L_{\text{вн}} \cdot L_{\text{доп}} + P_{\text{инт}}}. \quad (5)$$

Разработана методика определения частотно-пространственных ограничений,

позволяющая обеспечить ЭМС при ЧТП за счет учета влияния боковых лепестков ДН АР и множественности помех в условиях неоднородной системы спутниковой связи и определить уровень помехозащищенности в отдельных лучах МЛА

Множество зон обслуживания лучей ДН антенны обозначено через $M = \{m_i \mid i=1, \dots, M\}$. Дискретное множество частотных каналов, выделенных для СПСС, обозначим через $F = \{f_k \mid k = 1, \dots, K\}$. Подмножество $M^* \subseteq M$ включает в себя все лучи ДН, которым назначен один и тот же частотный канал f_k из множества F ($M^* = M$ при единичном кластере), т.е. лучи работающие в совмещенном канале.

Тогда уровень помехи IR (interference ration), создаваемый другими лучами, работающим в том же частотном диапазоне, определяется из элементов множества M^* на основе выражения:

$$IR_{m_i} = 10 \lg \left(\frac{G(\theta_k)}{\sum_{k=1}^{card(M^*)} 10} \right), k \neq i, m_i \in M^*; \quad (6)$$

$card(M^*)$ – мощность множества M^* , $card(M^*)=M$; θ_k – угол между границей зоны обслуживания i -го луча и осью ДН АР k -го мешающего луча, который в плоской системе координат вычисляется по формуле:

$$\theta_k = arctg \left(\frac{\sqrt{(x_i^* + R_s - x_k^*)^2 + (y_i^* - y_k^*)^2}}{H - R} \right). \quad (7)$$

Суммарная мощность помехи от всех мешающих лучей на линии вверх определяется выражением:

$$P_{инт\ вверх} = \sum_{i=1}^M \left(\text{ЭИИМ}_{аб.терм} \cdot G_{спутн_0} \cdot IR_{m_i} \right), \quad (8)$$

На линии вниз:

$$P_{инт\ вниз} = \sum_{i=1}^M \left(\text{ЭИИМ}_{спутн_0} \cdot IR_{m_i} G_{аб.терм} \right), \quad (9)$$

По разработанной методике проведена оценка уровня SINR на линиях вверх и вниз. Полученные результаты показали, что в случае направления максимума ДН луча на точку с координатами (33°18' с.ш., 90°00' в.д.), для которой наклонная дальность $d = 37012$ км, уровень сигнал/шум в беспомеховой ситуации равен 7,3 дБ на линии вверх и 14,3 дБ на линии вниз. При учете в расчетах ближайших мешающих лучей, в зависимости от расстояния до них, определяемого размерностью кластера, разница между отношением сигнал/шум (без учета помех) и SINR может достигать 1,2 дБ на линии вверх и 6,2 дБ на линии вниз.

Построенная зона обслуживания и предложенная методика определения частотно-пространственных ограничений позволяют построить модель СПСС и провести в ней ЧТП различными методами.

В *третьей главе* на основе анализа методов и алгоритмов ЧТП для дальнейшего исследования предложен метод координационных колец с использованием

представления сети радиосвязи в виде графа, позволяющий обеспечить требуемые условия ЭМС за счет учета накладываемых на сеть частотно-пространственных ограничений.

Суть задачи оптимизации частотного плана состоит в присвоении лучам АР частотных каналов, при котором минимизируется уровень взаимных помех в сети и размерность кластера частот ($C_{\text{кл}}$).

На основе метода координационных колец (МКК) для наземных радиосетей, разработан МКК для СПСС, модифицированный методом ветвей и границ (МКК МВиГ). Данный метод представляет собой модифицированный алгоритм раскраски графов и позволяет учесть неоднородность сети; наличие помех от главных и боковых лепестков ДН лучей, работающих в совмещенном канале; ограничения на использование соседних каналов в пределах одной зоны обслуживания.

Пусть $G = (V, E)$ – неориентированный граф без петель. Вершинами графа СПСС V являются центры парциальных зон обслуживания, формируемые МЛА. Ребрами E соединяются те центры парциальных зон, которые создают помехи приему в соответствующей зоне обслуживания друг друга. $H : E \rightarrow \psi$ – реберное множество запрещений графа G . Необходимо найти такое $A : V \rightarrow C$ обеспечивающее $\text{card } A(V) \rightarrow \min$, что

$$\forall v_i, v_j \in V : \{A(v_i), A(v_j)\} \in H(e_{ij}), e_{ij} = (v_i, v_j) \in E.$$

При решении задачи о раскраске вершин графа необходимо определить смежность пар вершин (или влияние пар лучей друг на друга), т.е. необходимо ответить на вопрос: создают ли данные лучи недопустимый уровень помех друг другу.

Для решения этой задачи предложено использовать коэффициент взаимного влияния (КВВ):

$$KBB = 1 - \frac{\min(D_{k_{ij}}, D_{k_{ji}})}{R_{\text{макс}}}, \quad (10)$$

где $D_{k_{ij}}$ – координационное расстояние для i -го луча при назначении j -му лучу совмещенного канала, а $D_{k_{ji}}$ – для j -го луча при назначении i -му лучу совмещенного канала с учетом интерференционной помехи; $R_{\text{макс}}$ – расстояние, при котором при отсутствии помех выполняется условие $SINR = A_3$. Защитное отношение A_3 определяется на границе зоны обслуживания луча МЛА как допустимое отношение мощности полезного сигнала к суммарной мощности шума и интерференционных помех от других лучей.

Допустимые пределы изменения КВВ формируют координационное кольцо. Параметры γ и ε , задаваемые эмпирически, определяют его внутреннюю и внешнюю границы. Таким образом, оптимальное назначение частот и, соответственно, эффективное использование спектра, предлагается определять при условии:

$$\gamma < KBB < \varepsilon. \quad (11)$$

Если $KBB \geq \varepsilon$, то уровень взаимных помех считается недопустимо высоким; если же $KBB \leq \gamma$, то снижается эффективность использования спектра.

Пусть частотный канал f_k присвоен некоторому лучу A . Тогда вокруг него вы-

деляется множество лучей, которым критерий (11) запрещает назначить канал f_k ввиду сильных взаимных помех с лучом A , т.е. рассматриваемое ребро принадлежит множеству запрещений графа G :

$$KBB \geq \varepsilon : \{A(v_j), A(v_A)\} \in H(e_{jA}), e_{jA} = (v_j, v_A) \in E. \quad (12)$$

Лучи, образующие с зоной A оптимальные пары, расположены на территории, ограниченной двумя контурами (внешним и внутренним, рисунок 3) и по форме представляющей собой строгое кольцо (т.к. мы рассматриваем регулярную сеть) удовлетворяют условию:

$$\gamma < KBB < \varepsilon : \{A(v_j), A(v_A)\} \notin H(e_{jA}), e_{jA} = (v_j, v_A) \in \emptyset. \quad (13)$$

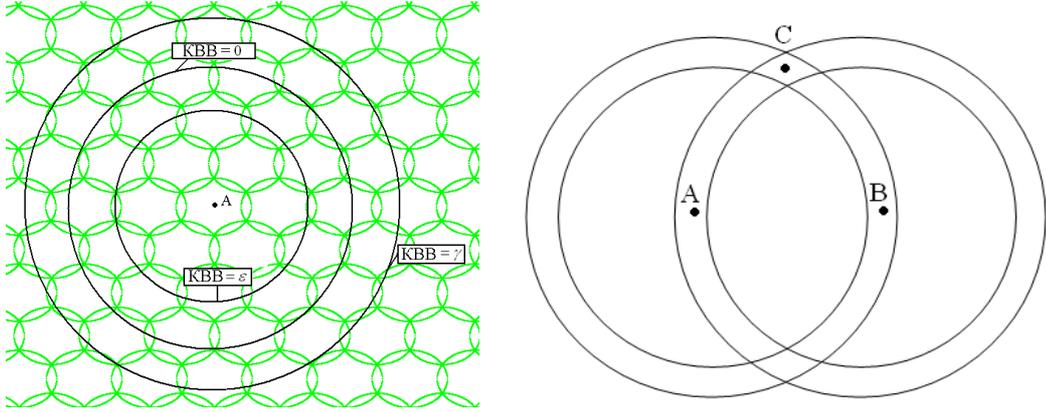


Рисунок 3 – Построение координационного кольца

Множество этих лучей составляют координационное кольцо зоны A . Внутри него для очередного присвоения канала f_k выбирается зона B . Назначение канала f_k зоне C , находящийся на пересечении координационных колец зон A и B удовлетворяет критерию оптимальности частотных присвоений по отношению сразу к двум зонам A и B , которым уже присвоен канал f_k :

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma < KBB < \varepsilon : \{A(v_C), A(v_A)\} \notin H(e_{CA}), e_{CA} = (v_C, v_A) \in \emptyset \\ \gamma < KBB < \varepsilon : \{A(v_C), A(v_B)\} \notin H(e_{CB}), e_{CB} = (v_C, v_B) \in \emptyset \end{array} \right\}. \quad (14)$$

Для оптимального распределения зон внутри координационного кольца применен метод ветвей и границ, суть которого состоит в последовательном разбиении допустимого множества на подмножества (ветвление) и вычисление оценок (границ), позволяющих отбрасывать подмножества, заведомо не содержащие решения задачи.

С учетом того, что рассматривается сеть регулярной структуры, центры всех мешающих зон обслуживания для любого из лучей располагаются строго на окружности радиуса r_0 (относительное координационное расстояние), а допустимые размерности кластера соответствуют универсальной модели сети. Лучам ДН назначается только часть частотных каналов из общего числа выделенных для сети. Их количество соответствует размерности кластера частот $C_{кл}$. Остальные частотные каналы равномерно распределяются для каждого луча в соответствии с выражением:

$$f_k = f_0 + k \cdot C_{кл}, k = 1, \dots, m, \quad (15)$$

где m – количество частотных каналов в луче, связанное с размерностью кластера $C_{кл}$ и общим количеством частотных каналов в сети выражением $m = K_{\Sigma} / C_{кл}$.

На конкретном примере показано, что МКК МВиГ позволяет решить задачу оптимального частотного планирования СПСС с учетом частотных и энергетических ограничений сети. Вместе с тем, предложено изменить указанный метод, таким образом, чтобы появилась возможность учитывать частотно-пространственные ограничения непосредственно при назначении каждого частотного канала в отдельности, а также оптимизировать распределение частотного ресурса в сети с учетом загрузки сети в каждом луче (активности абонентов).

Для этого разработан метод координационных колец, модифицированный алгоритмами вершина-краска и краска-вершина, позволяющий учитывать частотно-пространственные ограничения непосредственно при назначении каждого частотного канала в отдельности, а также неоднородность сети. Данный метод основан на многократном упорядочении вершин графа и множества цветов при исключении из множества V окрашенной очередной вершины. Принятая классификация таких алгоритмов разделяет их на два класса: «вершина – краска» и «краска – вершина».

Алгоритм содержит следующие основные операции: – формирование очереди лучей; – выбор по определенному критерию частоты (канала) для очередного луча (из числа разрешенных для него частот (каналов)); – корректировка таблицы разрешенных частот для лучей, не имеющих частотного присвоения, которые оказываются для них запрещенными вследствие присвоения канала очередной зоне обслуживания; – переход к рассмотрению следующего луча.

Алгоритм выбора каналов и лучей, при использовании алгоритмов типа «вершина – краска» и «краска – вершина», включает следующие операции: – определение множества зон лучей, с которыми рассматриваемый луч связан недопустимыми взаимными помехами; – определение для каждого луча числа разрешенных для присвоения каналов; – выбор по определенному критерию номера канала для очередного луча из списка разрешенных для него каналов, удовлетворяющему этому критерию (либо в случае алгоритма «краска-вершина» выбор луча для очередного канала из списка разрешенных для него лучей).

Обобщенный алгоритм оптимального частотного планирования СПСС с использованием предложенной методики для алгоритмов типа «вершина – краска» включает в себя: 1) подготовку исходных данных (координаты центров зон обслуживания лучей, характеристики ДН СР, ЭИИМ передатчика и коэффициент усиления антенны G , радиус зоны обслуживания R_z , определяемый раскрытием ДН луча по уровню половинной мощности); 2) анализ ЭМС лучей; 3) выбор очередного луча; 4) поиск для него частотного присвоения.

Для алгоритмов типа «краска – вершина» действия 3 и 4 меняются местами.

Для каждого луча задается матрица запрещенных для использования каналов и матрица SINR. Первая матрица – строка, длиной K (общее число каналов). Неравенство нулю i -го элемента означает невыполнение в этом канале условий ЭМС и о его запрещении для дальнейшего использования для рассматриваемого луча. Вторая матрица – строка, также имеющая размерность K , каждый элемент которой содержит уровень SINR при использовании для связи данной частоты в луче (SINR рассчитывается на границе зоны обслуживания). Значения элементов данных матриц используются для оценки допустимости назначения того или иного частот-

ного канала лучу и корректируется при каждом частотном присвоении.

Выбор очередного луча осуществляется на основе различных критериев, которые и были положены в основу разновидностей разработанных алгоритмов, условно названных А, В, С, D, Е. Их отличие заключается в подходах к порядку выбора лучей.

Алгоритм А – по порядку вершин. Лучи выбираются последовательно один за другим, начиная с первого и далее с увеличением порядкового номера луча, т.е. после присвоения канала i лучу, идет присвоение $i + 1$ лучу.

Алгоритм В – по минимуму частотных присвоений. В данном случае из множества лучей первым выбирается тот, который на текущем шаге имеет наименьшее число частотных присвоений, разрешенных по условиям ЭМС.

Алгоритм С – по минимуму частотных присвоений плюс максимальная степень вершины. В этом алгоритме, как и в алгоритме В, частотное присвоение первым получает луч, имеющий наименьшее число разрешенных по условиям ЭМС частотных присвоений. При равенстве этого показателя у нескольких претендентов учитывается степень вершины (число лучей, которое может оказать мешающее влияние на исследуемую зону обслуживания).

Алгоритм D – по максимальной степени вершины.

Алгоритм Е – по наибольшему числу требуемых частотных каналов.

Выбор оптимального частотного присвоения для определенного на предыдущем этапе решения луча производится из разрешенных каналов по условиям ЭМС. Для принятия решения о допустимости частотного присвоения предложено производить расчет КВВ по формуле:

$$KBB = 1 - \frac{\min(SINR_{ij}, SINR_{ji})}{SNR}, \quad (16)$$

где $SINR_{ij}$ – отношение сигнал/(шум+помеха), которое установится в i луче при назначении j лучу совмещенного канала; SNR – отношение сигнал/шум в условиях отсутствия интерференционных помех.

Возможны два варианта выбора канала:

- с максимально допустимым уровнем помех (КВВ должно быть минимальным, но не менее γ);

- с минимальным уровнем поля помех (КВВ должно быть максимальным, но не более ε).

Данные варианты условно обозначены цифрами 1 – первый случай, 2 – второй. Таким образом, в данном модифицированном методе сохраняется идея метода координационных колец.

Были также разработаны алгоритмы, относящиеся к классу «краска-вершина». Они условно были названы F, G, H, I, J. В данных алгоритмах фиксируется очередной номер канала, начиная с первого, а затем выбираются все лучи, которые могут его использовать с допустимым уровнем взаимных помех, причем выбор очередного луча осуществляется описанными выше методами: – алгоритм F по порядку выбора вершин соответствует алгоритму А; – алгоритм G – алгоритму В; – алгоритм H – алгоритму С; – алгоритм I – алгоритму D; – алгоритм J – алгоритму Е.

Для сравнения разработанных методов ЧТП предложена методика оценки эф-

эффективности выделения частотного ресурса на основе анализа пропускной способности и суммарной скорости передачи данных в сети. Методика включает в себя:

- определение пропускной способности каждого частотного канала в лучах сети по рассчитанному уровню сигнал/(шум+помеха), который заносится в матрицу полей по окончании проведения ЧТП;

- расчет пропускной способности луча СПСС с учетом набора присвоенных ему частотных каналов;

- определение общей пропускной способности сети, которая позволяет оценить эффективность различных методов ЧТП.

Удельная пропускная способность i -го луча является средним арифметическим удельных количеств информации, переданных в луче, к количеству выделенных лучу частотных каналов:

$$C_{W_i} = \frac{1}{K_i} \sum_{k=0}^{K_i-1} \log_2(1 + SINR_k) , \text{ бит/с/Гц.} \quad (17)$$

Задавшись конкретными параметрами многолучевой спутниковой системы, можно вычислить полную пропускную способность всей сети:

$$C = \frac{N_b \cdot B \cdot K}{C_{\text{кл}}} \cdot \frac{\sum_{i=0}^{\text{card}(M)-1} C_{W_i}}{1 + \alpha} , \text{ бит/с.} \quad (18)$$

где C_{W_i} , бит/с/Гц - удельная пропускная способность i -го луча; B , Гц – полоса частот сигнала; K – общее число каналов в сети; $C_{\text{кл}}$ – размерность кластера; N_b – количество лучей AP CP; α – коэффициент скругления спектра.

Оценка пропускной способности сети по выражению (19) показала, что значение C резко снижается с ростом $C_{\text{кл}}$.

Для более точного сравнения различных методов ЧТП предложено определять скорость передачи данных в частотном канале с учетом используемой сигнально-кодовой конструкции. Скорость передачи информации в канале определяется исходя из скорости кода по формуле:

$$R_c = R(k/n), \quad \text{бит/с,} \quad (19)$$

где k/n – отношение числа информационных бит к общему количеству передаваемых бит; R – скорость передачи в радиоканале, бит/с.

Зная взаимосвязь защитных отношений A_3 и скоростей кода при выбранной модуляции и типе кодирования можно выбрать скорость кода, которая допустима при текущем значении SINR в частотном канале и рассчитать R_c . Для кодов с большими скоростями требуется большее защитное отношение A_3 . Например, для кода FEC 5/6 при скорости передачи в канале $R = 46,8$ Кбит/с, $R_c = 39$ Кбит/с.

С учетом (21) суммарная скорость передачи информации в сети определяется по формуле:

$$R_{\Sigma} = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{c=0}^{F_i-1} \left[R \left(\frac{k}{n} \right)_{ci} \right] , \text{ бит/с,} \quad (20)$$

где $(k/n)_{ci}$ – скорость кода с учетом SINR в c -м канале, присвоенном i -му лучу; M – количество лучей в СПСС; F_i – количество доступных в i -м луче частотных каналов.

Исследование зависимости пропускной способности сети и суммарной скорости передачи информации в сети от размерности кластера (рисунок 4) показало, что пропускная способность в условиях множественности помех ниже чем в случае единичной помехи (в трехчастотной сети разница составляет около 170 Мбит/с).

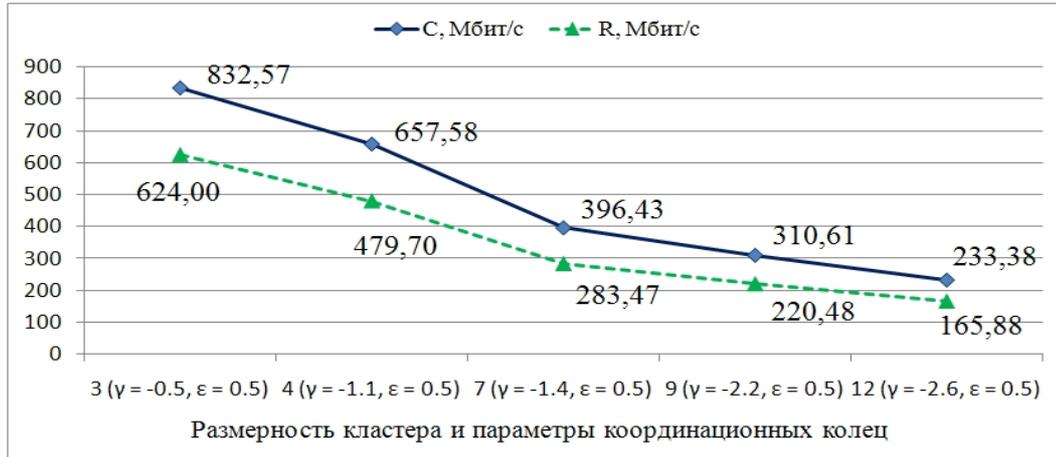


Рисунок 4 – Зависимость пропускной способности сети от размерности кластера

Анализ зависимости пропускной способности, скорости и SINR от ЭИИМ сигнала, излучаемого передатчиком абонентского терминала на линии вверх (рисунок 5) показал, что при $\text{ЭИИМ}_{\text{терм}} \geq 10,5$ дБВт наблюдается избыточность SINR (6,6 дБ и выше), т.к. выбранная сигнально-кодовая конструкция имеет максимальную скорость передачи информации при FEC 9/10 и защитном отношении 6,42 дБ. Кроме того, при $\text{ЭИИМ}_{\text{терм}} \geq 10,5$ дБВт значение C с ростом SINR продолжает расти, а значение R остается неизменным, достигая максимального значения в 624 Мбит/с. В этой связи, сделан вывод о целесообразности проведения сравнения методов ЧТП по скорости передачи данных, а не по пропускной способности.

С помощью разработанной методики проведено сравнение эффективности различных модификаций МКК на линии вверх при различных значениях $\text{ЭИИМ}_{\text{терм}}$ (рисунок 6). Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что модификации МКК А1, В1, F, G, H, I дают одинаковый с МКК МВиГ результат по суммарной скорости передачи данных при $C_{\text{кл}}=3$. Это подтвердило тот факт, что при равномерном распределении частотных каналов по сети (регулярная структура) суммарная пропускная способность сети достигает максимального значения.

Алгоритмы С1 и D1 привели к увеличению коэффициента $C_{\text{кл}}$ до 5 и незначительному уменьшению SINR и пропускной способности в связи с нарушением регулярной структуры частотного плана.

Алгоритмы МКК А2, В2, С2 и D2 приводят к повышению SINR при одновременном увеличении кластера. Это сказывается на снижении общей пропускной способности сети. Данный эффект обусловлен нижней границей $\gamma = -2$. Чем меньше её значение, тем больше увеличивается координационное расстояние между центрами зон обслуживания при назначении частот по критерию минимального поля помех.

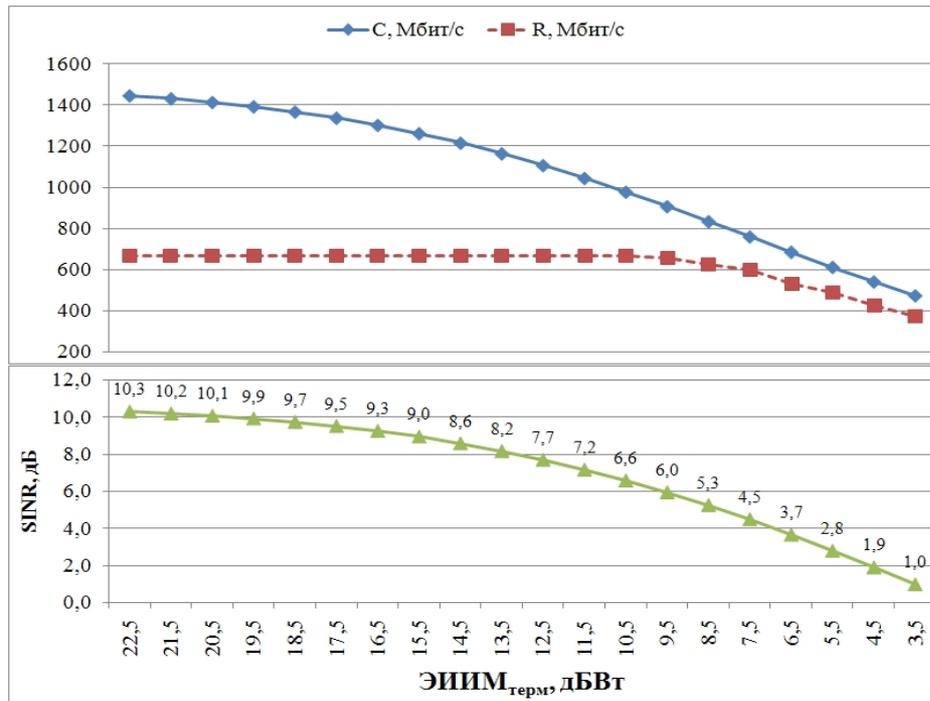


Рисунок 5 – Зависимость пропускной способности, скорости и SINR от $\text{ЭИИМ}_{\text{терм}}$

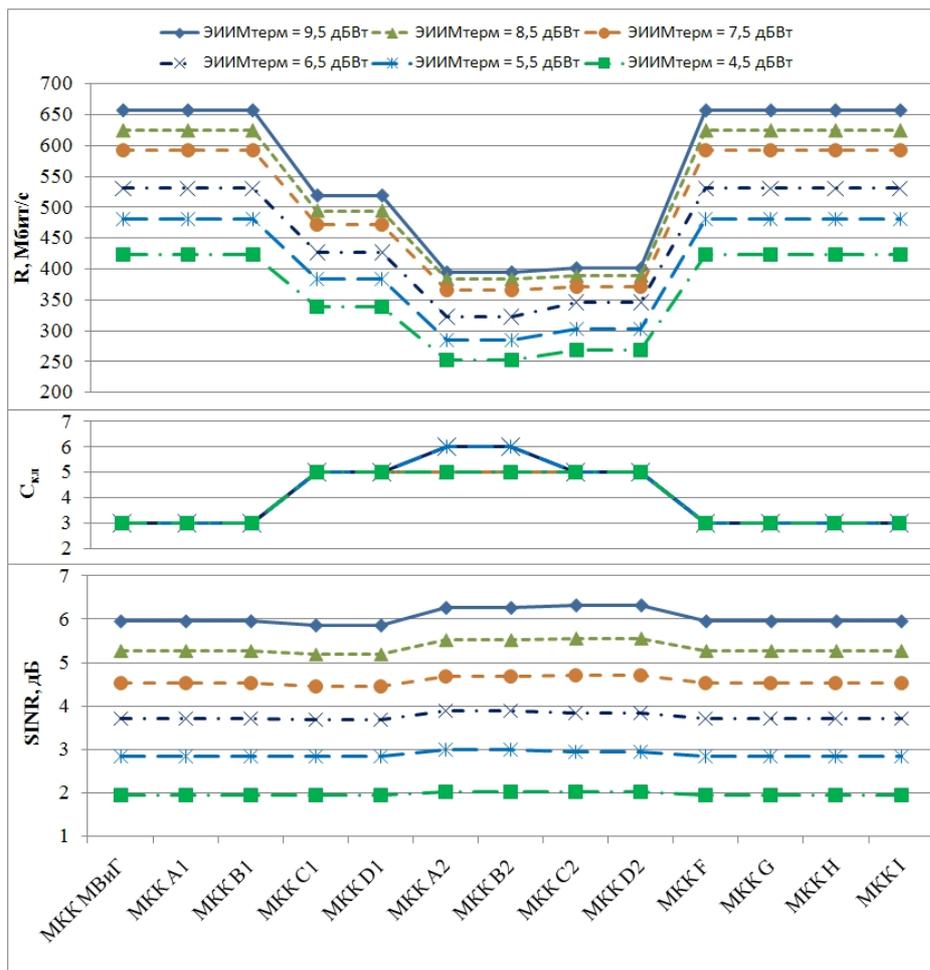


Рисунок 6 – Сравнение эффективности различных методов ЧТП

Таким образом, в случае распределения всех частотных каналов по сети без учета количества абонентских терминалов, требующих ресурса сети, МКК, модифицированный методами краска-вершина и вершина краска не позволяет

увеличить пропускную способность сети по сравнению с МКК, модифицированным МВиГ. Показано, что этот недостаток можно устранить, оптимизировав методы ЧТП за счет учета распределения абонентских терминалов по зонам обслуживания лучей AP CP.

С целью повышения эффективности использования частотно-временного ресурса СПСС предложено осуществлять перераспределение неиспользуемых частотных каналов в лучи с большей загрузкой. Данный метод оптимизации ЧТП подразумевает адаптацию частотного плана к количеству пользовательских ЗС, требующих частотный ресурс. Для решения этой задачи при ЧТП перед назначением частоты лучу выполняется проверка его текущей загрузки.

При распределении частотных каналов в соответствии с разработанными методами ЧТП на каждый i луч можно выделять такое количество частот, которое необходимо для обслуживания N_i абонентов. Т.к. по стандарту GMR-1 при TDMA для обеспечения связи 8 абонентам достаточно одного частотного канала, то требуемое число частот в луче можно рассчитать по формуле:

$$K_{\max_i} = \text{int}(N_i / 8), \quad (21)$$

где $\text{int}[X]$ – целая часть числа X . Максимальное количество абонентов, которых может обслужить сеть определяется выражением:

$$N_{\max} = 8 \cdot \text{card}(M) \cdot K_{\Sigma} / C_{\text{кл}} \quad (22)$$

При распределении частот по методу МКК, модифицированного алгоритмами вершина-краска (краска-вершина) перед назначением лучу частотного канала выполняется проверка необходимости выделения ему частотного ресурса, т.е. условия $K_i < K_{\max_i}$. Если $K_i \geq K_{\max_i}$ то назначений частот в i луче больше не производится. Благодаря этому высвободившиеся частоты, исходя из частотно-пространственных ограничений, могут быть назначены другим лучам.

Кроме того, модификации МКК E1, E2 и J осуществляют поиск очередной вершины по критерию $\max(N_i)$. Это позволяет назначать наиболее загруженным лучам системы частоты с более редкими присвоениями. Благодаря этому повышается SINR и обеспечивается более высокая скорость передачи данных.

Чтобы оценить степень загрузки лучей, с использованием средств Visual C++ разработана программная модель, которая моделирует распределение абонентов в пределах зоны обслуживания сети по равномерному закону (рисунок 7).

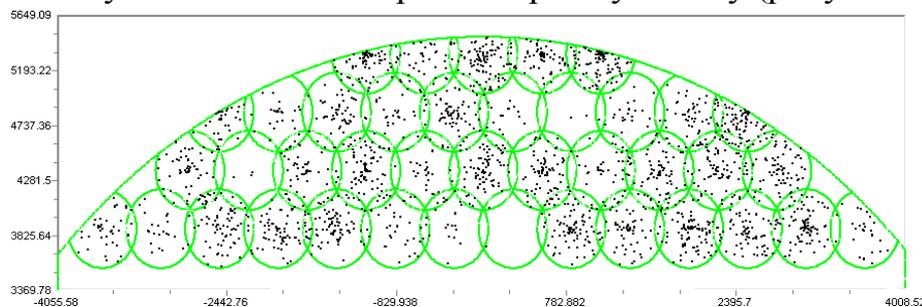


Рисунок 7 – Распределение абонентов внутри зоны обслуживания луча

Результаты проведения ЧТП с использованием адаптивных МКК показали (рисунок 8), что при $\text{ЭИИМ}_{\text{терм}} = 8,5$ дБВт и ниже адаптивный МКК, модифицированный алгоритмами вершина-краска и краска-вершина приводит к заметному уве-

личению суммарной скорости передачи данных в сети (приведена суммарная скорость загруженных частотных каналов).

Максимальное значение $R = 217,5$ Мбит/с получено при использовании МКК E2 (ранжирование вершин осуществляется по числу абонентов в луче, назначение частот – по минимуму поля помех). При этом значение коэффициента $C_{кл}$ равно 9. Полученный выигрыш в скорости передачи данных составляет 13,1 Мбит/с (6,4%). Кроме того, полученное значение R превышает скорость передачи данных при ЭИИМ_{терм} = 9,5 дБВт и ЧТП по МКК, модифицированному МВиГ, которая равна 215,1 Мбит/с.

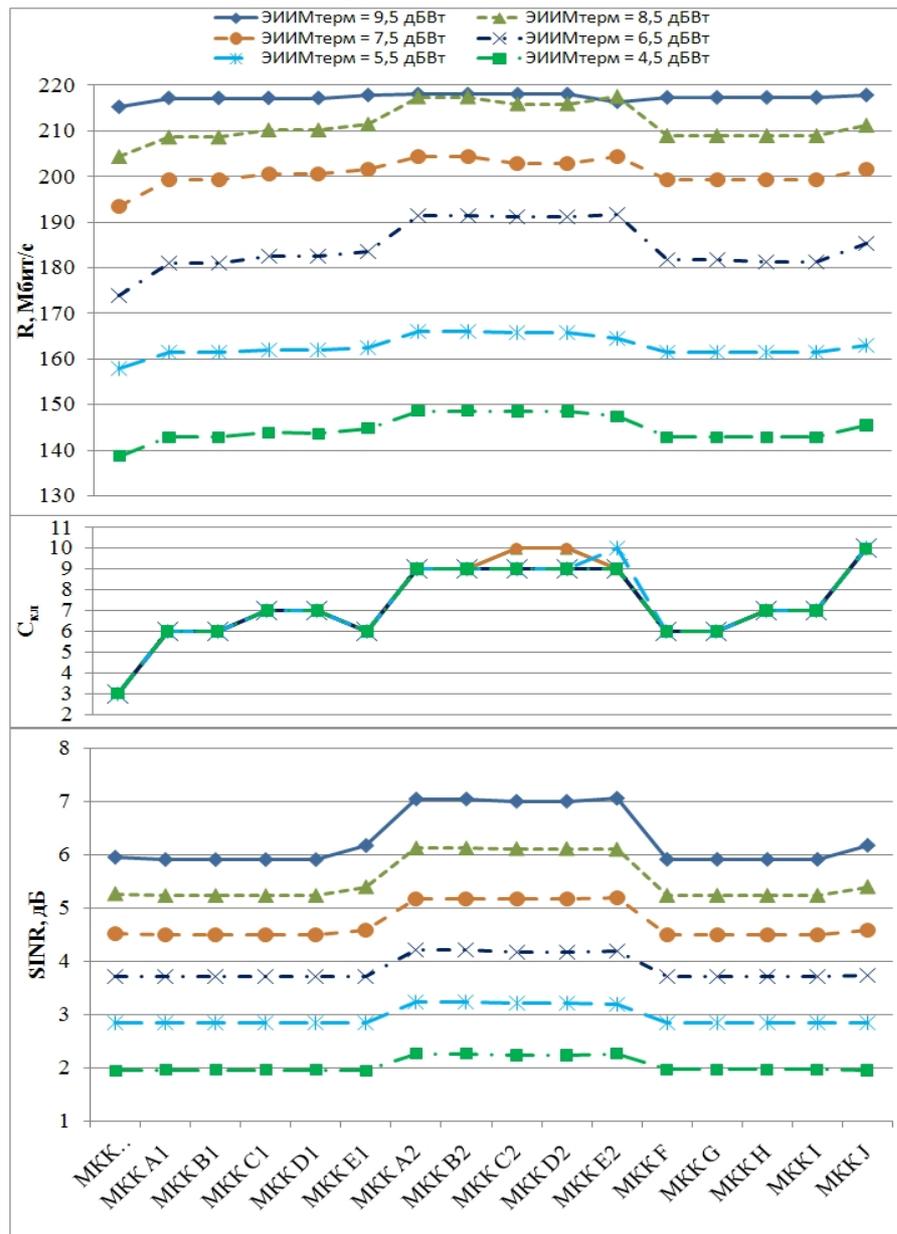


Рисунок 8 – Сравнение адаптивных методов ЧТП

Анализ результатов моделирования показывает, что при рассматриваемых характеристиках СР и сигнально-кодовых конструкций на линии вверх оптимальным является значение ЭИИМ_{терм} = 8,5 дБВт. Увеличение мощности передаваемого сигнала приведет к избыточности в энергетике линии связи «вверх». ЭИИМ_{терм} < 8,5 дБВт приводит к ухудшению условий помехозащищенности и падению скорости передачи информационных данных.

Кроме того, величина выигрыша в скорости будет зависеть от степени загруженности сети. При достижении предельного значения количества пользователей эффективность адаптивного МКК сравнивается с МКК МВиГ. Т.е. МКК, модифицированный МВиГ, а также МКК, модифицированный алгоритмами вершина-краска с назначением частот по максимуму поля помех и алгоритмами краска-вершина наиболее эффективно действует в условиях большой загруженности сети, когда увеличение кластера приводит к уменьшению пропускной способности сети. При загрузке сети менее 90% наибольшую эффективность демонстрируют адаптивный МКК, модифицированный алгоритмом вершина-краска с назначением частот по минимуму поля помех, который приводит к одновременному повышению скорости передачи данных в сети и увеличению кластера. Степень его увеличения зависит от граничного параметра КВВ γ . В этой связи, при решении конкретной задачи планирования сети необходим экспериментальный поиск оптимального значения данного параметра.

В *четвертой главе* приводится описание разработанного для проведения исследований программного продукта в среде Visual C++. Рассмотрены структурные схемы программной модели, приведены примеры экранных форм. Представлены алгоритмы разработанных методов ЧТП. Проведена сравнительная оценка скорости выполнения разработанных алгоритмов.

Заключение содержит формулировку основных научных и практических результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Целью настоящей работы является исследование и разработка методов частотно-территориального планирования в системах спутниковой связи с зональным обслуживанием. Необходимость проведения оптимального ЧТП неизбежно возникает при построении СПСС, т.к. ЧТП позволяет эффективно распределить ограниченный частотно-энергетический ресурс, выделенный для СПСС, между отдельными лучами.

Для достижения поставленной цели в диссертации решены следующие задачи:

1. Разработана методика определения частотно-пространственных ограничений для спутниковых ретрансляторов с плоскими и концентрическими круговыми антенными решетками, которая позволяет учесть при ЧТП влияние боковых лепестков ДН АР и множественности помех в условиях неоднородности СПСС и определить уровень помехозащищенности в отдельных лучах МЛА.

2. Разработан модифицированный метод координационных колец, позволяющий решить задачу обеспечения оптимальной электромагнитной совместимости между работающими в совмещенном и соседнем каналах приема лучами МЛА при частотно-территориальном планировании СПСС с учетом частотно-пространственных ограничений и неоднородности реальной сети спутниковой связи.

3. Разработана методика оценки пропускной способности сети, основанная на определении в условиях неоднородности СПСС уровня помехозащищенности каждого луча МЛА в зависимости от присвоенных ему частот и позволяющая оценить

эффективность выделения частотного ресурса и пространственного разнесения каналов при заданных требованиях к ЭМС.

4. Разработан метод координационных колец, модифицированный алгоритмами краска-вершина и вершина-краска и оптимизированный за счет адаптации частотного плана системы связи к текущей нагрузке в различных лучах СПСС, который позволяет обеспечить высоко эффективное распределение частотного спектра и энергетики линии связи и дает 6,4% прироста к пропускной способности сети.

5. Разработаны алгоритмы методов ЧТП и их программная реализация, позволившие осуществить экспериментальное исследование методов обеспечения ЭМС при оптимальном частотно-территориальном планировании системы спутниковой связи с повышенной помехоустойчивостью.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Журналы, рекомендованные ВАК РФ

1. **Гениатулин, К. А.** Частотно-территориальное планирование системы подвижной спутниковой связи с зональным обслуживанием / **К. А. Гениатулин, В. И. Носов** // Вестник СибГУТИ: научный журнал. – Новосибирск, 2011, – № 1 (13). – С. 17-27.
2. **Гениатулин, К. А.** Применение метода координационных колец при частотно-территориальном планировании системы спутниковой связи с зональным обслуживанием / **К. А. Гениатулин, В. И. Носов** // Вестник СибГУТИ: научный журнал. – Новосибирск, 2014. – № 1 (25). – С. 35-48.

Авторские свидетельства

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012610076. Программа для построения оптимального частотно-территориального плана геостационарной спутниковой связи, использующей цифровую антенную решётку / **В. И. Носов, К. А. Гениатулин**; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО «СибГУТИ», зарег. 10.01.2012.

Статьи в журналах

4. **Гениатулин, К. А.** Системы подвижной спутниковой связи с зональным обслуживанием / **К. А. Гениатулин** // Молодой ученый: ежемесячный научный журнал. – Чита, 2009. – №10. – С. 46-48.
5. **Гениатулин, К. А.** Планирование систем спутниковой связи с зональным обслуживанием / **К. А. Гениатулин, В. И. Носов** // Вестник СибГУТИ: научный журнал. – Новосибирск, 2009, – № 4. – С. 11-22.
6. **Гениатулин, К. А.** Сети подвижной спутниковой связи / **К. А. Гениатулин** // Инфосфера. – Новосибирск, 2012. – № 53. – С. 59-61.

Статьи в материалах конференций

7. **Гениатулин, К. А.** Исследование методов обработки сигналов в системах спутниковой связи / **К. А. Гениатулин, В. И. Носов** // Информатика и проблемы телекоммуникаций: в 2 т. – Т.1.: мат-лы Росс. научн.-техн. конф. –Новосибирск:

Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики, 2008. – С. 350.

8. **Гениатулин, К. А.** Применение цифровых антенных решеток в системах спутниковой связи с зональным обслуживанием / **К. А. Гениатулин, В. И. Носов** // Информатика и проблемы телекоммуникаций: в 2 т. – Т.1.: мат-лы Росс. научн.-техн. конф. –Новосибирск: Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики, 2009. – С. 325.
9. **Гениатулин, К. А.** Влияние боковых лепестков диаграммы направленности цифровой антенной решетки на частотно-территориальное планирование / **К. А. Гениатулин, В. И. Носов** // Информатика и проблемы телекоммуникаций: в 2 т. – Т.1.: мат-лы Росс. научн.-техн. конф. –Новосибирск: Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики, 2010. – С. 408-409.
10. **Гениатулин, К. А.** Влияние боковых лепестков антенной решетки на частотно-территориальное планирование системы подвижной спутниковой связи / **К. А. Гениатулин, В. И. Носов** // Информатика и проблемы телекоммуникаций: в 2 т. – Т.1.: мат-лы Росс. научн.-техн. конф. –Новосибирск: Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики, 2011. – С. 475.
11. **Гениатулин, К. А.** Методика определения влияния боковых лепестков цифровой антенной решетки при частотно-территориальном планировании системы подвижной спутниковой связи / **К. А. Гениатулин** // Современные проблемы телекоммуникаций: мат-лы Росс. научн.-техн. конф. – Новосибирск: Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики, 2012. – С. 118-119.
12. **Гениатулин, К. А.** Применение метода координационных колец при частотно-территориальном планировании системы подвижной спутниковой связи / **К. А. Гениатулин, В. И. Носов** // Современные проблемы телекоммуникаций: мат-лы Росс. научн.-техн. конф. – Новосибирск: Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики, 2012. – С. 119-120.
13. **Гениатулин, К. А.** Применение метода координационных колец при частотно-территориальном планировании системы подвижной спутниковой связи с концентрическими кольцевыми антенными решетками / **К. А. Гениатулин, В. И. Носов** // Современные проблемы телекоммуникаций: мат-лы Росс. научн.-техн. конф. – Новосибирск: Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики, 2013. – С. 129.
14. **Гениатулин, К. А.** Моделирование распределения абонентов для проведения частотно-территориального планирования сети спутниковой связи с зональным обслуживанием / **К. А. Гениатулин** // Современные проблемы телекоммуникаций: мат-лы Росс. научн.-техн. конф. – Новосибирск: Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики, 2014. – С. 103-104.
15. **Носов, В. И.** Методика определения коэффициента взаимного влияния для метода координационных колец при частотно-территориальном планировании системы спутниковой связи с зональным обслуживанием / **В. И. Носов, К. А. Гениатулин** // Современные проблемы телекоммуникаций: мат-лы Росс. научн.-техн. конф. – Новосибирск: Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики, 2014. – С. 118-119.

Гениатулин Константин Агзамович

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 02.10.14
формат бумаги 60x84/16, отпечатано на ризографе, шрифт №10,
изд. л. 1,2 , заказ № 90, тираж 100. СибГУТИ
630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86