

**А.А. Карпук**

**СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА РАДИОСВЯЗИ  
И ОПТИМИЗАЦИИ ПРИСВОЕНИЯ ЧАСТОТ  
РАДИОЛИНИЯМ**

**Монография**

**Воронеж  
Издательство «Научная книга»  
2015**

**УДК 621.391.8**  
**ББК 32.884.1**  
**К 26**

**Рекомендовано к изданию**  
Научно–техническим советом Воронежского  
государственного технического университета

**Рецензенты:**

**Бобов М.Н.** доктор технических наук, профессор, профессор кафедры сетей и устройств телекоммуникаций Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

**Вилькоцкий М.А.** доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информатики и методики преподавания информатики Белорусского государственного педагогического университета имени Максима Танка

**К 26 Карпук, А.А.** Системы оценки качества радиосвязи и оптимизации присвоения частот радиолиниям: Монография / А.А. Карпук. – Воронеж: Издательство «Научная книга», 2015. – 230 с.

**ISBN 978-5-98222-886-4**

Изложены теоретические и практические основы создания автоматизированных информационных систем (АИС) оценки качества радиосвязи и оптимизации присвоения частот радиолиниям. Рассмотрена задача оценки величины ослабления мощности радиосигнала на трассе распространения радиоволн, которая не будет превышена в течение заданного процента времени. Построена математическая модель задачи оптимизации присвоения рабочих частот радиолиниям по критерию минимизации уровня помех между радиосредствами и разработаны алгоритмы решения задачи. Описана методология проектирования баз данных сложных систем, на основе которой разработана структура базы данных АИС. Описаны программные модули, входящие в состав АИС оценки качества радиосвязи и оптимизации присвоения частот радиолиниям.

Книга предназначена ученым и аспирантам, ведущим исследования по вопросам оценки качества радиосвязи и оптимизации присвоения частот радиолиниям, а также разработчикам АИС оценки качества радиосвязи и оптимизации присвоения частот радиолиниям.

Рис. 38. Табл. 9. Библиогр.: 83 назв.

**УДК 621.391.8**  
**ББК 32.884.1**  
**К 26**

**ISBN 978-5-98222-886-4**

**© Карпук А.А., 2015**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	5
Глава 1	
ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РАДИОСВЯЗИ .....	10
1.1. Распространение радиоволн в свободном пространстве .....	10
1.2. Оценка влияния рефракции радиоволн .....	11
1.3. Оценка влияния дифракции радиоволн на препятствиях .....	19
1.4. Оценка распространения радиоволн через лес .....	32
1.5. Оценка влияния атмосферных газов и водяных паров .....	36
1.6. Оценка влияния осадков, тумана и облаков .....	43
1.7. Оценка влияния многолучевого распространения радиоволн .....	50
1.8. Оценка качества радиосвязи для цифровых радиорелейных линий прямой видимости .....	55
1.9. Оценка качества радиосвязи для любых радиолиний .....	63
Глава 2	
ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ ПРИСВОЕНИЯ ЧАСТОТ РАДИОЛИНИЯМ .....	75
2.1. Математическая модель задачи .....	75
2.2. Графовая интерпретация и оценка вычислительной сложности задачи .....	83
2.3. Жадные алгоритмы решения задачи .....	86
2.4. Алгоритмы локального поиска .....	88
2.5. Выбор оптимальных частот для двух радиосредств .....	91
2.6. Построение условий электромагнитной совместимости для двух радиосредств .....	102
2.7. Построение условий исключения интермодуляционных помех для трех радиосредств .....	105
2.8. Алгоритм оптимизации присвоения частот радиолиниям .....	109
Глава 3	
ПРОЕКТИРОВАНИЕ БАЗ ДАННЫХ СИСТЕМ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА РАДИОСВЯЗИ И ОПТИМИЗАЦИИ ПРИСВОЕНИЯ ЧАСТОТ РАДИОЛИНИЯМ .....	116
3.1. Требования к инфологической модели данных .....	116
3.2. Инфологическая и каноническая модели данных .....	119
3.3. Представление инфологических и канонических моделей предметной области .....	125
3.4. Отображение инфологической модели фрагмента предметной области в каноническую модель .....	128
3.5. Описание операций над отношениями канонической модели фрагмента предметной области при решении прикладных задач .....	134
3.6. Объединение канонических моделей фрагментов предметной области .....	136

3.7. Проектирование логической и физической структуры базы данных.....	138
Глава 4	
ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА РАДИОСВЯЗИ И ОПТИМИЗАЦИИ ПРИСВОЕНИЯ ЧАСТОТ РАДИОЛИНИЯМ.....	
	146
4.1. Модуль работы с цифровой картой местности.....	146
4.2. Модуль ведения данных о характеристиках объектов связи, радиосредств и антенн.....	150
4.3. Модуль расчета условий электромагнитной совместимости и исключения интермодуляционных помех.....	159
4.4. Модуль ведения данных об организации радиосвязи.....	161
4.5. Модуль расчета характеристик трасс распространения радиоволн.....	168
4.6. Модуль оценки качества радиосвязи.....	171
4.7. Модуль ведения ресурса частот для присвоения радиолиниям.....	175
4.8. Модуль проверки возможности связи между радиосредствами радиолиний.....	177
4.9. Модуль определения критичных радиосредств.....	184
4.10. Модуль присвоения частот радиолиниям.....	191
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	195
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	197
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	204

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время стремительно развиваются сети фиксированной и подвижной радиосвязи, в первую очередь сети сотовой радиосвязи, сети радиосвязи военного и специального назначения, космические, радионавигационные, радиолокационные сети радиосвязи. Нередко возникают ситуации, когда на относительно небольшом плацдарме сосредотачиваются десятки тысяч радиосетей, состоящих из сотен тысяч радиосредств.

В сетях радиосвязи одним из основных показателей качества каждой радиолинии (РЛ) является мощность радиосигнала на входе любого приемника РЛ от любого передатчика РЛ, которая будет превышена в течение заданного процента времени. В цифровых радиорелейных линиях (ЦРРЛ) основными показателями качества каждого интервала являются показатель неготовности (ПНГ) и коэффициент сильно пораженных секунд (КСПС) при заданном коэффициенте ошибок. Значения показателей качества радиосвязи зависят от территориального расположения радиосредств (РС), их рабочих частот, характеристик РС, антенн и фидеров, условий распространения радиоволн между РС, электромагнитной обстановки в районе расположения РС. Для оценки качества радиосвязи и оптимизации присвоения частот РЛ при высокой плотности РС требуется создавать автоматизированные информационные системы (АИС), которые могут использоваться самостоятельно, либо могут включаться в состав автоматизированных систем управления (АСУ) распределенными объектами.

При создании АИС оценки качества радиосвязи и оптимизации присвоения частот РЛ требуется решить три основные задачи. Первая задача состоит в том, что при включении в базу данных АИС данных о каждой РЛ из состава сети радиосвязи система должна оценить возможность радиосвязи между РС этой РЛ и не допускать включения в базу данных РЛ, между РС которой невозможна радиосвязь. Вторая задача заключается в том, что после ввода в базу данных всех РЛ сетей радиосвязи система должна проверить возможность совместной работы этих РЛ на указанных рабочих частотах с учетом их электромагнитной совместимости и внешней электромагнитной обстановки. При невозможности совместной работы РЛ система должна предоставить пользователю возможность оптимизации присвоения рабочих частот РЛ. Третьей задачей является проектирование базы данных АИС. При включении АИС в состав АСУ следует учитывать, что РС сетей радиосвязи размещаются в объектах, данные о которых хранятся в базе данных АСУ, т. е. базы данных АИС и АСУ должны быть интегрированными.

К началу работы автора над созданием АИС оценки качества радиосвязи и оптимизации присвоения частот радиолиниям в теории и практике решения перечисленных задач имелись указанные ниже неразрешенные вопросы и недостатки.

При решении задачи прогнозирования возможности и оценки качества радиосвязи между РС каждой РЛ требуется оценить величину ослабления мощности или уровень замираний радиосигнала на трассе распространения радиоволн от передатчика к приемнику. Теория распространения радиоволн хорошо разработана и изложена в фундаментальных монографиях М.П. Долуханова [1], А.И. Калинина [2], В.В. Никольского [3], А.А. Кураева [4] и других авторов. Эта теория использует сложный математический аппарат, поэтому для практических расчетов Международным союзом электросвязи (МСЭ) опубликован ряд Рекомендаций, которые для известных характеристик трассы распространения и известных условий распространения радиоволн позволяли вычислить величину ослабления мощности радиосигнала. Однако Рекомендации МСЭ не содержали методов и алгоритмов для вычисления величины ослабления мощности радиосигнала, которая не будет превышена в течение заданного процента времени. В существовавших методиках вычисления показателей качества для ЦРРЛ требовалось предварительно разбивать нормированные значения ПНГ и КСПС на слагаемые, приходящиеся на влияние субрефракции радиоволн, многолучевого распространения и ослабления в осадках, а затем обеспечивать требуемый запас на каждый из этих типов замираний [5]. При этом в различных источниках давались различные рекомендации по разбиению нормированных значений ПНГ и КСПС на слагаемые, а в существующих компьютерных программах оценки качества каналов ЦРРЛ это разбиение возложено на пользователя.

Задача оценки электромагнитной совместимости РС и оптимизации присвоения рабочих частот РЛ рассматривалась в работах М.А. Быховского [6, 7], В.В. Соловьева [8], В.И. Носова [9], О.А. Шорина [10], А.Ф. Аповича [11, 12], В.И. Волошина [13, 14] и других авторов. Были получены основные расчетные соотношения, позволяющие для любых двух, трех и более РС с известными характеристиками, известным расположением на местности и известными рабочими частотами оценить их электромагнитную совместимость и вычислить уровни возможных помех. В литературе показано, что если учитывать помехи только по основным каналам излучения и приема, то задачу оптимизации присвоения рабочих частот РЛ можно свести к задаче раскраски графа, а если учитывать помехи только по основным и внеполосным каналам излучения и приема, то к задаче о коммивояжере. Несмотря на то, что обе эти задачи являются NP – трудными, для их решения разработаны эффективные алгоритмы. Однако в реальных задачах оптимизации присвоения рабочих частот РЛ требуется учитывать также помехи по побочным каналам излучения и приема, в том числе по комбинационным и интермодуляционным каналам. В научной литературе оставались открытыми вопросы построения математической модели задачи оптимизации присвоения рабочих частот РЛ по критерию минимизации уровня помех между РС с учетом всех возможных внеполосных и побочных излу-

ний и каналов приема, а также разработки методов и алгоритмов решения задачи.

В решение задачи проектирования баз данных (БД) информационных систем значительный вклад внесли Л.А. Калиниченко [15], М.Ш. Цаленко [16], С.Д. Кузнецов [17], А.М. Вендров [18], М.Р. Когаловский [19], зарубежные ученые У. Армстронг [20], Э. Кодд [21], Д. Мартин [22], Д. Мейер [23], К. Дейт [24], П. Бернстайн [25], П. Чен [26] и другие. Жизненный цикл БД включает этапы планирования, проектирования и эксплуатации. На каждом из этих этапов требуется решить ряд задач, связанных с описанием предметной области и проектированием БД. АИС оценки качества радиосвязи и оптимизации присвоения частот РЛ отличаются тем, что подмножества их элементов имеют различную природу и функционируют по различным правилам. При этом невозможно построить описание предметной области всей системы, а строятся описания предметной области фрагментов системы, на основе которых проектируется логическая и физическая структуры БД. В имевшихся методиках описания предметной области предполагалось, что описание выполняют специалисты по всей предметной области, и не рассматривалась ситуация, когда нет специалиста, знающего предметную область всей системы, а есть несколько специалистов, каждый из которых знает свой фрагмент предметной области. Отсутствовали математические модели и алгоритмы решения задачи выбора физической структуры БД, при которой обеспечивается требуемое время выполнения каждого приложения при наличии минимальной избыточности данных.

В предлагаемой книге изложены теоретические и практические основы создания АИС оценки качества радиосвязи и оптимизации присвоения частот радиоприема, разработанные автором. Книга состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения.

В первой главе рассматривается задача оценки величины ослабления мощности или уровня замираний радиосигнала на трассе распространения радиоволн от передатчика к приемнику, которая не будет превышена в течение заданного процента времени. Описаны методы оценки влияния рефракции радиоволн, дифракции радиоволн на препятствиях, распространения радиоволн через лес, влияния атмосферных газов, водяных паров, осадков, тумана, облаков и многолучевого распространения радиоволн. Рассмотрены предложенные автором методы поиска и классификации препятствий на трассе распространения радиосигнала и алгоритм вычисления уровня замираний радиосигнала из-за многолучевого распространения радиоволн на трассах прямой видимости, который не будет превышен в среднем наихудшем месяце календарного года в течение заданного процента времени. Приведен разработанный автором метод оценки качества радиосвязи для цифровых радиорелейных линий прямой видимости с учетом субрефракции радиоволн, многолучевого распространения и ослабле-

ния в осадках, вычисляющий прогнозируемые значения показателя неготовности и коэффициента сильно пораженных секунд без предварительного разбиения их нормированных значений на слагаемые. Описан алгоритм оценки качества радиосвязи для любых радиолиний в зависимости от географических и метеорологических условий распространения радиоволн.

Во второй главе рассматривается задача оценки электромагнитной совместимости РС и оптимизации присвоения рабочих частот РЛ. Построена математическая модель задачи оптимизации присвоения рабочих частот РЛ по критерию минимизации уровня помех между РС, отличающаяся от известных математических моделей учетом всех возможных внеполосных и побочных излучений и каналов приема РС. Предложенная математическая модель названа многомерной задачей о назначениях с совместительством, поскольку отличается от классической задачи о назначениях тем, что одного претендента можно назначить на несколько должностей, и любое подмножество должностей заданной мощности может оказаться занятым претендентами, конфликтующими между собой. Рассмотрена графовая интерпретация задачи и показана ее NP – трудность. Для решения задачи разработаны приближенные алгоритмы: жадный алгоритм и алгоритмы локального поиска в заданной окрестности. В этих алгоритмах используются оценки электромагнитной совместимости любых двух и трех РС, работающих на заданных частотах. Построены условия электромагнитной совместимости для двух РС и условия исключения интермодуляционных помех для трех РС. Описан детальный алгоритм оптимизации присвоения рабочих частот РЛ с учетом всех возможных внеполосных и побочных излучений и каналов приема РС, решающий задачу за требуемое время в условиях, когда количество РЛ в сетях радиосвязи измеряется десятками тысяч. Это достигается за счет предварительного построения функций, описывающих условия электромагнитной совместимости для всех типов РС, используемых в РЛ и в передатчиках фоновой электромагнитной обстановки, предварительного выделения критичных пар и троек РС в РЛ, предварительного вычисления характеристик трасс распространения радиосигнала между критичными РС.

В третьей главе рассматривается задача проектирования баз данных АИС оценки качества радиосвязи и оптимизации присвоения частот радиолиниям. Описана разработанная автором методология проектирования баз данных сложных систем, отличающаяся от известных методологий возможностью описания фрагментов предметной области в виде их инфологических моделей с последующим построением канонической модели предметной области всей системы, которая отображается в концептуальную, внешнюю и внутреннюю модели данных используемой СУБД. Выбраны модели данных для построения инфологической модели фрагментов предметной области, канонических моделей фрагментов предметной области и канонической модели предметной области. Представлены алго-



ритмы отображения инфологической модели фрагмента предметной области в каноническую модель фрагмента предметной области и объединения канонических моделей фрагментов предметной области для получения канонической модели предметной области системы. Предложенная методология доведена до инженерных методик, в которых инфологические и канонические модели предметной области представляются в виде таблиц определенной структуры. Приведен состав таблиц базы данных АИС оценки качества радиосвязи и оптимизации присвоения частот радиолиниям, разработанный с использованием предложенной методологии.

В четвертой главе описаны программные модули, входящие в состав АИС оценки качества радиосвязи и оптимизации присвоения частот радиолиниям. Типовой состав модулей включает модуль работы с цифровой картой местности; модуль ведения данных о характеристиках объектов связи, РС и антенн; модуль расчета условий электромагнитной совместимости и условий исключения интермодуляционных помех; модуль ведения данных об организации радиосвязи; модуль расчета характеристик трасс распространения радиоволн; модуль оценки качества радиосвязи, в состав которого входят модули прогнозирования возможности связи между РС, прогнозирования возможности связи на интервалах цифровых радиорелейных линий и построения зон обслуживания базовых станций; модуль ведения ресурса частот для присвоения РЛ; модуль проверки возможности связи между РС РЛ; модуль определения критичных РС РЛ; модуль присвоения частот РЛ. В приложении приведена структура таблиц БД АИС оценки качества радиосвязи и оптимизации присвоения частот радиолиниям.

Книга может быть полезной ученым и аспирантам, ведущим исследования по вопросам оценки качества радиосвязи и оптимизации присвоения частот радиолиниям, а также разработчикам АИС оценки качества радиосвязи и оптимизации присвоения частот радиолиниям.

Настоящая монография является итогом многолетней научной работы автора в области разработки АИС оценки качества радиосвязи и оптимизации присвоения частот радиолиниям. Основные результаты, изложенные в монографии, были получены автором под научным руководством доктора технических наук В.И. Волошина. В обсуждении полученных научных результатов и их практической реализации принимали участие кандидаты технических наук В.А. Светличный, Ф.Г. Киндиренко, а также В.И. Шарангович, А.Н. Сержанович, А.Ю. Лагойко, Н.В. Евтихина, В.В. Просин, А.А. Полканов и другие коллеги автора.

Особая благодарность автора рецензентам доктору технических наук, профессору М.Н. Бобову и доктору технических наук, профессору М.А. Вилькоцкому, чьи ценные советы и замечания способствовали улучшению содержания книги.

---

Научное издание

**Карпук Анатолий Алексеевич**

**СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА РАДИОСВЯЗИ И  
ОПТИМИЗАЦИИ ПРИСВОЕНИЯ ЧАСТОТ РАДИОЛИНИЯМ**

Монография

Издание публикуется в авторской редакции

Дизайн обложки С.А. Кравец

---

Подписано в печать 15.12.2015. Формат 60x84 1/16  
Усл. печ. л. 14,6. Заказ 000. Тираж 500 экз.

---

ООО Издательство «Научная книга»  
394077, Россия, г. Воронеж, ул. 60-й Армии, 25-120  
<http://www.sbook.ru/>

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в ООО «Цифровая полиграфия»  
394036, Россия, г. Воронеж, ул. Ф. Энгельса, 52  
Тел. (473) 261-03-61