

МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В СЕТЯХ РАДИОСВЯЗИ

В. И. Носов

Многолетняя практика использования радиочастотного спектра показала целесообразность перспективного частотного планирования. Время от времени действующие частотные планы пересматриваются или составляются новые при введении нового диапазона частот. Например, в нашей стране в начале 80-х годов был пересмотрен частотный план сети телевизионного (ТВ) вещания, а в начале 90-х, в связи с переходом на стереофоническое радиовещание, пересматривается частотный план ОВЧ ЧМ сети. Однако в настоящее время недостаточно полно разработаны вопросы оптимального планирования реальных сетей ТВ и радиовещания

Развитие и реконструкция радиовещательных сетей требует значительных капитальных затрат, поэтому решение задачи снижения этих затрат является актуальной проблемой. Снижения капитальных затрат в значительной степени можно достичь за счёт использования оптимальных технических параметров радиовещательных станций – высот подвеса антенн, мощности передатчика, местоположения.

Существующая практика планирования развития передающей сети наземного радиовещания исходит из принципа поэтапного решения задачи. На первом этапе на основе анализа различных факторов определяются количество, месторасположения и размеры требуемых зон обслуживания планируемых радиовещательных станций, которые обеспечивают необходимый охват территории (или населения) ТВ и звуковым вещанием с заданным качеством и числом программ.

Далее выбираются основные параметры радиовещательных станций, которые обеспечивают требуемые размеры зон обслуживания. На последнем этапе решается задача частотного планирования, которая заключается в выборе частотных каналов, СНЧ и поляризации передающей антенны для каждой планируемой радиовещательной станции.

В рамках данной статьи предлагается рассмотреть решение второй задачи, т.е. проблемы обеспечения ЭМС передающей радиовещательной сети путём оптимизации частотного плана и технических параметров станций при условии, что результаты реше-

ния первой задачи известны и заданы как исходные данные.

Наиболее широко известны методы частотного планирования передающей радиовещательной сети, основанные на применении модели с регулярным расположением передающих станций и регулярным распределением каналов. Трудности, связанные с использованием регулярных решёток, требуют разработки иных подходов, которые учитывают реальные условия решения задачи.

В литературе развивается теория, обосновывающая связь задачи частотного планирования радиовещательной сети с известной задачей минимальной раскраски графа, что позволяет использовать методы её решения при назначении частотных каналов с целью минимизации их числа.

Из проведенного анализа, однако, следует, что предлагаемые решения не позволяют получить оптимальный результат по следующим причинам. Общим недостатком в известных решениях является игнорирование при частотном присвоении очередной станции других планируемых, которым частотный канал ещё не присвоен. Данное обстоятельство приводит к неоптимальному решению задачи с точки зрения группы радиовещательных станций и сети в целом.

Практически отсутствуют показатели эффективности как для отдельных радиовещательных станций, так и для сети в целом, что не позволяет решать проблему оптимизации технических параметров и частотных планов. Кроме того, отсутствуют исследования по использованию таких эффективных способов улучшения электромагнитной совместимости в сетях радиовещания, как использование оптимального шага сетки частот и систем вещания, эффективно использующих выделенный диапазон частот.

Об актуальности рассматриваемой проблемы говорит и тот факт, что в исследовательских программах МСЭ – Р указывается, что важнейшей целью планирования является улучшение использования радиочастотного спектра.

На основе проведенного анализа было определено направление исследования методов обеспечения электромагнитной совместимости в реальных сетях наземного телевизи-

онного и звукового радиовещания на основе оптимального планирования частотных присвоений и технических параметров радиовещательных станций.

Для решения поставленных задач были проанализированы технические основы планирования сетей радиовещания и выбраны основные исходные соотношения, необходимые для проведения исследований.

Предложено приемлемым или допустимым вариантом решения задачи назначения пар (P, H_A) элементам множества передатчиков $M = \{m_i\}$, или, другими словами, построения множества $\psi = \{(P, H_A)_i\}$, $i = \{1, \dots, n\}$, считать такой, при котором сеть обеспечивает некоторую заданную степень покрытия территории λ .

Предлагается принять в качестве функции цели $F(\psi)$ величину затрат на ТВ сеть Z_N , приведённую к единице площади обслуживания данной сети $S_{\text{обсл}N}$.

На основании вышеприведённых обозначений задачу оптимального выбора технических параметров ТВ передатчиков можно формализовать следующим образом:

$$S_{\text{обсл}N} / S_{\text{тер}} \geq \lambda \text{ и} \\ F(\psi_{\text{опт}}) = Z_N(\psi) / S_{\text{обсл}N}(\psi) \rightarrow \min.$$

Одним из ограничений при выборе технических параметров станции является необходимый радиус её зоны вещания. Отсюда первый показатель приемлемости решения – максально-возможный радиус зоны вещания должен быть не меньше необходимого.

В качестве второго показателя допустимости решения, связанного с наличием мешающих передатчиков, предлагается коэффициент использования станции Q .

Кроме того, что выбор пар (P, H_A) удовлетворяет приведённым выше условиям, полученное решение необходимо рассматривать также с позиции сети, её эффективности. Известный показатель эффективности сети – координационное расстояние: если $D < D_k$, то данное присвоение запрещено, иначе – возможно.

Для количественной оценки оптимальности частотного планирования и оптимизации технических параметров передающих сетей предлагается ввести новый параметр – коэффициент взаимного влияния (КВВ) – величина, количественно оценивающая взаимное влияние пары передатчиков с соизмеримыми и значительно отличающимися техническими параметрами.

Положительные значения КВВ при $R_p < R_{\text{макс}}$ указывают на недостаточное исполь-

зование технических ресурсов передатчиков, при отрицательных значениях коэффициента $R_p > R_{\text{макс}}$ можно говорить о нерацональном использовании частотного спектра. Так как КВВ учитывает изменения радиусов зоны вещания, то он является более точным критерием, чем координационное расстояние.

Для решения задач оптимального частотного планирования широко используется теория регулярных решёток (однородных сетей), однако использование известных методов для синтеза таких сетей на ЭВМ весьма затруднительно. А так как при синтезе модели однородной сети радиовещания необходимо только определить расположение передатчиков, работающих в совмещённых каналах, то предлагается использовать универсальную модель однородной сети. В этой модели сети передающие станции, помещённые в центры зон вещания в виде шестиугольников (сот) с одинаковыми номерами, образуют ромб совмещённых каналов. Поскольку расстояние между передатчиками, работающими в совмещённых каналах, одинаково, его нетрудно определить из геометрии сети. В предложенной универсальной модели однородной сети её относительный модуль $r_0 = D / R_0$ однозначно определяет количество необходимых частотных каналов.

Планирование однородных и реальных радиовещательных сетей наиболее целесообразно проводить на основе известного представления сети в виде графа и распределять каналы с использованием задачи о раскраске его вершин. Граф передающей сети радиовещания является конечным, неориентированным, с однократными рёбрами без петель. Отличительной особенностью графа передающей сети является то, что он обладает дискретностью. Это объясняется тем, что каждый передатчик создает помехи только на расстояниях не больше координационного, поэтому для каждой вершины можно выделить область в виде круга с центром в ней самой, которая ограничивает совокупность вершин, смежных с данной.

Предложена и разработана методика определения для систем звукового радиовещания минимальной напряжённости поля, которое зависит от: отношения сигнал/шум на входе приёмника, при котором обеспечивается требуемое отношение сигнал/шум на выходе приёмника; выигрыша в отношении сигнал/шум на выходе приёмника по сравнению с отношением сигнал/шум на входе приёмника (определяется видом модуляции

и обработкой сигнала на передающей и приёмной сторонах).

На приемном конце сначала производится восстановление предсказаний а затем психометрическое взвешивание шумов, следовательно необходимо рассматривать суммарное действие этих двух устройств.

Анализ полученных результатов показывает, что расчётные значения минимальной напряжённости поля, полученные по предложенной методике, практически не отличаются от результатов, полученных по другой методике.

Разработана методика для определения величины защитного отношения A_{30} при совпадающих несущих частотах полезного и мешающего передатчиков, т.е. при работе полезного и мешающего передатчиков в совмещённых каналах.

Разработанная методика позволяет с высокой степенью точности без проведения субъективно статистических измерений, которые невозможно провести для вновь разрабатываемых систем радиовещания и вновь осваиваемых диапазонов частот, определить значения минимальной напряжённости поля и защитного отношения при совпадающих несущих частотах полезного и мешающего передатчиков.

Проведен анализ причин неоптимальности существующих методов частотного планирования, который показал, что они вызваны наложением запрета на раскраску в один цвет вершин, находящихся от рассматриваемой вершины на расстоянии меньше координационного. В то же время не существует условий, по которым в один цвет раскрашиваются вершины, удалённые на расстояние, большее либо равное координационному. Следовательно, для получения раскраски, близкой к оптимальной, необходимо ввести ограничение на расстояние между вершинами при их раскраске в один цвет.

Согласно определению графа передающей вещательной сети, изложенному в первом разделе, множеству передатчиков $M = M_d \cup M_{пл}$ с учётом частотно-пространственных ψ -ограничений может быть поставлен в соответствие граф $G = (V, E)$ со множеством вершин V и множеством рёбер E , таких что отображение M на V будет биективным $M \leftrightarrow V$, а каждое ребро $v_{ij} = \{v_i, v_j\} \in V$ соединит пару вершин $v_i, v_j \in V$, соответствующих радиовещательным станциям, которые могут создавать недопустимые помехи друг другу, т.е. не удовлетворяют каким-либо ограничениям из ψ

$$G(V, E) = G(V_d, E_d) \cup G(V_{пл}, E_{пл});$$

Множеству реализаций частотных присвоений F' поставим в однозначное соответствие множество цветов C $F' \leftrightarrow C$. Наличие действующих передатчиков приводит к тому, что часть вершин графа $G(V, E)$ является окрашенной. Рассматриваемая проблема оптимального назначения частотных каналов может быть сформулирована как задача минимальной раскраски графа, но в отличие от классической постановки задачи, смежность вершин определяют ограничения на использование не только одного цвета, но и некоторых их комбинаций. Такая задача может быть сведена к обобщённой задаче раскраски рёберно ограниченного графа с учётом его дисковости и сформулирована следующим образом.

Пусть $G = (V, E)$ – неориентированный граф без петель, $N: E \rightarrow \psi$ – рёберное множество запрещений графа G . Для $V_d \in V$ задано соответствующее отображение $A_d: V_d \rightarrow C$. Необходимо найти такое $A: V \rightarrow C$. В предлагаемом методе координационные кольца строятся с использованием предложенного автором коэффициента взаимного влияния (КВВ).

Эффективность вариантов частотных планов можно оценивать по количеству удовлетворённых частотных заявок из их общей совокупности при наличии фиксированного числа частот, разрешённых для использования. Для исследования влияния на количество удовлетворённых частотных заявок способа частотных присвоений при послойном построении многопрограммной сети радиовещания разработаны эвристические алгоритмы на основе задачи о раскраске вершин графа. Разработаны алгоритмы типа «вершина – краска» при ранжировании: по порядку вершин (по мере поступления заявок); по минимуму частотных присвоений, возможных для рассматриваемой вершины; по минимуму частотных присвоений плюс максимальная степень вершины; по максимальной степени вершины. Выбор краски (оптимального частотного присвоения) осуществляется по предложенному автором методу координационных колец. Разработаны также алгоритмы типа «краска – вершина».

Одним из эффективных методов улучшения электромагнитной совместимости и использования выделенного диапазона частот в сетях наземного телевизионного и звукового радиовещания является оптимизация шага сетки частот (минимальный разнос несущих частот радиовещательных передатчиков, работающих в соседних каналах). Автором разработана новая методика определения опти-

мального шага сетки частот в регулярной сети звукового радиовещания $\Delta f_{\text{опт}}$, где C – количество используемых каналов, l – полоса частот, занимаемая сетью радиовещания.

Для решения поставленной задачи использована предложенная автором универсальная модель однородной сети, в которой расстояния между передатчиками (D), расположенными в узлах регулярной решётки, определяются в модулях (R_0) сети r_0 .

Для реализации предлагаемого метода разработана новая методика распределения частотных присвоений в сети регулярной структуры на основе предложенного автором метода координационных колец с использованием частично упорядоченных множеств и диаграмм Хасса.

В результате исследований, проведённых с использованием разработанной методики в сети звукового радиовещания, показано, что оптимальный шаг сетки в диапазоне частот: 66 – 74 МГц составляет 20 кГц (используется 30 кГц); 100 – 108 МГц составляет 100 кГц (используется 100 кГц).

Предложенная методика дает возможность строить раскраски сети и получать оценки хроматического числа и может быть использована для повышения эффективности использования спектра частот, выделяемого для радиовещания как в действующих, так и во вновь вводимых диапазонах частот.

В случае поступления единичных заявок на частотные присвоения также возникает проблема их оптимизации. Для этого варианта разработан метод оптимизации единичных частотных присвоений, использующий правило FIFO – первый пришёл, первый вышел, который реализован в автоматизированной системе оптимизации частотных присвоений передатчикам сети ОВЧ ЧМ звукового радиовещания, внедрённой в промышленную эксплуатацию.

Затем метод координационных колец был использован для модернизации частотного плана фрагмента действующей ТВ сети. Этот фрагмент включает 350 станций (986 передатчиков), расположен в Европейской части России и обеспечивает территорию в 2736 тыс. км² трёхпрограммным ТВ вещанием. Из 986 передатчиков 260 – действующие, остальные – планируемые. Частотные присвоения действующих передатчиков оставались без изменения, и для заданных значений параметров $\varepsilon = 0,08$ и $\varepsilon = 0$ был получен новый вариант частотного плана рассматриваемого фрагмента ТВ сети. Так, если в существующем плане были запланированы метровые каналы 67

передатчикам, то в разработанном частотном плане – 190 передатчикам. Существующий план имеет сумму площадей вещания всех станций $\sum S_p = 8547$ тыс. км², среднее значение коэффициента использования передатчика $Q_{\text{ср}} = 0,90$, а вновь полученный план обеспечивает $\sum S_p = 9025$ тыс. км² и $Q_{\text{ср}} = 0,94$.

Проведено исследование эвристических алгоритмов раскраски графов при планировании в однородной и неоднородной сетях, одно-, двух- и трёхпрограммного ТВ вещания. Предлагаемые методы оптимального группового планирования обеспечивают существенный выигрыш в количестве осуществленных частотных присвоений (в рассмотренном примере выигрыш 16% для второй программы и 48% – для третьей), т. е. позволяют в значительной степени повысить эффективность использования частотного ресурса.

В последние годы возрос интерес к использованию в системах радиосвязи многопозиционных методов модуляции (с фазовой М-ОФМ и квадратурной амплитудной М-КАМ). Если в системах радиосвязи, таких как РРЛ и спутниковая связь, эффективность использования многопозиционных методов модуляции не вызывает сомнения, то в сетях радиосвязи, построенных по сотовому принципу (наземное цифровое звуковое и телевизионное вещание, сети радиодоступа, сети сотовой мобильной связи), где применяется многократное использование частот, эффективность использования многопозиционных методов модуляции не совсем очевидна.

Это связано с тем, что с ростом позиции модуляции увеличивается требуемое отношение сигнал/интерференция, в результате чего увеличивается расстояние, на которое должны быть разнесены передающие станции, использующие одинаковые частоты, т.е. при этом увеличивается размерность кластера. При фиксированной полосе частот, выделенной для сотовых систем радиосвязи, увеличение размерности кластера приводит к уменьшению количества доступных номиналов частот, а, следовательно, и числа физических каналов, на каждой базовой станции.

С другой стороны, при увеличении кратности модуляции увеличивается число физических каналов, которое можно организовать в выделенном диапазоне частот. Поэтому эффективность использования многопозиционных методов модуляции в сотовых системах радиосвязи обнаружится только в том случае, если число физических каналов будет расти быстрее, чем растёт размерность кластера.

Исследованию этого вопроса и посвящена данная статья.

Решение поставленной задачи целесообразно проводить на модели однородной сети регулярной структуры, которая широко используется для проведения исследований влияния параметров аппаратуры на характеристики сотовых сетей связи [1, 2, 3, 4, 5].

На основе предложенных универсальной модели однородной сети и метода координатных колец разработаны методики оценки эффективности использования выделенного диапазона частот при многопозиционной модуляции, определения защитного отношения, определения частотно-пространственных ограничений. С использованием разработанных методик был составлен алгоритм и программное обеспечение распределения частотных каналов и проведены исследования, по которым можно сделать нижеследующие выводы:

1. При использовании каналов с перекрывающимися спектрами увеличение кратности модуляции M приводит к увеличению возможного числа физических каналов всей сети. Но при этом размерность кластера с ростом M растёт быстрее, и, следовательно, уменьшается число физических каналов, отводимых каждой станции, в результате чего снижается эффективность использования выделенного диапазона частот. Так, при переходе от 4-ОФМ к 16-КАМ эффективность использования выделенного диапазона частот снижается на 17 %, а при переходе к 64-КАМ – на 27 %. Таким образом, проведенные исследования показали, что наиболее эффективное использование выделенного диапазона частот в сотовых системах связи осуществляется при 4-ОФМ.

2. Увеличение радиуса зоны обслуживания значительно снижает эффективность использования выделенного диапазона частот в сотовых системах связи. Так, при увеличении радиуса зоны обслуживания от 3,5 до 35 км коэффициент эффективности снижается в 100 раз.

3. По сравнению с каналами без перекрытия спектров, использование каналов с перекрывающимися спектрами позволяет увеличить эффективность использования выделенного диапазона частот. Так, при использовании 4-ОФМ коэффициент эффективности E_w при разное частот соседних каналов на 20 кГц увеличивается в 1,9 раза, при использовании 16-КАМ и таком же разное каналов – в 1,47 раз. При использовании 64 КАМ выигрыш в 1,1 раза получается только при разное соседних каналов на 60 кГц.

Литература

1. Маковеева М.М., Шинаков Ю.С. Системы связи с подвижными объектами. Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 2002. – 440 с.
2. Буга Н.Н., Конторович В.Я., Носов В.И. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1993. – 242 с.
3. Носов В.И., Фадеева Н.Е., Минеева Т.В., Ахтырский В.Н. Новый подход к планированию сети телевизионного и звукового вещания. // Электросвязь. – 1989. – № 9. – С. 18 – 21.
4. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети. Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 650 с.
5. Хэйл У.К. Присвоение частот: Теория и приложения // ТИИЭР. – 1980. – Т. 68. – № 12. – с. 55–76.
6. Носов В.И. Аппаратура радиорелейных линий синхронной цифровой иерархии. Часть 1 – Многоуровневые кодеры, модемы и эквалайзеры. Учебное пособие. УМО по специальности связь. – Новосибирск: СибГУТИ, 2004. – 156 с.