

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
Федеральное государственное образовательное бюджетное
учреждение высшего профессионального образования
**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»**

О. С. Данилович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ
РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ЛИНИЙ
И СЕТЕЙ СВЯЗИ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

СПбГУТ)))

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2013**

УДК 621.396.43(075.8)

ББК 32.884я73

Д18

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор заведующий кафедрой РПДУ СПбГУТ

М. А. Сиверс

кандидат технических наук, генеральный директор ЗАО «Радиан»

А. Ю. Гумбинас

*Утверждено редакционно-издательским советом СПбГУТ
в качестве учебного пособия*

Данилович, О. С.

Д18

Моделирование и оптимизация радиорелейных линий и сетей связи : учебное пособие / О. С. Данилович. – СПб. : Издательство СПбГУТ, 2013. – 84 с.

Дана общая характеристика задач моделирования и оптимизации радиорелейных линий (РРЛ) и сетей связи. Представлены математические модели и алгоритмы решения наиболее важных задач моделирования и оптимизации многоинтервальных цифровых РРЛ, а также местных и технологических сетей фиксированной радиосвязи.

Рассмотрены задачи оптимизации мощностей передатчиков и высот антенн на многоинтервальных РРЛ с линейной топологией и на ответвлениях от РРЛ, а также задачи оптимизации мощностей передатчиков и частотно-территориальных планов на сетях со звездобразной топологией и выбора трасс на сетях с кольцевой топологией.

Пособие предназначено для бакалавров и магистров, обучающихся по направлениям подготовки 210400 «Радиотехника» и 210700 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», а также для аспирантов и специалистов в области телекоммуникаций.

УДК 621.396.43.(075.8)

ББК 32.884я73

© Данилович О. С., 2013

© Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ЛИНИЙ И СЕТЕЙ СВЯЗИ	6
2. ОБОБЩЕННЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ РАДИОСВЯЗИ	8
3. ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫСОТ ПОДВЕСА АНТЕНН НА МНОГОИНТЕРВАЛЬНЫХ РРЛ	15
3.1. Постановка и математическая модель задачи оптимизации высот антенн на многоинтервальной РРЛ	15
3.2. Выбор метода решения задачи оптимизации высот антенн	17
3.3. Алгоритм оптимизации выбора высот антенн на основе динамического программирования	18
4. МНОВОВАРИАНТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫСОТ АНТЕНН НА МНОГОИНТЕРВАЛЬНЫХ РРЛ	23
4.1. Постановка и математическая модель задачи многовариантной оптимизации высот антенн на многоинтервальной РРЛ	23
4.2. Алгоритм решения задачи многовариантной оптимизации высот антенн на многоинтервальной РРЛ	24
5. МНОВОВАРИАНТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МОЩНОСТЕЙ ПЕРЕДАТЧИКОВ НА ИНТЕРВАЛАХ ЦИФРОВЫХ РРЛ С ДВУХЧАСТОТНЫМИ ПЛАНАМИ	28
5.1. Математическая модель задачи многовариантной оптимизации мощностей передатчиков	29
5.2. Оценка величины деградации запаса на замирания из-за влияния внутрисистемных помех	33
5.2.1. Оценка деградации запаса на замирания из-за влияния помех от сигналов обратного направления	33
5.2.2. Оценка деградации запаса на замирания в условиях совместного влияния помех от сигналов обратного направления и узлообразования	36
5.3. Алгоритм решения задачи оптимизации мощностей передатчиков	40
5.4. Оценка объема вычислений при многовариантной оптимизации мощностей передатчиков на многоинтервальных РРЛ	45
6. ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОТВЕТВЛЕНИЙ ОТ СУЩЕСТВУЮЩИХ РРЛ	47
6.1. Общая характеристика задачи оптимизации построения ответвлений от существующих РРЛ	47
6.2. Математическая модель и методика решения задачи оптимизации мощности передатчиков на ответвлении от существующей РРЛ.....	48
6.3. Выбор антенн и высот их подвеса на ответвлении	54

7. ОПТИМИЗАЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ МЕСТНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦИФРОВЫХ СЕТЕЙ ФИКСИРОВАННОЙ РАДИОСВЯЗИ СО ЗВЕЗДОБРАЗНОЙ ТОПОЛОГИЕЙ	56
7.1. Общая характеристика задач оптимизации построения местных и технологических цифровых сетей фиксированной радиосвязи.....	56
7.2. Оценка влияния внутрисистемных помех в цифровых сетях радиосвязи со звездообразной топологией	57
7.3. Оптимизация выбора мощностей передатчиков на местных и технологических цифровых сетях со звездообразной топологией.....	61
7.4. Совместная оптимизация мощностей передатчиков и частотно-территориальных планов на местных и технологических сетях со звездообразной топологией	66
8. ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА ТРАСС МЕСТНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СЕТЕЙ РАДИОСВЯЗИ С КОЛЬЦЕВОЙ ТОПОЛОГИЕЙ	69
8.1. Постановка задачи оптимизации и основные этапы ее решения.....	69
8.2. Оптимизация выбора высот антенн на сети с кольцевой топологией.....	74
ПРИЛОЖЕНИЕ. Пример оптимизации выбора высот антенн на многоинтервальной РРЛ с использованием динамического программирования	78
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	82

ВВЕДЕНИЕ

Специфические особенности территории России, такие как огромные размеры территории и наличие большого числа областей с суровыми природно-географическими условиями, неравномерная плотность населения, слабо развитая инфраструктура связи во многих регионах страны, а также экономическая целесообразность обуславливают необходимость широкого использования беспроводных технологий на транспортных сетях связи и в сетях доступа.

На транспортных сетях в большинстве случаев используются радиорелейные линии (РРЛ), входящие в состав магистральных и внутризоновых сетей, а также местных сетей и сетей технологической связи с различной топологией [1–4]. В настоящее время РРЛ работают в широком диапазоне частот от 160 МГц до 38 ГГц и даже выше [5–7]. В силу известных преимуществ уже давно практически все строящиеся и реконструируемые РРЛ являются цифровыми.

В условиях, когда требования к пропускной способности линий связи не являются чрезмерно высокими (не превышают 622 Мбит/с, т. е. 4 STM-1 или STM-4 в одном стволе), цифровые РРЛ являются хорошей альтернативой волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС). В сравнении с ВОЛС РРЛ выгодно отличаются слабой зависимостью от природно-географических условий, высокой надежностью линейного тракта и меньшими капитальными затратами при строительстве [1]. При этом в соответствии с современными рекомендациями Международного союза электросвязи (МСЭ), регламентирующими требования к показателям качества передачи, эти требования являются одинаковыми как для ВОЛС, так и для цифровых РРЛ, поэтому с точки зрения качественных показателей ВОЛС и РРЛ не должны отличаться [8, 9].

Следует также отметить полную совместимость ВОЛС и РРЛ при построении современных транспортных сетей связи, обеспечивающую возможность их взаимного резервирования, а также наличие свободного частотного ресурса в большинстве районов страны, что способствует широкому применению РРЛ на сетях связи России.

Основными пользователями линий и сетей радиорелейной связи в России являются операторы фиксированной и подвижной связи, а также корпоративные пользователи, прежде всего, компании нефтегазовой отрасли.

Беспроводные сети доступа формируются на основе систем подвижной связи (СПС) и систем беспроводного широкополосного доступа (БШД). При этом развитие и совершенствование СПС и БШД стимулирует строительство высокоскоростных и надежных транспортных сетей на основе РРЛ для соединения с базовыми станциями и передачи их трафика магистральным сетям и узлам коммутации.

Важным этапом построения линий и сетей радиорелейной связи является их проектирование. При проектировании РРЛ и, тем более, сетей радиосвязи приходится учитывать множество различных условий и требований, которые часто имеют противоречивый характер.

Тот факт, что от качества проектирования в значительной степени зависят не только показатели качества передачи информации и затраты на строительство, но и региональная электромагнитная обстановка, обуславливает исключительную важность решения задач оптимизации построения радиорелейных линий и сетей связи. Вместе с тем необходимо отметить, что оптимизация является наиболее сложной задачей проектирования, при этом для ее решения необходима не только высокая квалификация специалистов в области проектирования цифровых РРЛ, но и знание принципов и методов дискретной оптимизации сложных систем, а также возможностей вычислительной техники.

В пособии рассмотрены наиболее важные задачи моделирования и оптимизации многоинтервальных цифровых РРЛ, а также местных и технологических сетей фиксированной радиосвязи. В разд. 1 и 2 дана общая характеристика задач моделирования и оптимизации радиорелейных линий и сетей связи. В разд. 3–6 содержатся решения задач оптимизации построения многоинтервальных цифровых РРЛ с линейной топологией и ответвлений от указанных РРЛ. В разд. 7 и 8 представлены решения задач оптимизации местных и технологических сетей радиосвязи соответственно со звездообразной и кольцевой топологиями. В приложении приведен числовой пример решения задачи оптимального выбора высот антенн на многоинтервальной РРЛ.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ЛИНИЙ И СЕТЕЙ СВЯЗИ

Комплексная оптимизация построения многоинтервальных РРЛ, тем более, сетей РРЛ на основе системного подхода является исключительно сложной задачей, предусматривающей учет большого числа различных параметров и показателей качества, требования к которым часто носят противоречивый характер. По этой причине в процессе проектирования вместо решения задачи комплексной оптимизации рассматриваемой РРЛ решаются частные задачи оптимизации, что, как правило, позволяет получить хорошее проектное решение в целом.

Наиболее важными частными задачами оптимизации построения радиорелейных линий, а также местных и технологических сетей фиксированной радиосвязи являются следующие:

– оптимизация выбора мест расположения радиорелейных станций на трассах РРЛ с линейной топологией;

- оптимизация трасс местных и технологических РРЛ с кольцевой топологией;
- оптимизация высот подвеса антенн на многоинтервальной РРЛ;
- оптимизация мощностей передатчиков на интервалах РРЛ с линейной топологией и двухчастотными планами распределения частот радиоканалов;
- оптимизация характеристик ответвлений от существующих РРЛ при повторном использовании частот;
- оптимизация мощностей передатчиков на интервалах местных и технологических сетей радиосвязи со звездообразной топологией;
- оптимизация частотно-территориального планирования на местных и технологических сетях радиосвязи со звездообразной топологией.

В общем случае при решении задач оптимизации на этапе проектирования РРЛ и указанных сетей фиксированной радиосвязи приходится учитывать большое число самых разнообразных факторов:

- региональные радиоклиматические характеристики, определяющие особенности распространения радиоволн;
- топографические характеристики земной поверхности;
- технические и технико-экономические характеристики используемого радиорелейного оборудования;
- технические характеристики антенн и волноводных трактов;
- технико-экономические характеристики используемых антенных опор;
- существующие требования к показателям качества передачи;
- влияние внутрисистемных помех различного происхождения;
- региональную электромагнитную обстановку (ЭМО) и влияние на нее проектируемой РРЛ или сети;
- дополнительные специфические требования к проектному решению;
- ожидаемые затраты на строительство и эксплуатацию проектируемой радиолинии или сети связи.

Во многих случаях, при проектировании РРЛ и сетей радиосвязи имеют место дополнительные неформальные или трудно формализуемые ограничения, которые иногда даже не известны на этапе проектирования многоинтервальных РРЛ. Чаще всего причинами указанных дополнительных ограничений являются проблема электромагнитной совместимости с существующими в регионе радиотехническими средствами, конструктивные особенности используемых антенных опор и связанные с этим ограничения на высоты подвеса антенн, на размеры используемых антенн, на распределение частот и видов поляризации радиоволн на интервалах, на уровни излучаемой мощности в определенных направлениях и т. д.

Следует отметить, что даже в тех случаях, когда указанные дополнительные ограничения могут быть формализованы, их включение в матема-

тическую модель задачи оптимизации в явном виде, как правило, нецелесообразно, так как это либо существенно усложняет решение задачи, либо делает ее практически нерешаемой. Более разумным является отдельный учет указанных ограничений.

В условиях наличия указанных выше дополнительных неформальных или трудноформализуемых ограничений практический интерес представляет нахождение не только оптимального, но и еще нескольких ранжированных лучших решений рассматриваемой задачи оптимизации, т. е. решение задачи многовариантной оптимизации.

Необходимыми условиями успешного решения любой задачи оптимизации построения РРЛ и сетей радиосвязи являются четкая постановка задачи оптимизации и использование адекватной математической модели.

2. ОБОБЩЕННЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ РАДИОСВЯЗИ

Математическая модель представляет собой формализованную запись рассматриваемой задачи оптимизации. Следует отметить, что математическая модель всегда представляет собой упрощенное отображение рассматриваемой реальной задачи. Однако при этом она должна отражать все основные ее особенности. Удачный выбор математической модели задачи оптимизации во многом определяет успех ее решения. Поэтому разработка математической модели – исключительно важный этап решения задачи оптимизации, требующий глубокого знания содержания моделируемой задачи и существующих возможностей вычислительной математики и вычислительной техники.

Любая задача оптимизации характеризуется одним или несколькими показателями качества и дополнительными условиями-ограничениями. В случае единственного показателя качества задача считается однокритериальной, если задача содержит больше одного показателя качества, говорят о многокритериальной оптимизации. Для нахождения оптимального решения многокритериальной задачи оптимизации необходимо свести ее к однокритериальной задаче. Делается это либо путем объединения нескольких показателей качества (в случае однотипных или однородных показателей), т. е. сведения нескольких показателей к одному, либо путем выделения одного – наиболее важного показателя, который считается критерием оптимальности – целевой функцией, и перевода всех остальных показателей качества в разряд условий-ограничений.

При моделировании задач оптимизации РРЛ и сетей радиосвязи обычно используется принцип минимума затрат, который заключается в минимизации целевой функции, в качестве которой используется некоторый обобщенный показатель затрат, при условии выполнения заданных требований к эффективности рассматриваемой линии или сети.

При этом в качестве показателя затрат могут быть использованы непосредственно затраты (например, затраты на строительство подъездных путей и линий электропередачи к радиорелейным станциям, затраты на антенные опоры и/или антенны), средний уровень мощности передатчиков (например, на трассе РРЛ с линейной топологией или на узловой станции сети радиосвязи со звездообразной топологией), необходимое число пар частот в сети радиосвязи со звездообразной топологией.

В качестве характеристик эффективности обычно используются существующие требования к показателям качества передачи информации с учетом влияния внутрисистемных помех.

Обобщенная математическая модель задачи оптимизации цифровой системы радиосвязи имеет вид:

найти такое решение Z^* , для которого целевая функция

$$F(Z^*) = \min_{Z \in \Omega(Z)} F(Z) \quad (2.1)$$

при условиях:

$$S(Z) \leq S_{\max}; \quad (2.2)$$

$$U(Z) \leq U_{\max}. \quad (2.3)$$

В (2.1) – (2.3) Z – возможный вариант решения задачи, определяющий возможный вариант построения рассматриваемой системы радиосвязи;

$\Omega(Z)$ – множество возможных вариантов решения;

$F(Z)$ – значение целевой функции, соответствующее Z ;

$S(Z)$ – значение показателя качества по ошибкам, соответствующее Z ;

$U(Z)$ – значение показателя неготовности, соответствующее Z ;

S_{\max} и U_{\max} – соответственно максимально допустимые значения показателей качества по ошибкам и неготовности, определяемые в соответствии с рекомендациями Международного союза электросвязи [8, 9].

Каждый из возможных вариантов построения системы радиосвязи представляет собой упорядоченную последовательность элементов $Z^{(1)}, Z^2, \dots, Z^{(N)}$, характеризующих возможные способы построения соответствующих подсистем (звеньев), входящих в состав рассматриваемой системы, т. е.

$$Z = \{Z^{(1)}, Z^{(2)}, \dots, Z^{(N)}\}, \quad (2.4)$$

где N – общее число звеньев системы.

При этом $Z^{(n)} \in \Omega(Z^{(n)})$, $n = \overline{1, N}$, где $\Omega(Z^{(n)})$ – множество возможных вариантов построения n -го звена. В качестве звеньев системы радиосвязи могут рассматриваться, например, отдельные радиостанции, элементы радиостанций, интервалы или участки радиолиний. В свою очередь, каждый

из элементов $Z^{(n)} \in \Omega(Z^{(n)})$ представляет собой упорядоченную последовательность элементов $Z_1^{(n)}, Z_2^{(n)}, \dots, Z_{I(n)}^{(n)}$, характеризующих возможные варианты соответствующих изменяемых параметров n -го звена, т. е.:

$$Z^{(n)} = \{Z_1^{(n)}, Z_2^{(n)}, \dots, Z_{I(n)}^{(n)}\},$$

где $I(n)$ – число параметров n -го звена, изменяемых в процессе оптимизации системы радиосвязи (изменяемых параметров).

При этом $Z_{i(n)}^{(n)} \in \Omega(Z_{i(n)}^{(n)})$, $i(n) = \overline{1, I(n)}$, где $\Omega(Z_{i(n)}^{(n)})$ – множество возможных вариантов $i(n)$ -го изменяемого параметра n -го звена.

В случае многовариантной оптимизации в условиях наличия дополнительных неформальных ограничений математическая модель задачи нахождения заданного числа ранжированных лучших решений может быть записана в виде:

найти такие $Z^{*(k)}$, $k = \overline{1, K}$, для которых

$$F(Z^{*(k)}) = \min_{Z \in \Omega^{(k)}(Z)} F(Z) \quad (2.5)$$

при условиях:

$$F(Z^{*(k)}) \leq F(Z^{*(m)}), k < m, m = \overline{1, K}; \quad (2.6)$$

$$\Omega^{(k)}(Z) = \Omega(Z), k = 1; \Omega^{(k)}(Z) = \Omega(Z) \setminus \Omega^{*(k-1)}(Z), k = \overline{2, K}; \quad (2.7)$$

$$S(Z^{*(k)}) \leq S_{max}; \quad (2.8)$$

$$U(Z^{*(k)}) \leq U_{max}. \quad (2.9)$$

В (2.7) $\Omega^{*(k-1)}(Z) = \{Z^{*(1)}, Z^{*(2)}, \dots, Z^{*(k-1)}\}$ – множество $(k-1)$ ранжированных лучших решений задачи (символ « \ » означает разность двух множеств; K – заданное число отыскиваемых ранжированных лучших решений).

В большинстве случаев при разработке конкретных математических моделей задач оптимизации радиорелейных линий и сетей рассматриваются дискретные множества изменяемых параметров и характеристик, поэтому все используемые в математических моделях (2.1) – (2.3) и (2.5) – (2.9) множества $\Omega(Z_{i(n)}^{(n)})$, $\Omega(Z^{(n)})$, $\Omega(Z)$, $\Omega^{(k)}(Z)$ и $\Omega^{*(k)}$ будем считать дискретными. С учетом этого можно считать, что все основные реальные задачи оптимизации радиорелейных линий и сетей являются задачами дискретной оптимизации.

Среди известных методов дискретной оптимизации для решения задач оптимизации построения многоинтервальных РРЛ с линейной и кольцевой топологиями, в том числе РРЛ с ответвлениями, наиболее подходящими являются методы, основанные на принципах динамического программирования [10].

Методы динамического программирования предназначены для решения сепарабельных задач оптимизации, математические модели которых содержат только сепарабельные функции.

В общем случае сепарабельная функция может быть записана в виде:

$$F(z_1, z_2, \dots, z_N) = \sum_{n=v+1}^N f_n(z_{n-v}, z_{n-v+1}, \dots, z_n), \quad (2.10)$$

где $z_n, n = \overline{1, N}$ – изменяемые параметры;

N – число изменяемых параметров;

$F(z_1, z_2, \dots, z_N)$ – сепарабельная функция N изменяемых параметров;

v – степень уменьшения сепарабельности, $0 \leq v \leq N - 2$;

$f_n(z_{n-v}, z_{n-v+1}, \dots, z_n)$ – функция произвольного вида, зависящая от $(v + 1)$ изменяемых параметров.

В случае $v = 0$ функция

$$F(z_1, z_2, \dots, z_N) = \sum_{n=1}^N f_n(z_n) \quad (2.11)$$

считается полностью сепарабельной.

При $1 \leq v \leq N - 2$ функция $F(z_1, z_2, \dots, z_N)$, определяемая (2.10), считается частично сепарабельной.

Простейшими частично сепарабельными функциями являются функции:

$$F(z_1, z_2, \dots, z_N) = \sum_{n=2}^N f_n(z_{n-1}, z_n); \quad (2.12)$$

$$F(z_1, z_2, \dots, z_N) = \sum_{n=3}^N f_n(z_{n-2}, z_{n-1}, z_n), \quad (2.13)$$

соответствующие $v = 1$ и $v = 2$.

Если все функции, входящие в математическую модель задачи дискретной оптимизации, полностью сепарабельны, то указанная задача также является полностью сепарабельной. Очевидно, решение полностью сепарабельной задачи имеет тривиальный характер. Поэтому практический интерес представляет использование методов динамического программирования для решения частично сепарабельных задач дискретной оптимизации радиорелейных линий и сетей связи и, прежде всего, наиболее простых задач, для которых параметр $v \leq 2$.

Методы динамического программирования предусматривают поочередное пошаговое рассмотрение подсистем рассматриваемой системы, содержащих все возрастающее число элементов, и условную оптимизацию указанных подсистем. В основе методов динамического программирования лежат два основных принципа: принцип оптимальности и принцип вложения.

Принцип оптимальности предусматривает обеспечение условно оптимального продолжения процесса принятия решений относительно уже достигнутого его состояния независимо от предыстории процесса. Другими словами, каково бы ни было состояние перед очередным шагом, решение на этом шаге следует выбирать таким образом, чтобы суммарный выигрыш на данном и всех последующих шагах процесса условной оптимизации был максимальным. Принцип вложения предполагает неизменность характера задач условной оптимизации, решаемых на разных шагах процесса последовательной оптимизации.

Таким образом, методы динамического программирования предусматривают последовательное многократное решение однопериодных относительно простых задач условной оптимизации вместо решения сложной задачи оптимизации сепарабельной функции большой размерности.

Процедуру оптимизации на основе динамического программирования удобнее рассматривать в обратном порядке (справа-налево), т. е. вначале выполняется условная оптимизация подсистем, содержащих звенья с большими номерами (2.4).

Отличительной особенностью многовариантного динамического программирования является то, что на каждом шаге процесса условной оптимизации для каждого фиксированного условия выбирается не один условно оптимальный вариант частного решения, а K условно лучших вариантов. При этом рассматриваются K условно лучших вариантов решений, найденных на предшествующем шаге условной оптимизации для каждого фиксированного условия на этом шаге [11].

Алгоритмы оптимизации, основанные на принципах динамического программирования, характеризуется функциональным уравнением динамического программирования, которое имеет рекуррентный характер и связывает результаты условной оптимизации на двух соседних шагах (предшествующем и последующем).

С целью пояснения принципов динамического программирования рассмотрим примеры функциональных уравнений динамического программирования.

Функциональное уравнение динамического программирования при $\nu = 1$ можно записать в виде:

$$F_{n+1}^*(z_n) = \min_{z_{n+1}} [f_{n+1}(z_n, z_{n+1}) + F_{n+2}^*(z_{n+1})] \quad (2.14)$$

или

$$F_{n+1}^*(z_n) = f_{n+1}[z_n, z_{n+1}^*(z_n)] + F_{n+2}^*[z_{n+1}^*(z_n)], \quad (2.15)$$

где $F_{n+1}^*(z_n)$ – условно минимальное значение частной целевой функции $F_{n+1}(z_{n+1}, z_{n+2}, \dots, z_N)$, зависящей только от параметров $z_{n+1}, z_{n+2}, \dots, z_N$, при фиксированном z_n ;

$f_{n+1}(z_n, z_{n+1})$ – слагаемое правой части (2.12);

$F_{n+2}^*(z_{n+1})$ – найденное на предшествующем шаге оптимизации условно минимальное значение частной целевой функции $F_{n+2}(z_{n+2}, z_{n+3}, \dots, z_N)$, зависящей только от параметров $z_{n+2}, z_{n+3}, \dots, z_N$, при фиксированном z_{n+1} ;

$z_{n+1}^*(z_n)$ – условно оптимальное значение параметра z_{n+1} при фиксированном z_n .

При $\nu = 2$ функциональное уравнение имеет вид:

$$F_{n+2}^*(z_n, z_{n+1}) = \min_{z_{n+2}} [f_{n+2}(z_n, z_{n+1}, z_{n+2}) + F_{n+3}^*(z_{n+1}, z_{n+2})] \quad (2.16)$$

или

$$F_{n+2}^*(z_n, z_{n+1}) = f_{n+2}[z_n, z_{n+1}, z_{n+2}^*(z_n, z_{n+1})] + F_{n+3}^*[z_{n+1}, z_{n+2}^*(z_n, z_{n+1})], \quad (2.17)$$

где $F_{n+2}^*(z_n, z_{n+1})$ – условно минимальное значение частной целевой функции $F_{n+2}(z_{n+2}, z_{n+3}, \dots, z_N)$, зависящей только от параметров $z_{n+2}, z_{n+3}, \dots, z_N$, при фиксированных z_n и z_{n+1} ;

$f_{n+2}(z_n, z_{n+1}, z_{n+2})$ – слагаемое правой части (2.13);

$F_{n+3}^*(z_{n+1}, z_{n+2})$ – найденное на предшествующем шаге оптимизации условно минимальное значение частной целевой функции $F_{n+3}(z_{n+3}, z_{n+4}, \dots, z_N)$, зависящей только от параметров $z_{n+3}, z_{n+4}, \dots, z_N$, при фиксированных z_{n+1} и z_{n+2} ;

$z_{n+2}^*(z_n, z_{n+1})$ – условно оптимальное значение параметра z_{n+2} при фиксированных z_n и z_{n+1} .

В случае многовариантного динамического программирования при $\nu = 1$ функциональное уравнение имеет вид:

$$F_{n+1}^{(k_{n+1})^*}(z_n) = \min_{(z_{n+1}, k_{n+2})} [f_{n+1}(z_n, z_{n+1}) + F_{n+2}^{(k_{n+2})^*}(z_{n+1})], \quad (2.18)$$

где $F_{n+1}^{(k_{n+1})^*}(z_n)$ – (k_{n+1}) -е ранжированное условно минимальное значение частной целевой функции $F_{n+1}(z_{n+1}, z_{n+2}, \dots, z_N)$, зависящей только от параметров $z_{n+1}, z_{n+2}, \dots, z_N$, при фиксированном z_n , $k_{n+1} = \overline{1, K}$;

(z_{n+1}, k_{n+2}) – пара параметров, по которым осуществляется условная минимизация: $(n+1)$ -й параметр, определяющий целевую функцию, и номер ранжированного условно минимального значения частной целевой функции, найденного на предшествующем шаге процесса условной оптимизации;

$F_{n+2}^{(k_{n+2})^*}(z_{n+1})$ – найденное на предшествующем шаге оптимизации (k_{n+2}) -е ранжированное условно минимальное значение частной целевой функции, $F_{n+2}(z_{n+2}, z_{n+3}, \dots, z_N)$ зависящей только от параметров $z_{n+2}, z_{n+3}, \dots, z_N$, при фиксированном z_{n+1} , $k_{n+2} = \overline{1, K}$.

Решение частично сепарабельных задач дискретной оптимизации на основе динамического программирования позволяет резко сократить объем необходимых вычислений.

Нетрудно убедиться, что верхние границы числа вычислений частных целевых функций в случае использования динамического программирования при $\nu = 1$ и $\nu = 2$ определяются соответственно выражениями:

$$\sup W_{\text{ДП.1}} = (N-1)M^2, \quad M = \max_n M_n; \quad (2.19)$$

$$\sup W_{\text{ДП.2}} = (N-2)M^3. \quad (2.20)$$

В случае многовариантного динамического программирования при $\nu = 1$ верхняя граница числа вычислений частных целевых функций

$$\sup W_{\text{МВДП.1}} = (N-1)KM^2, \quad (2.21)$$

а верхняя граница числа сравнений текущих значений целевой функции при их ранжировании

$$\sup W_{\text{МВДП.С}} \approx K^2 \cdot J^2(N-1). \quad (2.22)$$

Очевидно, что при решении задач дискретной оптимизации методом простого (прямого) перебора выражение для верхней границы числа вычислений целевой функции имеет вид:

$$\sup W_{\text{ПП.1}} = M^N, \quad (2.23)$$

при этом верхняя граница общего числа сравнений значений целевой функции при их ранжировании

$$\sup V_{\text{сцф}} \approx K \cdot M^N. \quad (2.24)$$

Сравнение (2.19), (2.21) и (2.22), с одной стороны, (2.23) и (2.24), с другой стороны, позволяет сделать вывод о том, что при решении задач многовариантной оптимизации использование методов динамического программирования обеспечивает большой выигрыш в объеме вычислений в сравнении с методом простого перебора, причем указанный выигрыш быстро возрастает с увеличением числа параметров, определяющих целевую функцию.

В заключение следует отметить, что принципы динамического программирования имеют общий характер. С одной стороны, это обеспечивает возможность решения широкого круга сепарабельных задач оптимизации, причем независимо от вида и характера функций, входящих в математические модели. С другой стороны, это требует немалых усилий при разработке конкретных математических моделей и функциональных уравнений при решении реальных задач оптимизации построения радиолиний и сетей радиосвязи.

Примеры решения конкретных задач оптимизации многоинтервальных РРЛ и сетей связи на основе методов динамического программирования рассмотрены в разд. 3–5 и 8.

3. ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫСОТ ПОДВЕСА АНТЕНН НА МНОГОИНТЕРВАЛЬНЫХ РРЛ

Затраты на строительство радиорелейных линий в значительной степени определяются стоимостью антенных опор, на которых размещаются антенны. Во многих случаях эти затраты превышают затраты на все радиорелейное оборудование, включая антенны. Стоимость опоры вместе с фундаментом зависит от типа опоры (решетчатые мачтовые и башенные опоры, трубчатые опоры – мачты) и ее высоты. Высоты серийно выпускаемых опор достигают 120 м. Необходимая высота опоры зависит от высот подвеса размещенных на ней антенн.

К высотам подвеса антенн предъявляются противоречивые требования. С одной стороны, они должны удовлетворять критериям допустимости пар высот антенн на интервалах, обеспечивающим выполнение требований к показателям качества передачи. С другой стороны, при этом должны быть

обеспечены наименьшие затраты на сооружение антенных опор и фидерных трактов (в случае нижнего размещения приемопередающего оборудования). Поэтому выбор высот подвеса антенн является одной из основных задач при проектировании строящихся и реконструируемых многоинтервальных РРЛ.

Следует отметить, что в общем случае при оценке затрат, зависящих от высоты опоры, необходимо также учитывать стоимость земельного участка, отведенного для радиорелейной станции (размеры которого зависят от типа и высоты опоры), очистки этого участка и его ограждения, защитной светосигнализации на опоре, доставки и монтажа опоры, а также стоимость волноводных трактов (при нижнем размещении приемопередатчиков) или соединительных кабелей (при верхнем размещении приемопередатчиков). Помимо этого следует учитывать эксплуатационные расходы, которые также зависят от высоты антенной опоры.

С учетом сказанного оптимизация выбора высот подвеса антенн, а следовательно, и оптимизация высот антенных опор является важной задачей проектирования многоинтервальных РРЛ. От решения указанной задачи в значительной степени зависят затраты на строительство проектируемой РРЛ.

3.1. Постановка и математическая модель задачи оптимизации высот антенн на многоинтервальной РРЛ

Задачу оптимизации высот подвеса антенн на многоинтервальной РРЛ целесообразно решать на основе принципа минимума затрат. В качестве целевой функции разумно использовать ожидаемые суммарные затраты на антенные опоры (и волноводные тракты) для всей рассматриваемой РРЛ.

При этом должны быть учтены критерии допустимости пар высот антенн (ПВА) на отдельных интервалах и конструктивные особенности используемых антенных опор. Тот факт, что необходимая высота каждой опоры (за исключением крайних) зависит от высот подвеса на ней антенн, относящихся к двум смежным интервалам, обуславливает необходимость совместного рассмотрения пар высот антенн и высот опор на всех интервалах РРЛ.

Таким образом, задача оптимального выбора высот антенн на многоинтервальной РРЛ заключается в нахождении такой упорядоченной последовательности допустимых ПВА на интервалах (УП-ПВА), для которой обеспечиваются минимальные суммарные затраты на все опоры. Указанную УП-ПВА будем называть оптимальной.

Задача нахождения оптимальной УП-ПВА рассматривается при следующих условиях:

- места расположения радиорелейных станций на трассе рассматриваемой РРЛ известны и имеются необходимые топографические исходные данные для построения профилей интервалов;
- тип (типы) и параметры используемого радиорелейного оборудования заданы;

– высоты антенных опор определяются высотами подвеса на них верхних антенн;

– конструктивно возможные высоты подвеса антенн на опорах образуют дискретные множества;

– для каждого типа опор, используемых на рассматриваемой РРЛ, известна зависимость затрат на сооружение опоры от ее высоты.

Для того чтобы записать математическую модель рассматриваемой задачи оптимизации, введем следующие обозначения:

N – число интервалов на рассматриваемой РРЛ;

q_n – возможная ПВА на интервале n , $n = \overline{1, N}$;

ω_n – дискретное множество возможных ПВА на интервале;

$Q = \{q_1; q_2; \dots; q_N\}$ – упорядоченная последовательность ПВА на всей РРЛ (УП-ПВА);

$\Omega(Q)$ – дискретное множество возможных УП-ПВА на всей РРЛ, $Q \in \Omega(Q)$;

Ω_n – дискретное множество нехудших допустимых ПВА на интервале n (ПВА считается нехудшей, если среди допустимых пар не существует ПВА с не большими высотами подвеса на обоих концах интервала);

M_n – число элементов множества Ω_n ;

$s_n(q_{n-1}, q_n)$ – затраты на n -ю опору, зависящие от ПВА на $(n - 1)$ -м и n -м интервалах, $n = \overline{2, N}$;

$s_1(q_1)$ и $s_{N+1}(q_N)$ – соответственно затраты на 1-ю и $(N + 1)$ -ю опоры, зависящие от ПВА q_1 и q_N (такие обозначения учитывают возможность использования разнотипных антенных опор на РРЛ).

С учетом введенных обозначений математическую модель рассматриваемой задачи оптимизации можно записать в виде [12]:

найти такую УП-ПВА $Q^* = \{q_1^*; q_2^*; \dots; q_N^*\}$, для которой суммарные затраты на все опоры (и волноводные тракты)

$$S(Q^*) = \min_{\Omega(Q)} [s_1(q_1) + s_{N+1}(q_N) + \sum_{n=2}^N s_n(q_{n-1}; q_n)] \quad (3.1)$$

при условиях

$$q_n^* \in \Omega_n, n = \overline{1, N}. \quad (3.2)$$

Множество Ω_n содержит все нехудшие ПВА на интервале n , удовлетворяющие критериям допустимости в условиях нормальной рефракции радиоволн и в условиях субрефракции. В условиях нормальной рефракции критерием допустимости ПВА является величина просвета на интервале. Критерий допустимости при субрефракции основан на оценке величины дифракционных потерь.

В случае пересеченных интервалов, когда влиянием отражения радиоволн от земной поверхности можно пренебречь, критерий допустимости ПВА при нормальной рефракции радиоволн имеет вид:

$$p[g(20\%)] \geq 1, \text{ для худшего сезона,} \quad (3.3)$$

где $g(20\%)$ – стандартное значение эффективного вертикального градиента диэлектрической проницаемости g , превышаемое не более чем примерно в 20% времени, 1/м;

$p[g(20\%)]$ – относительный просвет на интервале при $g = g(20\%)$, нормированный относительно радиуса зоны Френеля, соответствующей полю свободного пространства.

В случае слабопересеченных интервалов, когда влияние отражения радиоволн от земной поверхности необходимо учитывать, критерий допустимости ПВА при нормальной рефракции радиоволн имеет вид [12, 13]:

$$p(\bar{g}) \in G_{m.\max}, \quad (3.4)$$

где $G_{m.\max}$ – область интерференционного максимума с наименьшим номером m .

Для интервалов любого типа критерием допустимости ПВА в условиях субрефракции радиоволн является неравенство [12, 13]:

$$V_{\text{дифр}}(g_0) \geq V_{\text{дифр.мин}}, \quad (3.5)$$

где g_0 – значение вертикального градиента диэлектрической проницаемости при субрефракции, 1/м; $V_{\text{дифр}}(g_0)$ – дифракционный множитель ослабления в условиях субрефракции, дБ; $V_{\text{дифр.мин}}$ – минимально допустимое значение дифракционного множителя ослабления, дБ.

Задача выбора оптимальной УП-ПВА иллюстрируется рис. 3.1, на котором тонкими линиями обозначены возможные ПВА на отдельных интервалах, а жирными линиями – нехудшие допустимые ПВА, входящие в оптимальную УП-ПВА.

3.2. Выбор метода решения задачи оптимизации высот антенн

С целью сокращения объема вычислений решение рассматриваемой задачи оптимизации целесообразно выполнять в два этапа [12].

Первый этап – подготовительный и его главной задачей является формирование дискретного множества нехудших допустимых ПВА Ω_n из множества ω_n для каждого интервала. Будем обозначать $q_{i(n)}$ $i(n)$ -ю нехудшую допустимую ПВА на n -м интервале.

Кроме того, на первом этапе для всех типов используемых на проектируемой РРЛ антенных опор формируются таблицы затрат, содержащие значения стоимости опоры для различных дискретных значений ее высоты.

На втором этапе решается собственно задача оптимизации, предусматривающая минимизацию целевой функции (3.1) на дискретном множестве всех возможных упорядоченных последовательностей нехудших допустимых ПВА на интервалах.

Решение рассматриваемой задачи нахождения оптимальной УП-ПВА может быть получено путем простого перебора всех возможных вариантов решения, при этом число вычислений значений целевой функции, характеризующее объем вычислений

$$W_{\text{пп}} = \prod_{n=1}^N M_n, \quad (3.6)$$

где M_n – число нехудших допустимых ПВА на интервале n .

Верхняя граница $W_{\text{пп}}$

$$\sup W_{\text{пп}} = M^N, \quad (3.7)$$

где $M = \max_n M_n$.

При решении реальных задач оптимизации высот антенн на многоинтервальных РРЛ величина $W_{\text{пп}}$ может достигать весьма больших значений. Например, для РРЛ протяженностью 900 км, содержащей 30 интервалов, и $M = 10 \sup$, $W_{\text{пп}} = 10^{30}$. Очевидно, решение такой задачи даже с использованием современных средств вычислительной техники является серьезной проблемой. Отсюда можно сделать вывод, что на основе метода простого перебора решение задач оптимизации высот антенн на многоинтервальных РРЛ возможно лишь при небольшой вариантности допустимых ПВА на интервалах и небольшом числе интервалов.

Учитывая частично сепарабельный характер рассматриваемой задачи оптимизации высот антенн, для ее решения целесообразно использовать метод динамического программирования [10]. Применительно к данной задаче метод динамического программирования предусматривает поочередное рассмотрение участков РРЛ, содержащих различное, все возрастающее число интервалов. При этом на очередном шаге процесса оптимизации для каждой допустимой ПВА на последнем интервале рассматриваемого участка РРЛ определяется условно оптимальная допустимая ПВА на предпоследнем интервале участка. В качестве условно оптимальной ПВА на предпоследнем интервале выбирается такая пара высот, которой соответствуют наименьшие суммарные затраты на все опоры, входящие в рассматриваемый участок линии, за исключением последней.

Процесс оптимизации на основе динамического программирования удобнее рассматривать в обратном порядке (справа-налево), т. е. сначала рассматривается 2-интервальный участок, включающий $(N-1)$ -й и N -й интервалы, затем – 3-интервальный участок, содержащий $(N-2)$ -й, $(N-1)$ -й и N -й интервалы, и так далее до тех пор, пока рассматриваемый участок не будет включать всю линию.

3.3. Алгоритм оптимизации выбора высот антенн на основе динамического программирования

Алгоритм оптимизации высот антенн на основе динамического программирования имеет пошаговый характер.

Первый шаг. Каждой ПВА на N -м интервале $q_{i(N)}$ однозначно соответствуют определенные затраты, относящиеся к опоре O_{N+1} .

Предположим, что фиксирована некоторая допустимая ПВА на $(N-1)$ -м интервале $q_{i(N-1)}$ (рис. 3.1). Для каждой допустимой ПВА на N -м интервале $q_{i(N)}$ найдем суммарные затраты, относящиеся к опорам O_N и O_{N+1} :

$$S_N\left(\frac{q_{i(N-1)}}{q_{i(N)}}\right) = s_N(q_{i(N-1)}; q_{i(N)}) + s_{N+1}(q_{i(N)}). \quad (3.8)$$

Осуществляя в (3.8) минимизацию по $q_{i(N)}$, найдем условно минимальные суммарные затраты на опоры O_N и O_{N+1} при фиксированной паре высот $q_{i(N-1)}$:

$$\begin{aligned} S_N^*(q_{i(N-1)}) &= \min_{q_{i(N)} \in \Omega^{(N)}} S_N(q_{i(N-1)}/q_{i(N)}) = \\ &= s_N[q_{i(N-1)}; q_N^*(q_{i(N-1)})] + s_{N+1}[q_N^*(q_{i(N-1)})], \end{aligned}$$

где $q_N^*(q_{i(N-1)})$ – условно оптимальная допустимая ПВА на N -м интервале, соответствующая выбранному $q_{i(N-1)}$.

Подобные вычисления производятся для всех $q_{i(N-1)} \in \Omega_{N-1}$. Таким образом, в результате выполнения первого шага оптимизации для каждого допустимого $q_{i(N-1)} \in \Omega_{N-1}$ имеются условно оптимальная ПВА на N -м интервале $q_N^*(q_{i(N-1)})$ и соответствующие ей условно минимальные суммарные затраты на N -ю и $(N+1)$ -ю опоры $S_N^*(q_{i(N-1)})$.

Произвольный шаг, на котором рассматривается участок РРЛ, содержащий n -й, $(n+1)$ -й, ..., N -й интервалы. Пусть в результате выполнения предшествующего шага оптимизации, на котором рассматривался участок РРЛ, содержащий $(n+1)$ -й, $(n+2)$ -й, ..., N -й интервалы, для каждого допустимого $q_{i(n+1)} \in \Omega_{n+1}$ найдены условно оптимальная УП-ПВА на $(n+2)$ -м, $(n+3)$ -м, ..., N -м интервалах

$$Q_{n+2}^*(q_{i(n+1)}) = \{q_{n+2}^*(q_{i(n+1)}); q_{n+3}^*(q_{i(n+1)}); \dots; q_N^*(q_{i(n+1)})\}$$

и соответствующие ей условно минимальные суммарные затраты $S_{n+2}^*(q_{i(n+1)})$ на опоры $O_{n+2}, O_{n+3}, \dots, O_{N+1}$.

Предположим теперь, что фиксирована допустимая ПВА на n -м интервале $q_{i(n)}$. Выберем некоторую допустимую ПВА на $(n+1)$ -м интервале $q_{i(n+1)}$ и найдем суммарные затраты, относящиеся к опорам $O_{n+1}, O_{n+2}, \dots, O_{N+1}$:

$$S_{n+1}(q_{i(n)}/q_{i(n+1)}) = s_{n+1}(q_{i(n)}; q_{i(n+1)}) + S_{n+2}^*(q_{i(n+1)}).$$

После вычисления $S_{n+1}(q_{i(n)}/q_{i(n+1)})$ для всех $q_{i(n+1)} \in \Omega_{n+1}$ определяются условно минимальные суммарные затраты на опоры $O_{n+1}, O_{n+2}, \dots, O_{N+1}$ при фиксированном $q_{i(n)}$:

$$\begin{aligned} S_{n+1}^*(q_{i(n)}) &= \min_{q_{i(n+1)} \in \Omega_{n+1}} S_{n+1}(q_{i(n)}/q_{i(n+1)}) = \\ &= s_{n+1}[q_{i(n)}; q_{n+1}^*(q_{i(n)})] + S_{n+2}^*[q_{n+1}^*(q_{i(n)})], \end{aligned} \quad (3,9)$$

где $q_{n+1}^*(q_{i(n)})$ – условно оптимальная ПВА на $(n+1)$ -м интервале для выбранного $q_{i(n)}$, $S_{n+2}^*[q_{n+1}^*(q_{i(n)})]$ – найденные на предыдущем шаге условно минимальные затраты.

Выражение (3.9) является функциональным уравнением динамического программирования для рассматриваемой задачи оптимизации.

Полученным затратам $S_{n+1}^*(q_{i(n)})$ соответствует условно оптимальная УП-ПВА на $(n+1)$ -м, $(n+2)$ -м, ..., N -м интервалах

$$Q_{n+1}^*(q_{i(n)}) = \{q_{n+1}^*(q_{i(n)}); q_{n+2}^*(q_{i(n)}); \dots; q_N^*(q_{i(n)})\}.$$

Подобные вычисления производятся для всех $q_{i(n)} \in \Omega_n$.

Таким образом, в результате выполнения рассматриваемого шага оптимизации для каждого $q_{i(n)} \in \Omega_n$ имеются условно оптимальная УП-ПВА на $(n+1)$ -м, $(n+2)$ -м, ..., N -м интервалах $Q_{n+1}^*(q_{i(n)})$ и соответствующие ей условно минимальные суммарные затраты $S_{n+1}^*(q_{i(n)})$ на опоры $O_{n+1}, O_{n+2}, \dots, O_{N+1}$.

Последний шаг, на котором рассматривается вся РРЛ. Рассуждая аналогичным образом, найдем для каждого $q_{i(1)} \in \Omega_1$ условно оптимальную УП-ПВА на 2-м, 3-м, ..., N -м интервалах $Q_2^*(q_{i(1)})$ и соответствующие условно минимальные суммарные затраты $S_2^*(q_{i(1)})$ на опоры O_2, O_3, \dots, O_{N+1} .

Безусловно оптимальная УП-ПВА для всех интервалов рассматриваемой РРЛ $Q^* = \{q_1^*; q_2^*; \dots; q_N^*\}$ определяется из условия:

$$S(Q^*) = \min_{q_{i(1)} \in \Omega_1} [s_1(q_{i(1)}) + S_2^*(q_{i(1)})].$$

Схема рассмотренного алгоритма нахождения оптимальной УП-ПВА на многоинтервальной РРЛ изображена на рис. 3.2.

Оценим объем вычислений при использовании рассматриваемого алгоритма оптимизации на основе динамического программирования.

Очевидно, в данном случае общее число вычислений значений целевой функции

$$W_{\text{дп}} = \sum_{n=1}^{N-1} M_n \cdot M_{n+1}, \quad (3.10)$$

причем верхняя граница $W_{\text{дп}}$

$$\text{sup} W_{\text{дп}} = (N - 1)M^2. \quad (3.11)$$

Из (3.6), (3.7) и (3.10), (3.11) видно, что по сравнению с простым перебором использование динамического программирования для решения задачи оптимизации выбора высот антенн на многоинтервальных РРЛ позволяет получить огромный выигрыш в объеме необходимых вычислений, причем этот выигрыш быстро возрастает с увеличением числа интервалов на РРЛ. Например, для РРЛ протяженностью 900 км, содержащей 30 интервалов, и $M = 10$ $supW_{\text{дп}} = 2900$ (при простом переборе $supW_{\text{дп}} = 10^{30}$).

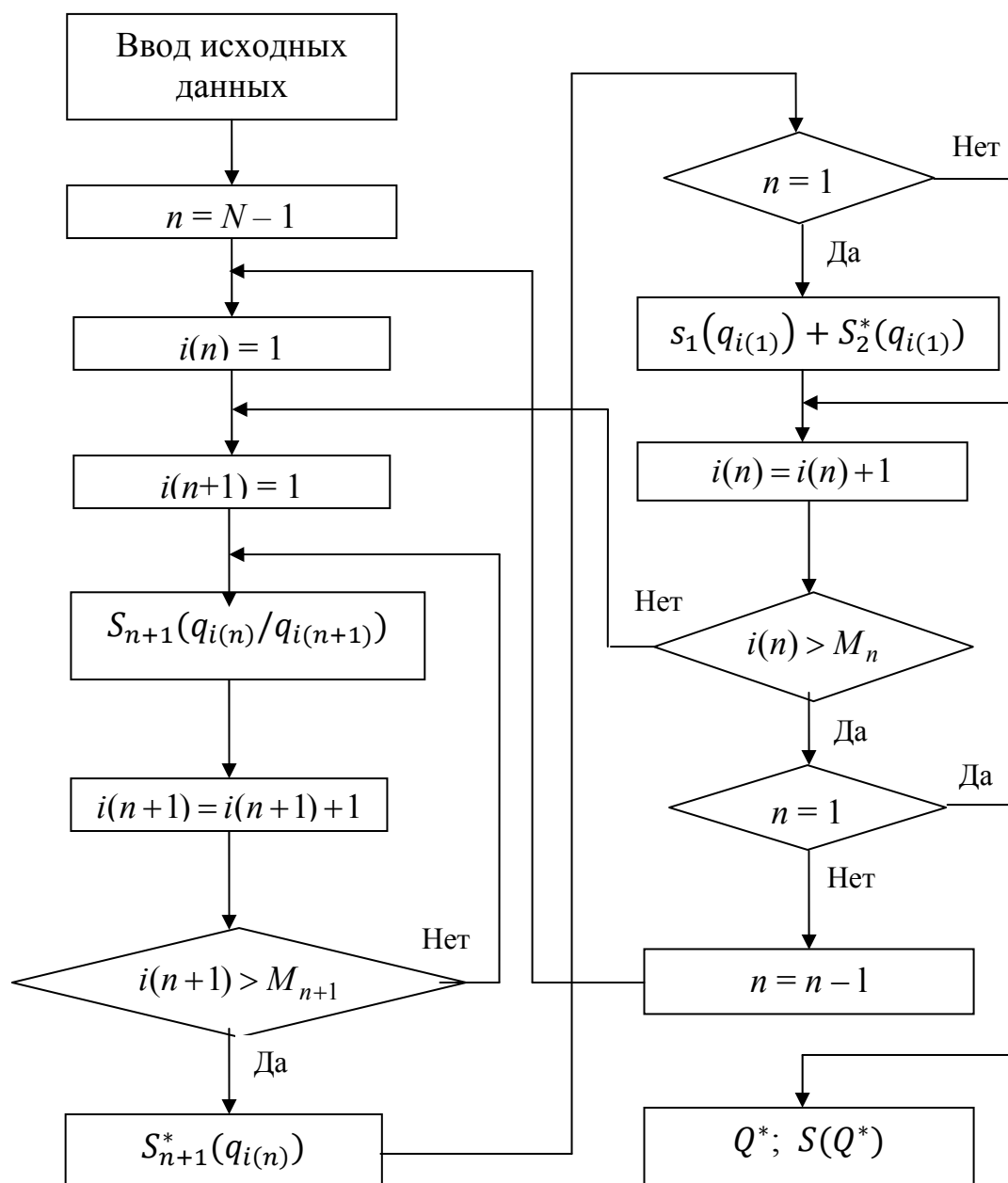


Рис. 3.2. Схема алгоритма выбора оптимальной УП-ПВА на основе метода динамического программирования

4. МНОГОВАРИАНТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫСОТ АНТЕНН НА МНОГОИНТЕРВАЛЬНЫХ РРЛ

4.1. Постановка и математическая модель задачи многовариантной оптимизации высот антенн на многоинтервальной РРЛ

Рассмотренная в разд. 3 задача оптимизации высот антенн на многоинтервальных РРЛ связана с нахождением единственного – оптимального в принятом смысле решения. Реальные задачи оптимизации высот антенн часто содержат дополнительные неформальные или трудноформализуемые ограничения, которые во многих случаях даже не известны на этапе проектирования многоинтервальных РРЛ. Чаще всего причинами указанных дополнительных ограничений являются проблема электромагнитной совместимости с существующими в регионе радиотехническими средствами и конструктивные особенности используемых антенных опор. Например, может существовать запрет на использование больших высот антенн, обусловленный созданием помех другим радиотехническим системам (в том числе системам радиосвязи) и высоким уровнем помех от этих радиосистем из-за недостаточного ослабления радиоволн на трассах распространения мешающих сигналов.

В таких условиях наряду с оптимальным решением рассматриваемой задачи выбора высот антенн желательно иметь еще несколько лучших ранжированных ее решений с тем, чтобы на завершающем этапе путем поочередной проверки можно было выбрать наилучший вариант решения с учетом всех дополнительных ограничений, не вошедших в математическую модель задачи оптимизации.

В данном разделе рассматривается задача многовариантной оптимизации высот антенн на многоинтервальной РРЛ, предусматривающая нахождение заданного числа лучших ранжированных УП-ПВА, которым соответствуют условно минимальные суммарные затраты на все антенные опоры при условии выполнения существующих критериев допустимости пар высот антенн на отдельных интервалах, т. е. решение задачи оптимизации производится на основе принципа минимума затрат [14]. Как и в разд. 3, при решении данной задачи будем считать, что заданы места расположения радиорелейных станций, характеристики радиорелейного оборудования и направленности антенн, а высоты антенных опор определяются высотами подвеса на них верхних антенн.

Введем следующие обозначения:

K – заданное число отыскиваемых лучших решений задачи;

q_n – возможная пара высот антенн (ПВА) на интервале n , $n = \overline{1, N}$;

ω_n – дискретное множество возможных ПВА на интервале n , $q_n \in \omega_n$;

$Q = \{q_1, q_2, \dots, q_N\}$ – упорядоченная последовательность ПВА на всей РРЛ (УП-ПВА);

$\Omega(Q)$ – дискретное множество возможных УП-ПВА на всей РРЛ, $Q \in \Omega(Q)$;

$q_{i(n)}$ – $i(n)$ -я нехудшая допустимая ПВА на n -м интервале, удовлетворяющая условиям (3.3), (3.5) или (3.4), (3.5);

Ω_n – дискретное множество нехудших допустимых ПВА на интервале n , $q_{i(n)} \in \Omega_n$;

M_n – число элементов множества Ω_n ;

$Q^{(k)*} = \{q_{i(1)}^{(k)*}, q_{i(2)}^{(k)*}, \dots, q_{i(N)}^{(k)*}\}$ – k -я лучшая ранжированная УП-ПВА, $k = \overline{1, K}$;

$q_{i(n)}^{(k)*}$ – ПВА на интервале n , входящая в состав k -й лучшей УП-ПВА;

$s_n(q_{n-1}, q_n)$ – затраты на n -ю опору, зависящие от ПВА на $(n-1)$ -м и n -м интервалах, $n = \overline{2, N}$;

$s_1(q_1)$ и $s_{N+1}(q_N)$ – соответственно затраты на 1-ю и $(N+1)$ -ю опоры, зависящие от ПВА q_1 и q_N ;

$S(Q^{(k)})$ – суммарные затраты на все опоры, соответствующие УП-ПВА $Q^{(k)}$.

Будем считать, что при $k_1 < k_2$ $Q^{(k_1)}$ не хуже $Q^{(k_2)}$, т. е. $S(Q^{(k_1)}) \leq S(Q^{(k_2)})$.

С учетом введенных обозначений математическая модель рассматриваемой задачи многовариантной оптимизации высот антенн может быть записана следующим образом: найти такие $Q^{(k)*} = \{q_{i(1)}^{(k)*}, q_{i(2)}^{(k)*}, \dots, q_{i(N)}^{(k)*}\}$, $k = \overline{1, K}$, для которых

$$S(Q^{(k)*}) = \min_{\Omega^{(k)}(Q)} [s_1(q_1) + s_{N+1}(q_N) + \sum_{n=2}^N s_n(q_{n-1}, q_n)] \quad (4.1)$$

при условиях:

$$q_{i(n)}^{(k)*} \in \Omega_n, n = \overline{1, N}; \quad (4.2)$$

$$\Omega^{(1)}(Q) = \Omega(Q); Q^{(k)}(Q) = \Omega(Q) \setminus \Omega^{(k-1)*}(Q), k = \overline{2, K}. \quad (4.3)$$

В математической модели (4.1) – (4.3):

$\Omega^{(k)}(Q)$ – подмножество множества $\Omega(Q)$, на котором отыскивается k -е лучшее решение;

$\Omega^{(k-1)*}(Q)$ – множество, элементами которого являются $(k-1)$ ранжированных лучших УП-ПВА $Q^{(1)*}, Q^{(2)*}, \dots, Q^{(k-1)*}$.

4.2. Алгоритм решения задачи многовариантной оптимизации высот антенн на многоинтервальной РРЛ

Решение задачи (4.1) – (4.3) целесообразно осуществлять в 2 этапа.

Аналогично разд. 3 на первом этапе для каждого интервала из множества ω_n формируется дискретное множество нехудших допустимых ПВА Ω_n , и определяются таблицы затрат на опоры.

На втором этапе решается собственно задача многовариантной оптимизации, предусматривающая минимизацию целевой функции (4.1). При этом рассматриваются только элементы множеств Ω_n , $n = \overline{1, N}$.

С учетом сепарабельности целевой функции (4.1) и ограничений (4.2) для решения рассматриваемой задачи целесообразно использовать метод многовариантного динамического программирования (МВДП) [11]. Указанный метод обеспечивает большой выигрыш в объеме вычисления в сравнении с методом прямого перебора вариантов решения и потому может быть использован для оптимизации выбора высот антенн на РРЛ с любым числом интервалов и большой вариантностью ПВА на интервалах.

Как и использованный в разд. 3 алгоритм одновариантной оптимизации, алгоритм многовариантной оптимизации на основе метода динамического программирования имеет многошаговый характер, причем процесс условной оптимизации участков РРЛ на отдельных шагах также удобно выполнять в обратном порядке, т. е. справа-налево.

Первый шаг. Рассматривается 2-интервальный участок, содержащий $(N-1)$ -й и N -й интервалы (рис. 3.1), т. е. рассматриваются пары $Q_{N-1,2} = \{q_{i(N-1)}; q_{i(N)}\}$, образующие множество $\Omega_{N-1,2}$.

Для каждой пары $Q_{N-1,2}$ вычисляются суммарные затраты на опоры O_N и O_{N+1} :

$$S_N(q_{i(N-1)}/q_{i(N)}) = s_N(q_{i(N-1)}; q_{i(N)}) + s_{N+1}(q_{i(N)}). \quad (4.4)$$

После этого для каждого $q_{i(N-1)}$ определяются $K_N \leq K$ условно лучших ранжированных ПВА $q_N^{(k_N)^*}(q_{i(N-1)})$, которым соответствуют условно наименьшие суммарные затраты на опоры O_N и O_{N+1} :

$$\begin{aligned} S_N^{(k_N)^*}(q_{i(N-1)}) &= \min_{\Omega_N^{(k_N)}} S_N(q_{i(N-1)}/q_{i(N)}) = \\ &= s_N[q_{i(N-1)}; q_N^{(k_N)^*}(q_{i(N-1)})] + s_{N+1}[q_N^{(k_N)^*}(q_{i(N-1)})], \end{aligned}$$

где $\Omega_N^{(k_N)}$ – подмножество множества Ω_N , на котором отыскивается k_N -я условно лучшая ПВА $q_N^{(k_N)^*}(q_{i(N-1)})$, $\Omega_N^{(1)} = \Omega_N$; $\Omega_N^{(k_N)} = \Omega_N \setminus \Omega_N^{(k_N-1)^*}$, $k_N = \overline{2, K_N}$;

$\Omega_N^{(k_N-1)^*}$ – множество (k_{N-1}) условно лучших ПВА на интервале N .

Отметим, что K_N полагается равным K в том случае, если $K_N > K$, а ранжирование ПВА выполняется в порядке возрастания соответствующих затрат, т. е. наименьшее значение затрат соответствует первой ПВА.

Таким образом, в результате выполнения первого шага условной оптимизации для каждого $q_{i(N-1)}$ найдены $K_N \leq K$ условно лучших ранжированных ПВА $q_N^{(k_N)^*}(q_{i(N-1)})$, которым соответствуют условно наименьшие суммарные затраты на опоры O_N и O_{N+1} .

Произвольный шаг. На данном шаге рассматривается участок РРЛ, содержащий интервалы $n, (n+1), \dots, N$.

Пусть в результате предшествующего шага условной оптимизации, на котором рассматривался участок, содержащий интервалы: $(n + 1)$, $(n + 2)$, \dots , N , для каждого $q_{i(n+1)}$ имеются множества из $K_{n+2} \leq K$ условно лучших УП-ПВА на $(n + 2)$ -м, $(n + 3)$ -м, \dots , N -м интервалах:

$$Q_{n+2}^{(k_{n+2})^*}(q_{i(n+1)}) = \{q_{n+2}^{(k_{n+2})^*}(q_{i(n+1)}); q_{n+3}^{(k_{n+2})^*}(q_{i(n+1)}); \dots; q_N^{(k_{n+2})^*}(q_{i(n+1)})\},$$

$k_{n+2} = \overline{1, K_{n+2}}$ и соответствующих условно минимальных суммарных затрат $S_{n+2}^{(k_{n+2})^*}(q_{i(n+1)})$ на опоры O_{n+2} ; O_{n+3} ; \dots ; O_{N+1} .

Предположим теперь, что фиксирована допустимая ПВА на n -м интервале $q_{i(n)}$. Выберем некоторую ПВА на $(n + 1)$ -м интервале $q_{i(n+1)}$ и для всех K_{n+2} условно лучших УП-ПВА $Q_{n+2}^{(k_{n+2})^*}(q_{i(n+1)})$, $k_{n+2} = \overline{1, K_{n+2}}$, найдем суммарные затраты, относящиеся к опорам O_{n+1} ; O_{n+2} ; \dots ; O_{N+1} :

$$S_{n+1}^{(k_{n+2})^*}(q_{i(n)}/q_{i(n+1)}) = s_{n+1}(q_{i(n)}; q_{i(n+1)}) + S_{n+2}^{(k_{n+2})^*}(q_{i(n+1)}).$$

Указанные затраты относятся к УП-ПВА $Q_{n+1}^{(k_{n+2})^*}(q_{i(n)}/q_{i(n+1)}) = \{q_{i(n)}; q_{i(n+1)}; Q_{n+2}^{(k_{n+2})^*}(q_{i(n+1)})\}$, содержащим интервалы $(n + 1)$, $(n + 2)$, \dots , N .

Аналогичным образом при том же фиксированном $q_{i(n)}$ формируются УП-ПВА для других $q_{i(n+1)} \in \Omega_{n+1}$ и определяются соответствующие суммарные затраты на опоры O_{n+1} ; O_{n+2} ; \dots ; O_{N+1} . Очевидно, общее число таких УП-ПВА равно $M_{n+1} \cdot K_{n+2}$.

В процессе вычисления $S_{n+1}^{(k_{n+2})^*}(q_{i(n)}/q_{i(n+1)})$ для разных $q_{i(n+1)}$ и k_{n+2} выбираются $K_{n+1} \leq K$ условно лучших ранжированных УП-ПВА $Q_{n+1}^{(k_{n+1})^*}(q_{i(n)})$, которым соответствуют условно минимальные суммарные затраты на опоры O_{n+1} ; O_{n+2} ; \dots ; O_{N+1} :

$$S_{n+1}^{(k_{n+1})^*}(q_{i(n)}) = \min_{\Phi_{n+1}^{(k_{n+1})}} S_{n+1}^{(k_{n+2})^*}(q_{i(n)}/q_{i(n+1)}),$$

где $\Phi_{n+1}^{(k_{n+1})}$ – множество пар $(q_{i(n+1)}; k_{n+2})$, на котором определяется k_{n+1} -я ранжированная условно лучшая УП-ПВА, при этом

$$\Phi_{n+1}^{(1)} = \Phi_{n+1}; \quad \Phi_{n+1}^{(k_{n+1})} = \Phi_{n+1} \setminus \Phi_{n+1}^{(k_{n+1}-1)^*}, \quad k_{n+1} > 1. \quad (4.5)$$

В (4.5) Φ_{n+1} – множество всех возможных пар $(q_{i(n+1)}; k_{n+2})$; $\Phi_{n+1}^{(k_{n+1}-1)^*}$ – множество пар $(q_{i(n+1)}; k_{n+2})$, соответствующих $(k_{n+1} - 1)$ условно лучшим УП-ПВА $Q_{n+1}^{(1)^*}(q_{i(n)})$, \dots , $Q_{n+1}^{(k_{n+1}-1)^*}(q_{i(n)})$.

Подобным образом осуществляется условная оптимизация для других $q_{i(n)}$, т. е. выполняется цикл по всем допустимым $q_{i(n)} \in \Omega_n$.

Следует отметить постоянство величины $M_{n+1} \cdot K_{n+2}$ для всех $q_{i(n)}$.

Таким образом, в результате выполнения рассмотренного произвольного шага условной многовариантной оптимизации для каждого $q_{i(n)}$ имеются множества из $K_{n+1} \leq K$ условно лучших УП-ПВА на $(n + 1)$ -м, $(n + 2)$ -м, ..., N -м интервалах:

$$Q_{n+1}^{(k_{n+1})^*}(q_{i(n)}) = \{q_{n+1}^{(k_{n+1})^*}(q_{i(n)}); q_{n+2}^{(k_{n+1})^*}(q_{i(n)}); \dots; q_N^{(k_{n+1})^*}(q_{i(n)})\},$$

$k_{n+1} = \overline{1, K_{n+1}}$ и соответствующих условно минимальных суммарных затрат $S_{n+1}^{(k_{n+1})^*}(q_{i(n)})$ на опоры $O_{n+1}; O_{n+2}; \dots; O_{N+1}$.

Аналогично выполняются другие шаги условной оптимизации ПВА.

Последний шаг, на котором рассматривается вся РРЛ.

Вначале для каждого $q_{i(1)} \in \Omega_1$ выбираем $q_{i(2)} \in \Omega_2$ и для всех K_3 условно лучших УП-ПВА $Q_3^{(k_3)^*}(q_{i(2)})$, $k_3 = \overline{1, K_3}$ определяем суммарные затраты на все опоры $O_1; O_2; \dots; O_{N+1}$:

$$S_1^{(k_3)}(q_{i(1)}/q_{i(2)}) = [s_1(q_{i(1)}) + s_2(q_{i(1)}; q_{i(2)}) + S_3^{(k_3)^*}(q_{i(2)})]. \quad (4.6)$$

Безусловно оптимальная УП-ПВА для всех интервалов рассматриваемой РРЛ $Q^{(1)*}, Q^{(2)*}, \dots, Q^{(k-1)*}$ определяется в результате минимизации (4.6) на множестве $\Phi_2^{(k_2)}$ пар $(q_{i(2)}; k_3)$ и множестве Ω_1 :

$$\begin{aligned} S(Q^{(k)*}) &= \\ &= \min_{q_{i(1)} \in \Omega_1} \min_{\Phi_2^{(k_2)}} [s_2(q_{i(1)}; q_{i(2)}) + S_3^{(k_3)^*}(q_{i(2)}) + s_1(q_{i(1)})] \end{aligned} \quad (4.7)$$

Объем вычислений при многовариантной оптимизации построения многоинтервальных ЦРРЛ с использованием метода МВДП определяется числом вычислений текущих значений целевой функции и числом сравнений этих значений при их ранжировании и отборе заданного числа наименьших значений.

Верхняя граница общего числа вычислений текущих значений целевой функции определяется выражением:

$$\sup V_{\text{вцф}} \approx K \cdot M^2(N - 2), \quad (4.8)$$

где M – максимальное число рассматриваемых вариантов ПВА на интервале,

$$M = \max_n M_n.$$

Нетрудно убедиться, что при $K \gg 1$ и $J \gg 1$ верхняя граница числа сравнений текущих значений целевой функции

$$\sup V_{\text{сцф}} \approx K^2 \cdot J^2(N - 2). \quad (4.9)$$

Как видно из выражений (4.8) и (4.9), увеличение объема вычислений с увеличением числа отыскиваемых ранжированных лучших решений при многовариантной оптимизации в наибольшей степени связано со сравнением текущих значений целевой функции при их ранжировании. При этом верхняя граница числа сравнений текущих значений целевой функции растет примерно пропорционально квадрату числа отыскиваемых лучших ранжированных решений, что можно рассматривать как «плату» за многовариантность оптимизации выбора высот антенн на многоинтервальной РРЛ.

При решении задач многовариантной оптимизации методом простого перебора верхняя граница общего числа вычислений значений целевой функции

$$\sup V_{\text{вцф}} = J^N, \quad (4.10)$$

а верхняя граница общего числа сравнений значений целевой функции при их ранжировании

$$\sup V_{\text{сцф}} \approx K \cdot J^N. \quad (4.11)$$

Сравнение (4.8) и (4.10), с одной стороны, (4.9) и (4.11) – с другой стороны, позволяет сделать вывод о том, что при решении задачи многовариантной оптимизации высот антенн на многоинтервальной РРЛ использование метода МВДП обеспечивает большой выигрыш в объеме вычислений в сравнении с методом простого перебора, причем указанный выигрыш быстро возрастает с увеличением числа интервалов на РРЛ.

Таким образом, применение метода МВДП позволяет находить достаточно большое число ранжированных лучших решений при проектировании РРЛ практически любой протяженности в условиях большой вариантности изменяемых характеристик интервалов.

5. МНОГОВАРИАНТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МОЩНОСТЕЙ ПЕРЕДАТЧИКОВ НА ИНТЕРВАЛАХ ЦИФРОВЫХ РРЛ С ДВУХЧАСТОТНЫМИ ПЛАНАМИ

Известно, что наибольшая эффективность использования частотного ресурса на трассах многоинтервальных РРЛ с линейной топологией достигается в случае двухчастотных планов распределения частот радиоканалов [5]. При этом необходимо учитывать влияние внутрисистемных помех от сигналов обратного направления (СОН) и помех узлообразования (при наличии ответвлений от линейной трассы РРЛ) [13, 15]. Эффективным способом борьбы с указанными помехами является оптимизация выбора мощностей передатчиков на интервалах.

В практике проектирования реальных РРЛ часто имеют место дополнительные неформальные или трудноформализуемые ограничения, которые во многих случаях не известны на этапе проектирования РРЛ. Как ука-

зывалось ранее, одной из основных причин таких дополнительных ограничений является проблема электромагнитной совместимости с существующими в регионе радиотехническими средствами. Например, использование больших мощностей передатчиков и компактных антенн с малым усилением является причиной создаваемых и принимаемых помех в широком диапазоне направлений излучения и приема радиоволн, что в некоторых случаях может оказаться неприемлемым. В этих условиях наряду с оптимальным решением задачи выбора мощностей передатчиков на интервалах РРЛ желательно иметь еще несколько лучших ранжированных ее решений с тем, чтобы на завершающем этапе путем поочередной проверки можно было выбрать наилучший вариант решения с учетом всех дополнительных ограничений, не вошедших в математическую модель задачи оптимизации.

Ниже рассматривается задача нахождения заданного числа ранжированных лучших решений при оптимизации выбора мощностей передатчиков (МП) на многоинтервальных цифровых РРЛ с двухчастотными планами [16]. При этом учтены влияние внутрисистемных помех и существующие требования к обоим нормируемым показателям качества передачи информации: показателю качества по ошибкам для сильно пораженных секунд (SESR) и показателю неготовности (UAR).

5.1. Математическая модель задачи многовариантной оптимизации мощностей передатчиков

Введем следующие обозначения:

K – заданное число отыскиваемых лучших решений задачи;

N – число интервалов на РРЛ;

T_n – МП на интервале n , $n = \overline{1, N}$;

$X = \{T_1, T_2, \dots, T_N\}$ – упорядоченная последовательность МП (УП-МП) на интервалах РРЛ;

$\Omega(X)$ – дискретное множество всех возможных УП-МП на РРЛ;

$X^{(k)} = \{T_1^{(k)}, T_2^{(k)}, \dots, T_N^{(k)}\}$ – УП-МП, соответствующая k -му ранжированному лучшему решению задачи;

$T_n^{(k)}$ – МП на интервале n , входящая в состав УП-МП $X^{(k)}$;

$\Omega^{(k)}(X)$ – множество УП-МП, на котором определяется k -е ранжированное лучшее решение;

$\Omega^{(k)*}(X)$ – множество УП-МП, состоящее из k лучших решений;

$T_{nmin}(T_{n-1}^{(k)}, T_{n+1}^{(k)})$ – минимальное значение МП на интервале n , учитывающее требования к показателям качества передачи на данном интервале и влияние внутрисистемных помех от соседних интервалов;

$T_{1min}(T_2^{(k)})$ и $T_{Nmin}(T_{N-1}^{(k)})$ – минимальные значения МП на крайних интервалах: первом и последнем.

С учетом введенных обозначений математическую модель рассматриваемой задачи оптимизации выбора МП можно записать так: требуется найти такие УП-МП $X^{(k)} = \{T_1^{(k)}, T_2^{(k)}, \dots, T_N^{(k)}\}$, $k = \overline{1, K}$, для которых средняя МП

$$C(X^{(k)}) = \min_{\Omega^{(k)}(X)} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N T_n(X) \quad (5.1)$$

при условиях:

$$T_n^{(k)} \geq T_{nmin} (T_{n-1}^{(k)}, T_{n+1}^{(k)}); n = \overline{2, (N-1)}, \quad (5.2)$$

$$T_1^{(k)} \geq T_{1min} (T_2^{(k)}); T_N^{(k)} \geq T_{Nmin} (T_{N-1}^{(k)}), \quad (5.3)$$

$$\Omega^{(1)}(X) = \Omega(X); \Omega^{(k)}(X) = \Omega(X) \setminus \Omega^{(k-1)*}(X), k = \overline{2, K}. \quad (5.4)$$

Минимальное значение МП на интервале n может быть представлено в виде суммы:

$$T_{nmin}(T_{n-1}^{(k)}, T_{n+1}^{(k)}) = T_{nmin} + \Delta M_n(T_{n-1}^{(k)}, T_{n+1}^{(k)}), \quad (5.5)$$

где T_{nmin} – минимальное значение МП на интервале n без учета СОН;
 $\Delta M_n(T_{n-1}^{(k)}, T_{n+1}^{(k)})$ – величина деградации запаса на замирания на интервале n из-за влияния внутрисистемных помех от соседних интервалов.

Величина T_{nmin} определяется требованиями к показателям качества передачи на интервале n , при этом

$$T_{nmin} = \max [T_{nmin}(SESR); T_{nmin}(UAR)], \quad (5.6)$$

где $T_{nmin}(SESR)$ – минимальное значение МП с точки зрения требования к показателю качества по ошибкам для сильно пораженных секунд (SESR);
 $T_{nmin}(UAR)$ – минимальное значение МП с точки зрения требования к показателю неготовности (UAR).

Величину $T_{nmin}(SESR)$ можно представить в виде суммы:

$$T_{nmin}(SESR) = \mathcal{E}_n + M_{nmin}(SESR), \quad (5.7)$$

где \mathcal{E}_n – параметр, зависящий от энергетических характеристик интервала, дБм,

$$\mathcal{E}_n = P_{n.пор} + L_{0n} + L_{n.доп} - G_{nl} - G_{nr},$$

$P_{n.пор}$ – пороговый уровень приемников на интервале n без учета СОН, дБм;

L_{0n} – потери свободного пространства на интервале n , дБ,

$$L_{0n} = 92.44 + 20 \lg f + 20 \lg R, \quad (5.8)$$

f – средняя частота используемого диапазона, ГГц;

R – длина интервала n , км;

$L_{n.доп}$ – дополнительные потери на интервале n (потери в газах, антенных разветвителях, волноводах и т. д.), дБ;

G_{nl} и G_{nr} – коэффициенты усиления левой и правой антенн на интервале n , дБ;

$M_{nmin}(SESR)$ – минимальный запас на замирания, зависящий от вида приема сигналов на интервале и требований к показателю $SESR$, дБ.

При одинарном приеме сигналов в соответствии с [17]

$$M_{nmin}(SESR) = 10 \lg \left[\frac{P_{0n}}{SESR_{nmax} - SESR_{sn}} \right], \quad (5.9)$$

где P_{0n} – параметр, характеризующий вероятность возникновения многолучевых замираний на интервале n ;

$SESR_{nmax}$ – максимально допустимое значение показателя $SESR$ на интервале n ;

$SESR_{sn}$ – показатель $SESR$, учитывающий влияние частотно-селективных замираний при одинарном приеме и не зависящий от энергетических характеристик интервала [17].

В случае разнесенного приема, полагая, что составляющая показателя $SESR$, учитывающая влияние частотно-селективных замираний, составляет примерно не более 20% от нормы на этот показатель, нетрудно получить следующее выражение для минимального запаса на замирания, дБ:

$$M_{n.min}(SESR) = 5 \cdot \lg \left(\frac{1,25 \cdot P_{0n}}{A_{dn} \cdot SESR_{n.max}} \right), \quad (5.10)$$

где A_{dn} – параметр, характеризующий выигрыш за счет разнесенного приема и зависящий от вида приема: частотно-разнесенный или пространственно-разнесенный прием [17].

С точки зрения требований к показателю неготовности минимальное значение МП $T_{nmin}(UAR)$ можно записать аналогично (5.7):

$$T_{nmin}(UAR) = \Xi_n + M_{nmin}(UAR), \quad (5.11)$$

где минимальный запас на замирания $M_{nmin}(UAR)$, зависящий от требований к показателю неготовности (UAR).

Полагая, что высоты подвеса антенн на интервале выбраны в соответствии с существующим критерием допустимости в условиях субрефракции радиоволн [12, 13], влиянием субрефракционных замираний на показатель неготовности можно пренебречь и считать, что составляющая показателя неготовности, учитывающая распространение радиоволн, определяется исключительно ослаблением в дождях.

В этом случае соответствующее минимальное значение запаса на замирания определяется выражением, дБ [17]:

$$M_{nmin}(UAR) = 0,12 \cdot L_{rn}(0,01\%) (\alpha_r UAR_{nmax})^{-[0,546 + 0,043 \lg(\alpha_r UAR_{nmax})]} \quad (5.12)$$

В (5.12) $L_{rn}(0,01\%)$ – ослабление в дождях на интервале n , превышаемое в 0,01% времени, дБ;

UAR_{nmax} – максимально допустимое значение показателя UAR на интервале n ; α_r – коэффициент, определяющий часть показателя неготовности, зависящую только от ослабления в дождях, $\alpha_r = 0,3 - 0,7$.

Нормируемые максимально допустимые значения показателей $SESR_{nmax}$ и UAR_{nmax} для интервала длиной R , км определяются выражениями [13]:

$$SESR_{nmax} = 0,89 \cdot SESR_H \cdot R/L_{эт}; \quad (5.13)$$

$$UAR_{nmax} = 0,3 \cdot UAR_H \cdot R/L_{эт}, \quad (5.14)$$

где $SESR_H$ и UAR_H – российские национальные нормы на показатели $SESR$ и UAR ; $L_{эт}$ – длина гипотетического эталонного цифрового тракта.

Значения указанных нормируемых показателей качества передачи для разных гипотетических эталонных цифровых трактов единой сети электро-связи России представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Нормируемые значения показателей качества передачи для цифровых РРЛ

Участок сети связи России	Длина тракта, км	Норма на показатель SESR, %	Норма на показатель неготовности, %	Распределение нормы для реальных линий
Международный участок	12500	0,06	1,5	Пропорционально L для $L \geq 2500$ км
Национальный участок				
Магистральная сеть	2500	0,012	0,3	Пропорционально L для $L \geq 50$ км
Внутризоновая сеть	600	0,012	0,05	Пропорционально L для $L > 600$ км
				Независимо от длины для $200 < L < 600$ км
	200	0,012	0,05	Пропорционально L для $50 < L < 200$ км
	50	0,003	0,0125	Независимо от длины для $L < 50$ км
Местная сеть	100	0,01	0,05	Независимо от длины для $L < 100$ км
Сеть доступа	–	0,015	0,05	Независимо от длины

L – длина рассматриваемой РРЛ, км.

Методика нахождения параметров P_{0n} , $SESR_{sn}$, $L_{rn}(0,01\%)$ и α_r , входящих в (5.9) и (5.12), содержится в [17].

Методика оценки величины деградации запаса на замирания на интервале n из-за влияния внутрисистемных помех от соседних интервалов описана в п. 5.2.

5.2. Оценка величины деградации запаса на замирания из-за влияния внутрисистемных помех

Влияние внутрисистемных помех различного происхождения на многоинтервальных РРЛ обусловлено использованием одних и тех же пар частот на разных интервалах. При оценке деградации запаса на замирания на трассах РРЛ с линейной топологией необходимо учитывать внутрисистемные помехи от сигналов обратного направления (СОН). В случае трасс РРЛ с ответвлениями кроме СОН следует учитывать помехи узлообразования.

В общем случае величина деградации запаса на замирания на n -м интервале из-за влияния помех от соседних интервалов $\Delta M_n(T_{n-1}, T_{n+1})$ определяется выражением, дБ [13, 15]:

$$\Delta M_n(T_{n-1}, T_{n+1}) = 10 \lg [1 + 10^{-0,1 \cdot (D_{n.\text{пор}} - D_{n.\text{пор.доп}})}], \quad (5.15)$$

где $D_{n.\text{пор}}$ – отношение пороговой мощности сигнала к суммарной средней мощности помех (пороговое отношение сигнал/помеха), дБ,

$$D_{n.\text{пор}} = P_{n.\text{пор}} - I_n; \quad (5.16)$$

$P_{n.\text{пор}}$ – пороговый уровень приемников на n -м интервале, дБм;

I_n – уровень суммарной средней мощности внутрисистемных помех на входе приемников n -го интервала, дБм;

$D_{n.\text{пор.доп}}$ – допустимое отношение сигнал/помеха, соответствующее величине деградации порога приемника 3 дБ.

Уровень суммарной средней мощности внутрисистемных помех на интервале зависит от топологии рассматриваемой РРЛ и конкретной помеховой обстановки. Поэтому влияние указанных помех по-разному проявляется для направлений передачи слева-направо и справа-налево. При этом расчет запаса на замирания на интервале необходимо выполнять для худшего направления передачи.

5.2.1. Оценка деградации запаса на замирания из-за влияния помех от сигналов обратного направления

При использовании двухчастотных планов на многоинтервальных линейных трассах РРЛ с достаточной зигзагообразностью основным видом внутрисистемных помех являются помехи от сигналов обратного направления (СОН). При этом различают 2 вида таких помех: помехи, обусловленные излучением антенн в обратном направлении (СОН 1-го вида), и помехи, обусловленные приемом сигналов с обратного направления (СОН 2-го вида). Влияние СОН обоих видов поясняется на рис. 5.1.

Из-за различия трасс распространения полезных сигналов и мешающих сигналов 2-го вида замирания указанных сигналов являются статистически независимыми. В то же время статистическая независимость полезных сигналов и мешающих сигналов 1-го вида имеет место лишь в случае различия

высот подвеса антенн, излучающих эти сигналы. При совпадении указанных высот антенн замириания соответствующих сигналов практически одинаковы. Учитывая, что коэффициент защитного действия реальных антенн всегда превышает 40 дБ, влиянием СОН 1-го вида в последнем случае можно пренебречь.

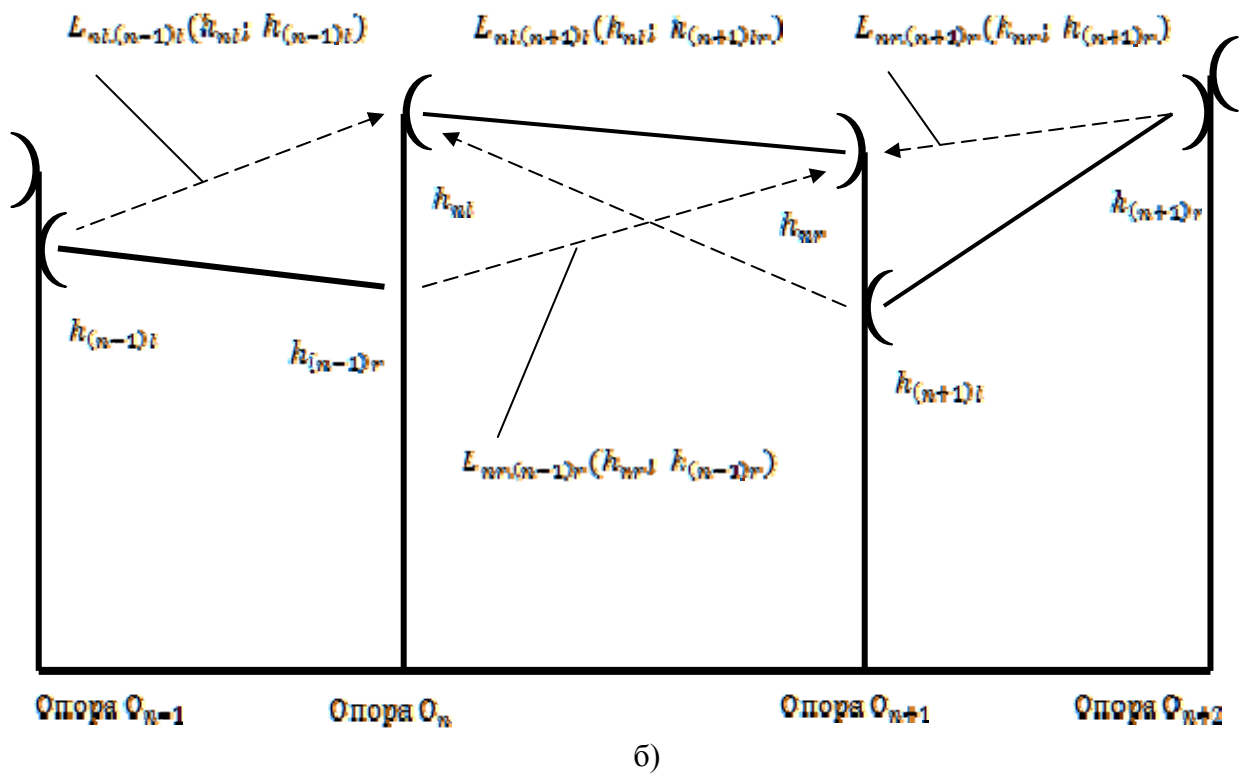
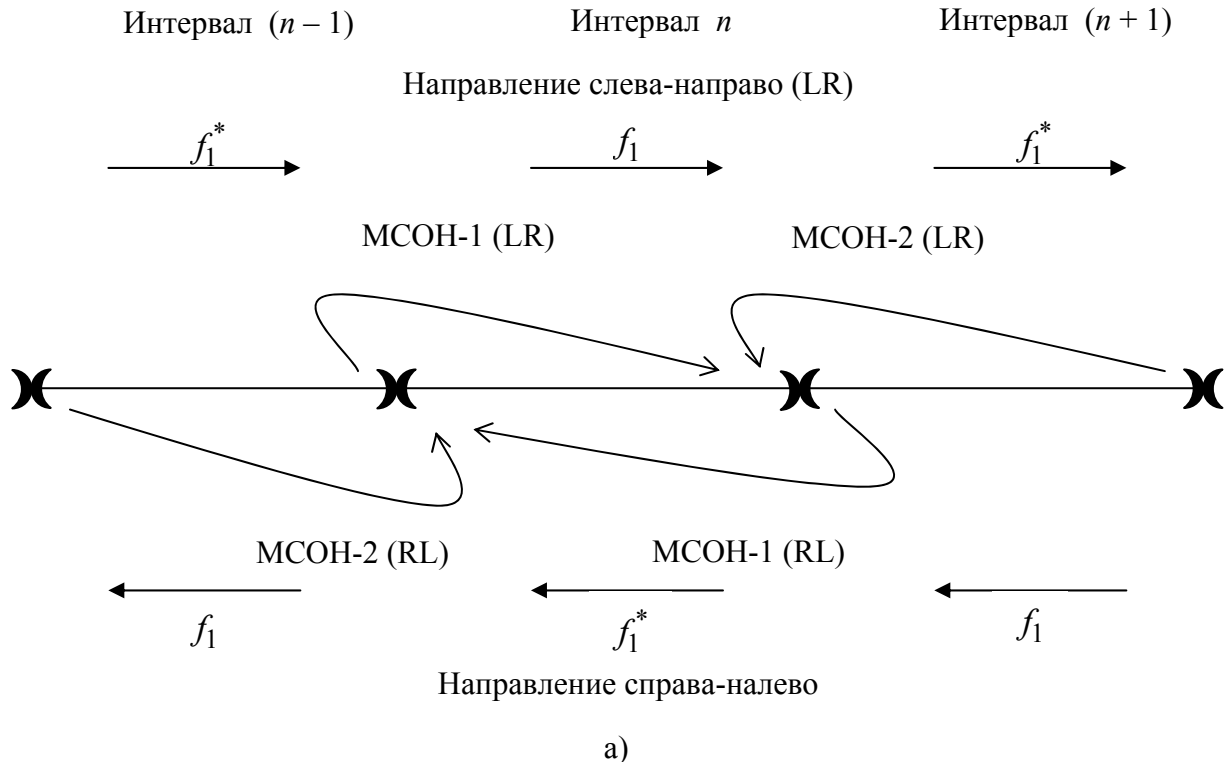


Рис. 5.1. Влияние помех от СОН 1-го и 2-го видов на интервале n

Средняя суммарная мощность помех на интервале n , дБм

$$I_n = \max(I_{n.l-r}; I_{n.r-l}), \quad (5.17)$$

где $I_{n.l-r}$ и $I_{n.r-l}$ – соответственно уровни суммарной средней мощности помех для направлений слева-направо и справа-налево, определяемые выражениями, дБм:

$$I_{n.l-r} = 10 \lg(10^{0,1 \cdot I_{nr.(n-1)r}} + 10^{0,1 \cdot I_{nr.(n+1)r}}), \quad (5.18)$$

$$I_{n.r-l} = 10 \lg(10^{0,1 \cdot I_{nl.(n+1)l}} + 10^{0,1 \cdot I_{nl.(n-1)l}}). \quad (5.19)$$

В (5.18) $I_{nr.(n-1)r}$ – средняя мощность помехи от сигнала обратного направления 1-го вида для направления слева-направо, дБм

$$I_{nr.(n-1)r} = T_{n-1} + G_{(n-1)r} + G_{nr} - B_{(n-1)r} - L_{0n} - L_{nr.(n-1)r}; \quad (5.20)$$

$I_{nr.(n+1)r}$ – средняя мощность помехи от сигнала обратного направления 2-го вида для направления слева-направо, дБм,

$$I_{nr.(n+1)r} = T_{n+1} + G_{(n+1)r} + G_{nr} - B_{nr} - L_{0(n+1)} - L_{nr.(n+1)r}. \quad (5.21)$$

В (5.19): $I_{nl.(n+1)l}$ – средняя мощность помехи от сигнала обратного направления 1-го вида для направления справа-налево, дБм,

$$I_{nl.(n+1)l} = T_{n+1} + G_{(n+1)l} + G_{nl} - B_{(n+1)l} - L_{0n} - L_{nl.(n+1)l}, \quad (5.22)$$

$I_{nl.(n-1)l}$ – средняя мощность помехи от сигнала обратного направления 2-го вида для направления справа-налево, дБм,

$$I_{nl.(n-1)l} = T_{n-1} + G_{(n-1)l} + G_{nl} - B_{nl} - L_{0(n-1)} - L_{nl.(n-1)l}. \quad (5.23)$$

В выражениях (5.20) – (5.23) использованы следующие обозначения:

T_{n-1} и T_{n+1} – соответственно мощности передатчиков на интервалах $(n-1)$ и $(n+1)$, дБм;

$G_{(n-1)l}$, $G_{(n-1)r}$ и $G_{(n+1)l}$, $G_{(n+1)r}$ – соответственно коэффициенты усиления антенн на левом и правом концах интервалов $(n-1)$ и $(n+1)$, дБ;

B_{nl} и B_{nr} – соответственно коэффициенты защитного действия левой и правой антенн на интервале n , дБ (аналогичные обозначения использованы для интервалов $(n-1)$ и $(n+1)$);

$L_{0(n-1)}$ и $L_{0(n+1)}$ – соответственно потери свободного пространства на интервалах $(n-1)$ и $(n+1)$, дБ;

$L_{nr.(n-1)r}$, $L_{nr.(n+1)r}$ и $L_{nl.(n+1)l}$, $L_{nl.(n-1)l}$ – дополнительные потери на трассах распространения помех от сигналов обратного направления для правых и левых антенн соседних интервалов, дБ; указанные дополнительные потери включают потери в антенно-волноводных трактах (АВТ), в том числе потери в антенных разветвителях, потери в газах тропосферы, а также возможные дифракционные потери на соответствующих трассах распространения мешающих сигналов.

В случае использования радиорелейного оборудования с автоматической регулировкой мощности передатчиков (АРМП) при вычислении мощностей помех $I_{nr.(n-1)r}$, $I_{nr.(n+1)r}$, $I_{nl.(n+1)l}$ и $I_{nl.(n-1)l}$ следует использовать значения мощностей передатчиков мешающих сигналов

$$T_{n-1} = T_{n+1} = T_n - \Delta T_{\text{армп}}, \quad (5.24)$$

где $\Delta T_{\text{армп}}$ – диапазон АРМП (приводится в списке параметров оборудования), дБ.

5.2.2. Оценка деградации запаса на замирания в условиях совместного влияния помех от сигналов обратного направления и узлообразования

В процессе реконструкции и развития существующих сетей РРЛ часто возникает задача построения ответвлений от существующих транспортных линий. При построении таких ответвлений необходимо обеспечить не только выполнение требований к качественным показателям на самом ответвлении, но и минимальное влияние этого ответвления на качество передачи информации на основной (существующей) РРЛ.

С целью исключения взаимного влияния на ответвлении и смежных интервалах основной РРЛ обычно используются разные частоты, т. е. построение ответвления требует использования дополнительных частот, что не всегда возможно из-за дефицита частотного ресурса. Поэтому во многих случаях на ответвлениях используются те же пары частот, что и на основной РРЛ, т. е. на РРЛ с ответвлениями используется единый двухчастотный план распределения частот.

Такая возможность существует в случае допустимого уровня помех на интервалах основной РРЛ, обусловленных совместным влиянием сигналов обратного направления и узлообразования (рис. 5.2 и 5.3). Влияние мешающих сигналов узлообразования зависит, прежде всего, от углов между ответвлением и смежными интервалами основной линии и диаграмм направленности используемых антенн. Кроме того, при этом необходимо учитывать соотношение длин указанных интервалов и ответвления, а также соответствующие мощности передатчиков, виды поляризации радиоволн, коэффициенты усиления и высоты подвеса антенн.

Деградация запаса на замирания при совместном воздействии мешающих сигналов обратного направления и узлообразования определяется выражениями (5.15) и (5.16). При этом средняя суммарная мощность помех от сигналов обратного направления и узлообразования на n -м интервале для направления слева-направо определяется выражением, дБм:

$$I_{n,l-r} = 10 \lg(10^{0,1 I_{nr.(n-1)r}} + 10^{0,1 I_{nr.(n+1)r}} + 10^{0,1 I_{nr.or}}). \quad (5.25)$$

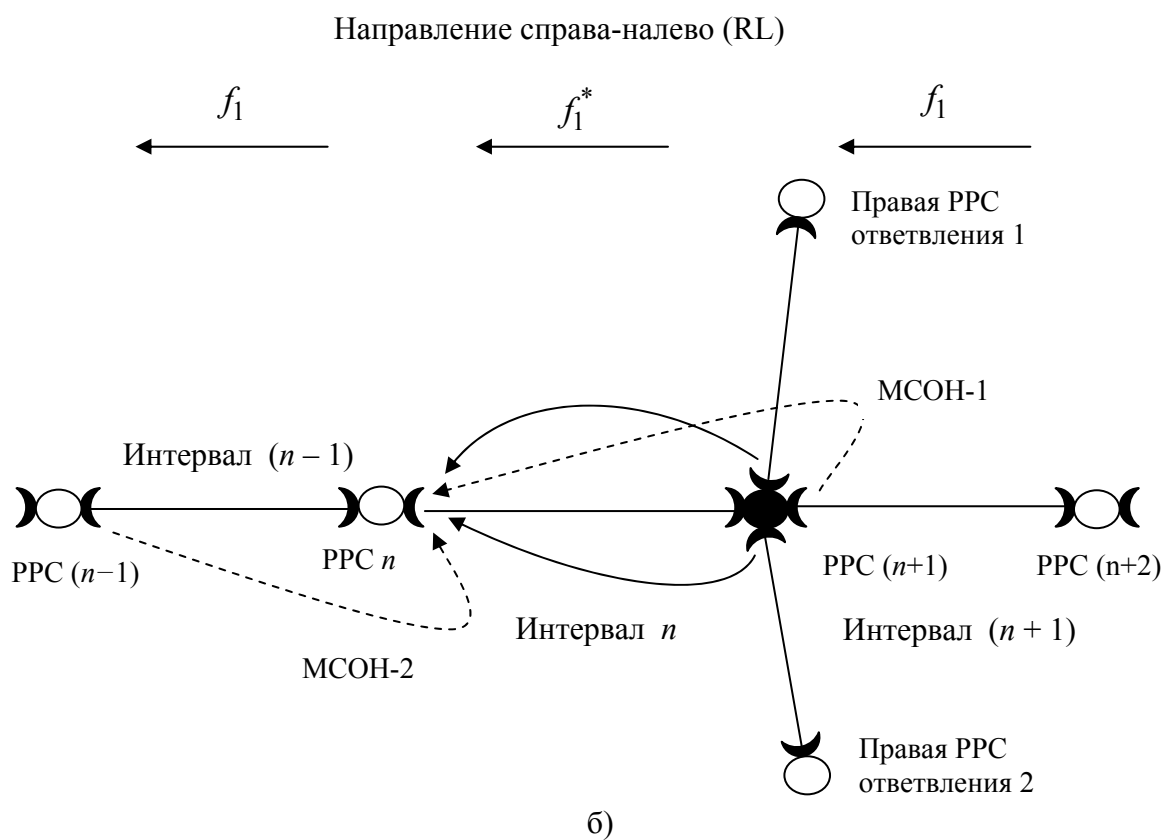
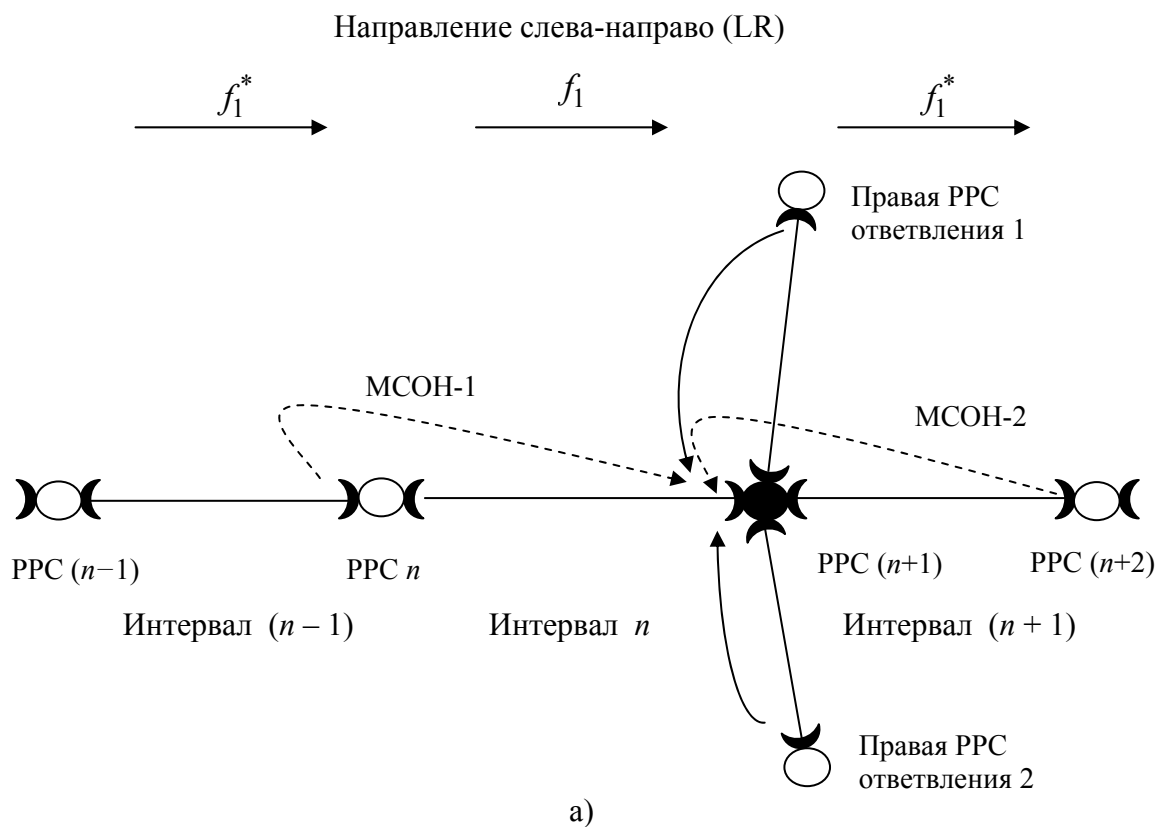


Рис. 5.2. Совместное влияние СОН и помех узлообразования на n -м интервале для двух направлений передачи:
а – слева-направо, б – справа-налево

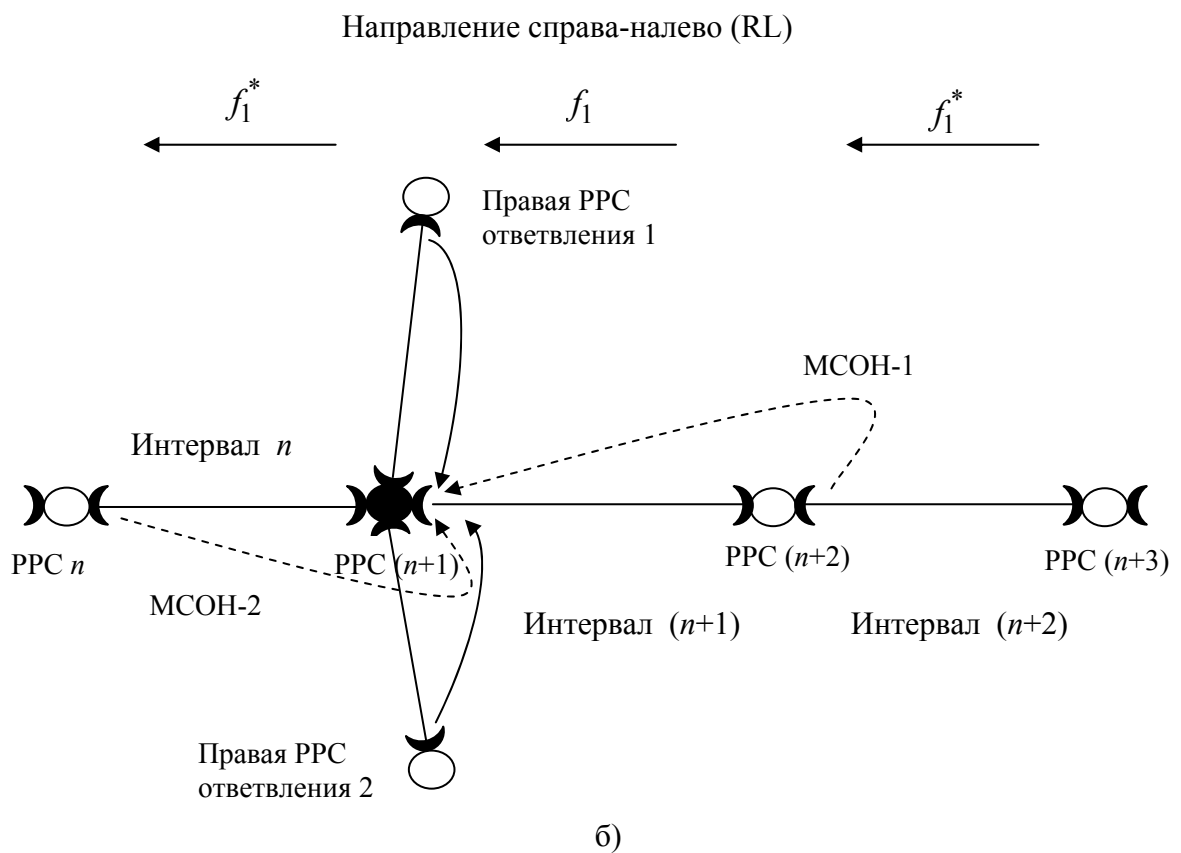
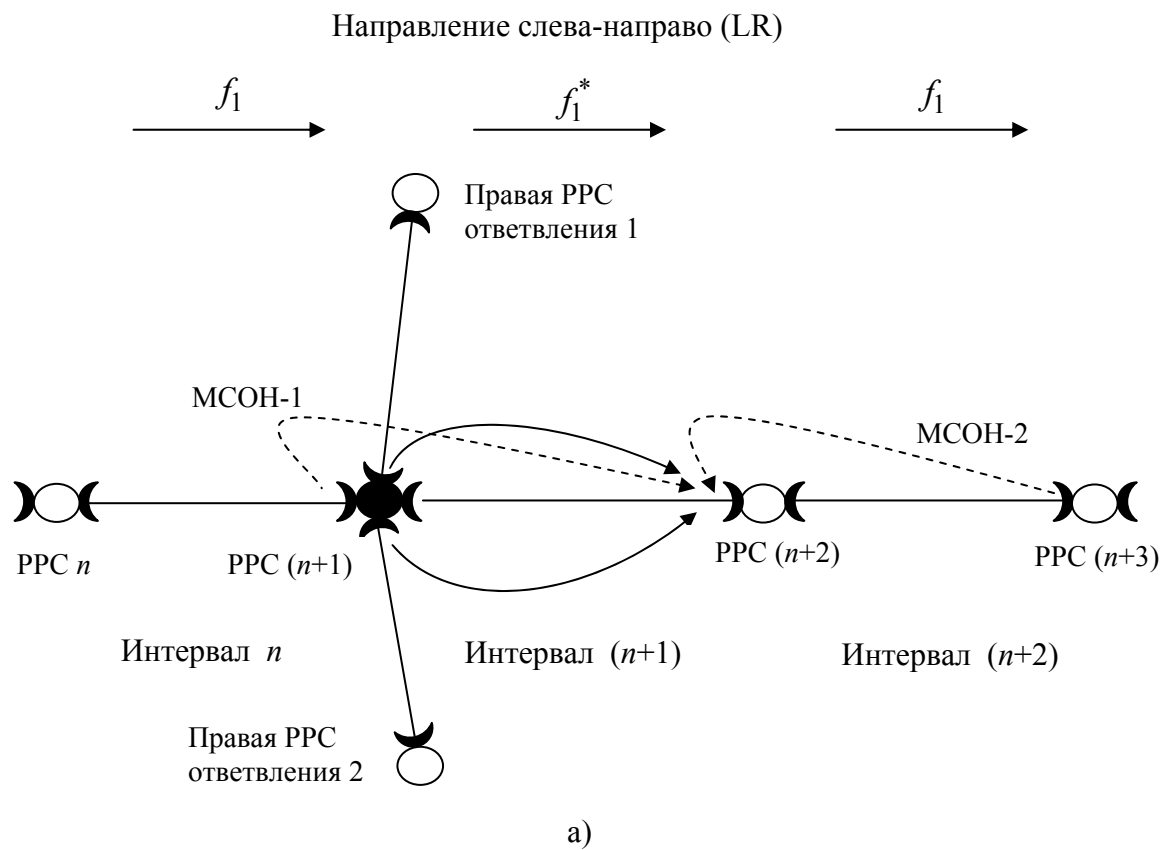


Рис. 5.3. Совместное влияние МСОН и помех узлообразования на $(n + 1)$ -м интервале для двух направлений передачи:
а – слева-направо, б – справа-налево

В (5.25): $I_{nr.(n-1)r}$ и $I_{nr.(n+1)r}$ – соответственно средние мощности помех от сигналов обратного направления 1-го и 2-го видов, определяемые (5.20) и (5.21), дБм;

$I_{nr.or}$ – средняя мощность помехи узлообразования от правой (удаленной) антенны ответвления, принимаемой правой антенной n -го интервала, дБм.

В случае, если на интервалах основной ЦРРЛ и ответвлении используется одинаковая поляризация радиоволн, $I_{nr.or}$ определяется выражением:

$$I_{nr.or} = T_0 + G_{or} + G_{nr} - E_{nr}(\alpha) - L_{00} - L_{nr.or}, \quad (5.26)$$

где T_0 – мощность передатчиков на ответвлении, дБм;

G_{or} – коэффициент усиления антенны на правом конце интервала n , дБ;

α – угол между направлениями n -го интервала и ответвления в точке расположения РРС ($n + 1$), град;

$E_{nr}(\alpha)$ – ослабление помехи от правой антенны ответвления, принимаемой правой антенной интервала n , за счет диаграммы направленности правой антенны интервала n , дБ;

L_{00} – потери свободного пространства на ответвлении, определяемые (5.8), при $R = R_{отв}$, дБ;

$L_{nr.or}$ – дополнительные потери на трассе распространения помехи от правой антенны ответвления, принимаемой правой антенной интервала n , дБ.

В случае применения разной поляризации на основной РРЛ и ответвлении каждая антенна может одновременно излучать и принимать радиоволны как с совпадающей, так и с ортогональной поляризациями.

Предположим, что на основной РРЛ используется вертикальная поляризация, а на ответвлении – горизонтальная.

Для направления передачи слева-направо на основной ЦРРЛ правая антенна на интервале n (находящаяся на ($n + 1$)-й РРС) принимает два мешающих сигнала, излучаемых удаленной антенной ответвления: с горизонтальной H и вертикальной V поляризацией.

Суммарная средняя мощность горизонтально и вертикально поляризованных помех от правой (удаленной) антенны ответвления, принимаемых правой антенной n -го интервала, дБм:

$$I_{nr.or} = 10 \lg(10^{0,1 \cdot I_{nr.or}(H;V/H)} + 10^{0,1 \cdot I_{nr.or}(H/V;V)}). \quad (5.27)$$

Входящие в (5.27) средние мощности горизонтально и вертикально поляризованных помех от правой (удаленной) антенны ответвления, принимаемых правой антенной n -го интервала, соответственно равны, дБм:

$$I_{nr.or}(H;V/H) = T_0 + G_{or} + G_{nr} - E_{nr}(V/H;\alpha) - L_{00} - L_{nr.or};$$

$$I_{nr.or}(H/V;V) = T_0 + G_{or} + G_{nr} - XPD_{or} - E_{nr}(V/V;\alpha) - L_{00} - L_{nr.or},$$

где $E_{nr}(V/H;\alpha)$ – ослабление горизонтально поляризованной помехи, принимаемой правой антенной n -го интервала, от правой (удаленной) антенны ответвления за счет диаграммы направленности вертикально поляризованной правой антенны интервала n , дБ;

XPD_{or} – величина ослабления сигнала с ортогональной поляризацией в направлении главного излучения для удаленной антенны ответвления (содержится в списке параметров антенны), дБ;

$E_{nr}(V/V;\alpha)$ – ослабление вертикально поляризованной помехи, принимаемой правой антенной n -го интервала, от правой (удаленной) антенны ответвления за счет диаграммы направленности вертикально поляризованной правой антенны интервала n , дБ.

В случае использования на ответвлении радиорелейного оборудования с автоматической регулировкой мощностей передатчиков (АРМП) при вычислении $I_{nr.or}$ вместо T_0 следует использовать $T_0 - \Delta T_{АРМП}$.

Аналогичным образом определяются средние суммарные мощности помех на рассматриваемом интервале для направления справа-налево.

5.3. Алгоритм решения задачи оптимизации мощностей передатчиков

Для уменьшения объема вычислений задачу оптимизации (5.1) – (5.4) следует решать в 2 этапа.

На первом этапе вначале в соответствии с (5.6), (5.7), (5.9) – (5.12) для каждого интервала определяется минимальное значение МП без учета ВСП $T_{n.min}$, после чего для дальнейшего использования формируются множества значений МП $w_n(X)$, $n = \overline{1, N}$, удовлетворяющих условию:

$$T_n \geq T_{n.min}, \quad n = \overline{1, N}. \quad (5.28)$$

Кроме этого для каждого интервала вычисляются дополнительные дифракционные потери для ВСП. Для СОН на n -м интервале это – потери между правыми антеннами на $(n - 1)$ -м и n -м интервалах, зависящие от высот антенн на этих интервалах, и потери между левыми антеннами на n -м и $(n + 1)$ -м интервалах, также зависящие от высот антенн на этих интервалах. Аналогично оцениваются потери для помех узлообразования.

На втором этапе решается собственно задача оптимизации МП на многоинтервальной РРЛ.

При небольшой размерности задача (5.1) – (5.4) может быть решена методом простого перебора вариантов решения. Однако в реальных условиях проектирования многоинтервальных РРЛ с большим числом интервалов метод простого перебора не применим из-за большого объема необходимых вычислений. Учитывая сепарабельный характер функций, входящих в условия (5.2) и (5.3), для решения рассматриваемой задачи многовариантной оптимизации целесообразно использовать многовариантный метод динамического программирования [11].

Ниже рассматривается алгоритм решения задачи (5.1) – (5.4) на основе многовариантного динамического программирования [16]. Рассматриваемый алгоритм предусматривает пошаговую условную оптимизацию МП на участках РРЛ возрастающей длины в направлении от ее конца к началу.

На первом шаге рассматривается участок РРЛ, содержащий $(N - 2)$, $(N - 1)$ и N -й интервалы.

Вначале для каждой пары $X_{N-1,2} = \{T_{N-1}; T_N\}$ вычисляется деградация запаса на замирания на N -м интервале $\Delta M_N(T_{N-1})$ и соответствующее минимальное значение МП:

$$T_{N.\min}(T_{N-1}) = T_{N.\min} + \Delta M_N(T_{N-1}).$$

Пары $X_{N-1,2}$, для которых выполняется условие

$$T_N \geq T_{N.\min}(T_{N-1}),$$

образуют множество $\Omega_{N-1,2}(X)$, в то время как остальные пары исключаются из дальнейшего рассмотрения.

Для каждого $X_{N-1,2} \in \Omega_{N-1,2}(X)$ формируются УП-МП $X_{N-2,3} = \{T_{N-2}; X_{N-1,2}\}$, для каждой из которых вычисляются деградация запаса на замирания на $(N-1)$ -м интервале $\Delta M_{N-1}(T_{N-2}; T_N)$ и соответствующее минимальное значение МП

$$T_{N-1.\min}(T_{N-2}; T_N) = T_{N-1.\min} + \Delta M_{N-1}(T_{N-2}; T_N).$$

УП-МП $X_{N-2,3}$, для которых выполняется условие

$$T_{N-1} \geq T_{N-1.\min}(T_{N-2}; T_N),$$

образуют множество $\Omega_{N-2,3}(X)$, остальные $X_{N-2,3}$ исключаются из дальнейшего рассмотрения.

Из УП-МП $X_{N-2,3} \in \Omega_{N-2,3}(X)$ формируются пары $X_{N-2,2} = \{T_{N-2}; T_{N-1}\}$, которые включаются в изначально пустое множество $\Omega_{N-2,2}(X)$. Каждому

$X_{N-2,2}$ соответствует множество условно допустимых МП на N -м интервале $T_N(X_{N-2,2})$. Обозначим эти множества $\Omega_N(X_{N-2,2})$ и на каждом из них найдем $K_N \leq K$ условно минимальных ранжированных значений МП на N -м интервале ($K_N < K$, если общее число элементов множества $\Omega_N(X_{N-2,2})$ меньше K):

$$T_N^{(k_N)^*}(X_{N-2,2}) = \min_{\Omega_N^{(k_N)}(X_{N-2,2})} T_N(X_{N-2,2}), k_N = \overline{1, K_N},$$

где $\Omega_N^{(k_N)}(X_{N-2,2})$ – подмножество множества $\Omega_N(X_{N-2,2})$, на котором отыскивается k -е условно минимальное ранжированное значение МП на N -м интервале:

$$\Omega_N^{(1)}(X_{N-2,2}) = \Omega_N(X_{N-2,2});$$

$$\Omega_N^{(k_N)}(X_{N-2,2}) = \Omega_N(X_{N-2,2}) \setminus \Omega_N^{(k_N-1)^*}(X_{N-2,2}), k_N = \overline{2, K_1},$$

$\Omega_N^{(k_N-1)^*}(X_{N-2,2})$ – множество (k_N-1) условно минимальных ранжированных значений МП на N -м интервале.

Таким образом, в результате выполнения первого шага условной оптимизации для каждого $X_{N-2,2} \in \Omega_{N-2,2}(X)$ имеются $K_N < K$ допустимых условно минимальных ранжированных значений МП на N -м интервале $T_N^{(k_N)^*}(X_{N-2,2})$, $k_N = \overline{1, K_N}$.

Рассмотрим теперь произвольный шаг процесса пошаговой оптимизации МП, на котором анализируется участок РРЛ, содержащий интервалы n , $(n+1)$, ..., N .

Пусть в результате предшествующего шага условной оптимизации, на котором рассматривался участок, содержащий интервалы: $(n+1)$, $(n+2)$, ..., N , имеется множество $\Omega_{n+1,2}(X)$ пар МП $X_{n+1,2} = \{T_{n+1}; T_{n+2}\}$, каждой из которых соответствуют $K_{n+3} < K$ допустимых условно лучших УП-МП:

$$X_{n+1}^{(k_{n+3})^*}(X_{n+1,2}) = \{X_{n+1,2}; X_{n+3}^{(k_{n+3})^*}(X_{n+1,2})\},$$

где

$$X_{n+3}^{(k_{n+3})^*}(X_{n+1,2}) = \{T_{n+3}^{(k_{n+3})^*}(X_{n+1,2}); T_{n+4}^{(k_{n+3})^*}(X_{n+1,2}); \dots; T_N^{(k_{n+3})^*}(X_{n+1,2})\}.$$

Каждому $X_{n+1}^{(k_{n+3})^*}(X_{n+1,2})$ соответствует условно минимальная средняя МП на интервалах $(n+3)$, $(n+4)$, ..., N :

$$C_{n+3}^{(k_{n+3})^*}(X_{n+1,2}) = \frac{1}{N} \sum_{j=n+3}^N T_j^{(k_{n+3})^*}(X_{n+1,2}).$$

Выберем одну из УП-МП $X_{n+1,2} \in \Omega_{n+1,2}(X)$ и рассмотрим ее продолжения $X_{n,3} = \{T_n; X_{n+1,2}\}$ для всех $T_n \in w_n(X)$. Для всех полученных таким образом УП $X_{n,3}$ вычисляются деградация запаса на замирания на $(n + 1)$ -м интервале $\Delta M_{n+1}(T_n; T_{n+2})$ и соответствующее минимальное значение МП:

$$T_{n+1 \min}(T_n; T_{n+2}) = T_{n+1 \min} + \Delta M_{n+1}(T_n; T_{n+2}).$$

УП-МП $X_{n,3}$, для которых выполняется условие

$$T_{n+1} \geq T_{n+1 \min}(T_n; T_{n+2}),$$

образуют множество $\Omega_{n,3}(X)$, остальные $X_{n,3}$ исключаются из дальнейшего рассмотрения.

Аналогичные вычисления выполняются для всех других УП-МП $X_{n+1,2} \in \Omega_{n+1,2}(X)$. В результате формируется множество допустимых УП-МП $X_{n,3}$, каждой из которых соответствуют не более K условно лучших УП-МП:

$$X_n^{(k_{n+3})}(X_{n,3}) = \{T_n(X_{n,3}); X_{n+1}^{(k_{n+3})^*}(X_{n+1,2})\}, k_{n+3} \leq K.$$

Далее фиксируется $X_{n,2}$ и для каждого T_{n+2} вычисляются не более K значений частной целевой функции, относящейся к участку ЦРРЛ, содержащему интервалы $(n + 2)$, $(n + 3)$, ..., N :

$$C_{n+2}^{(k_{n+3})}(X_{n,2} / T_{n+2}) = T_{n+2}(X_{n,2}) + C_{n+3}^{(k_{n+3})^*}[T_{n+1}(X_{n,2}), T_{n+2}(X_{n,2})]. \quad (5.29)$$

Осуществляя в (5.29) минимизацию по всем парам $[k_{n+3}, T_{n+2}(X_{n,2})]$, найдем не более K условно минимальных значений средней МП на рассматриваемом участке ЦРРЛ:

$$C_{n+2}^{(k_{n+2})^*}(X_{n,2}) = \min_{\Gamma^{(k_{n+2})^*}(X_{n,2})} \{ T_{n+2}(X_{n,2}) + C_{n+3}^{(k_{n+3})^*}[T_{n+1}(X_{n,2}); T_{n+2}(X_{n,2})] \}, k_{n+2} \leq K,$$

где $\Gamma^{(k_{n+2})^*}(X_{n,2})$ – множество, на котором определяется k_{n+2} -я ранжированная условно лучшая УП-МП

$$X_{n+2}^{(k_{n+2})^*}(X_{n,2}) = \{T_{n+2}^{(k_{n+2})^*}(X_{n,2}); T_{n+3}^{(k_{n+2})^*}(X_{n,2}); \dots; T_N^{(k_{n+2})^*}(X_{n,2})\}, k_{n+2} = \overline{1, K}.$$

Элементами множества $\Gamma^{(k_{n+2})}(X_{n,2})$ являются пары $[k_{n+3}, T_{n+2}(X_{n,2})]$, при этом

$$\Gamma^{(1)}(X_{n,2}) = \Gamma(X_{n,2}); \quad (5.30)$$

$$\Gamma^{(k_{n+2})}(X_{n,2}) = \Gamma(X_{n,2}) \setminus \Gamma^{(k_{n+2}-1)*}(X_{n,2}). \quad (5.31)$$

В (5.30) и (5.31) $\Gamma(X_{n,2})$ – множество всех возможных пар; $[k_{n+3}, T_{n+2}(X_{n,2})]$; $\Gamma^{(k_{n+2}-1)*}(X_{n,2})$ – множество пар, соответствующих $(k_{n+2}-1)$ ранжированным условно лучшим УП-ПВА.

Аналогичным образом осуществляется условная оптимизация для других $X_{n,2}$, т. е. выполняется цикл по всем допустимым $X_{n,2}$.

Таким образом, в результате выполнения рассмотренного произвольного шага условной многовариантной оптимизации найдено множество $\Omega_{n,2}(X)$ пар $X_{n,2} = \{T_n, T_{n+1}\}$, каждой из которых соответствуют не более K допустимых ранжированных условно лучших УП-МП:

$$X_n^{(k_{n+2})*}(X_{n,2}) = \{X_{n,2}; X_{n+2}^{(k_{n+2})*}(X_{n,2})\}, k_{n+2} = \overline{1, K}.$$

При этом каждой УП-МП $X_n^{(k_{n+2})*}(X_{n,2})$ соответствует свое условно минимальное значение средней МП на $(n+2)$, $(n+3)$, ..., N -м интервалах:

$$C_{n+2}^{(k_{n+2})*}(X_{n,2}) = \frac{1}{N} \sum_{j=n+2}^N T_j^{(k_{n+2})*}(X_{n,2}),$$

где $T_j^{(k_{n+2})*}(X_{n,2})$ – условно минимальное значение МП на j -м интервале.

Аналогично выполняются другие шаги условной оптимизации МП.

На последнем шаге оптимизации для каждой пары $X_{1,2} = \{T_1; T_2\}$ дополнительно вычисляется деградация запаса на замирания на 1-м интервале $\Delta M_1(T_2)$ и соответствующее минимальное значение МП:

$$T_{1.\min}(T_2) = T_{1.\min} + \Delta M_1(T_2).$$

Пары $X_{1,2}$, для которых выполняется условие $T_1 \geq T_{1.\min}(T_2)$, образуют множество $\Omega_{1,2}(X)$, остальные пары исключаются из рассмотрения.

После этого для каждого $X_{1,2} \in \Omega_{1,2}(X)$ вычисляются ранжированные условно минимальные значения средней МП для всей ЦРРЛ

$$C_1^{(k_1)*}(X_{1,2}) = \frac{1}{N} [T_1(X_{1,2}) + T_2(X_{1,2}) + C_3^{(k_1)*}(X_{1,2})], k_1 = \overline{1, K}.$$

В заключение выполняются цикл по всем $X_{1,2} \in \Omega_{1,2}(X)$ и ранжирование найденных УП-МП. В результате определяются K (или не более K) безусловно лучших ранжированных УП-МП для всей рассматриваемой ЦРРЛ $X^{(k)} = \{T_1^{(k)}, T_2^{(k)}, \dots, T_N^{(k)}\}$, $k = \overline{1, K}$, которым соответствуют безусловно минимальные значения среднего МП на всей линии

$$T(X^{(k)}) = \min_{\Pi^{(k)}(X)} C_1^{(k_1)*}(X_{1,2}),$$

где $\Pi^{(k)}(X)$ – множество рассматриваемых пар $[k_1; X_{1,2}]$ при определении k -й ранжированной лучшей УП-МП, причем $\Pi^{(1)}(X) = \Pi(X)$, $\Pi(X)$ – множество всех пар $[k_1; X_{1,2}]$; $\Pi^{(k)}(X) = \Pi(X) \setminus \Pi^{(k-1)*}(X)$ для $k = \overline{2, K}$, $\Pi^{(k-1)*}(X)$ – множество пар $[k_1; X_{1,2}]$, соответствующих $(k-1)$ ранжированным лучшим УП-МП.

5.4. Оценка объема вычислений при многовариантной оптимизации мощностей передатчиков на многоинтервальных РРЛ

Объем вычислений при многовариантной оптимизации построения многоинтервальных РРЛ с использованием метода МВДП определяется числом проверок допустимости мощностей передатчиков на интервалах, числом вычислений текущих значений целевой функции и числом сравнений этих значений при их ранжировании и отборе заданного числа наименьших значений.

Как видно из п. 5.1, проверка допустимости мощностей передатчиков (МП) для каждого интервала предусматривает расчет минимально допустимого значения МП без учета влияния помех, расчет величины деградации запаса на замирания из-за влияния ВСП от соседних интервалов, расчет соответствующего минимально допустимого значения МП с учетом указанного влияния и, наконец, собственно проверку допустимости МП.

Верхняя граница общего числа проверок допустимости МП

$$\sup V_{\text{ПД}} = (N-2)J^3 + 2J^2, \quad (5.32)$$

где J – максимальное число рассматриваемых вариантов МП на интервале, $J = \max_n J_n$, J_n – число вариантов МП на интервале n , удовлетворяющих условию $T_n \geq T_{n_{\min}}$, $n = \overline{1, (N)}$.

В (5.32) первое слагаемое определяет число проверок допустимости МП на интервалах с учетом влияния помех от обоих соседних интервалов, а второе слагаемое относится к проверке допустимости на обоих крайних интервалах, когда учитываются помехи от одного соседнего интервала.

Следует отметить независимость числа проверок допустимости МП от числа отыскиваемых лучших решений K .

Нетрудно убедиться, что верхняя граница общего числа вычислений текущих значений целевой функции

$$\sup V_{\text{ВЦФ}} = J^3[K(N-3)+1], \quad (5.33)$$

а верхняя граница общего числа сравнений текущих значений целевой функции при $K \gg 1$ и $J \gg 1$

$$\sup V_{\text{СЦФ}} \approx (N-3)K^2J^3. \quad (5.34)$$

Как видно из выражений (5.33) и (5.34), увеличение объема вычислений с увеличением числа отыскиваемых ранжированных лучших решений при многовариантной оптимизации в наибольшей степени связано со сравнением текущих значений целевой функции при их ранжировании. При этом верхняя граница числа сравнений текущих значений целевой функции растет примерно пропорционально квадрату числа отыскиваемых лучших ранжированных решений, что можно рассматривать как «плату» за многовариантность оптимизации выбора мощностей передатчиков на интервалах многоинтервальной РРЛ.

В случае решения задачи многовариантной оптимизации МП методом простого перебора верхняя граница общего числа проверок допустимости МП определяется (5.32), а верхняя граница общего числа вычислений значений целевой функции

$$\sup V_{\text{ВЦФ}} \approx J^N. \quad (5.35)$$

При этом верхняя граница общего числа сравнений значений целевой функции при их ранжировании

$$\sup V_{\text{СЦФ}} \approx K \cdot J^N. \quad (5.36)$$

Сравнение (5.33) и (5.34), с одной стороны, (5.35) и (5.36), с другой стороны, позволяет сделать вывод о том, что при решении задачи многовариантной оптимизации МП использование метода МВДП обеспечивает большой выигрыш в объеме вычислений в сравнении с методом простого перебора, причем указанный выигрыш быстро возрастает с увеличением числа интервалов на РРЛ.

Таким образом, применение метода МВДП позволяет находить достаточно большое число ранжированных лучших решений задачи оптимизации МП при проектировании РРЛ практически любой протяженности в условиях большой вариантности изменяемых характеристик интервалов.

6. ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОТВЕТВЛЕНИЙ ОТ СУЩЕСТВУЮЩИХ РРЛ

6.1. Общая характеристика задачи оптимизации построения ответвлений от существующих РРЛ

Задача оптимизации характеристик ответвления рассматривается в предположении, что местоположение оконечной станции ответвления задано, на основной РРЛ используется двухчастотный план распределения частот и высота опоры на узловой станции (станции с ответвлением) определяется высотой подвеса на ней верхней антенны основной РРЛ.

При проектировании ответвления в этих условиях необходимо учитывать как влияние смежных интервалов основной РРЛ на ответвление, так и обратное влияние ответвления на энергетические характеристики указанных интервалов основной РРЛ. Кроме того, следует учитывать, что максимальная высота подвеса антенны на узловом конце ответвления не должна превышать высоту существующей опоры на узловой станции основной РРЛ.

При выборе проектного решения для ответвления должны учитываться не только существующие требования к показателям качества передачи на ответвлении и взаимное влияние интервалов основной РРЛ и ответвления, но и влияние ответвления на региональную электромагнитную обстановку, а также ожидаемые затраты на строительство ответвления.

При этом степень влияния ответвления на основную РРЛ и электромагнитную обстановку в регионе определяется, в основном, энергетическими характеристиками ответвления и, прежде всего, мощностью передатчиков, а также высотой подвеса антенны на узловой станции. Что касается ожидаемых затрат на строительство ответвления, они зависят, главным образом, от типа и диаметра каждой из антенн, а также высоты подвеса антенны на удаленном конце.

Основными задачами при выборе проектного решения для ответвления являются выбор мощности передатчиков, типов и размеров антенн, а также высот их подвеса на узловом и удаленном концах ответвления. При этом должны быть выполнены существующие требования к показателям качества передачи на ответвлении и заданной допустимой степени влияния ответвления на смежные интервалы основной РРЛ.

Используемые обозначения интервалов и радиорелейных станций (PPC) на трассе основной РРЛ с ответвлением поясняются на рис. 6.1.

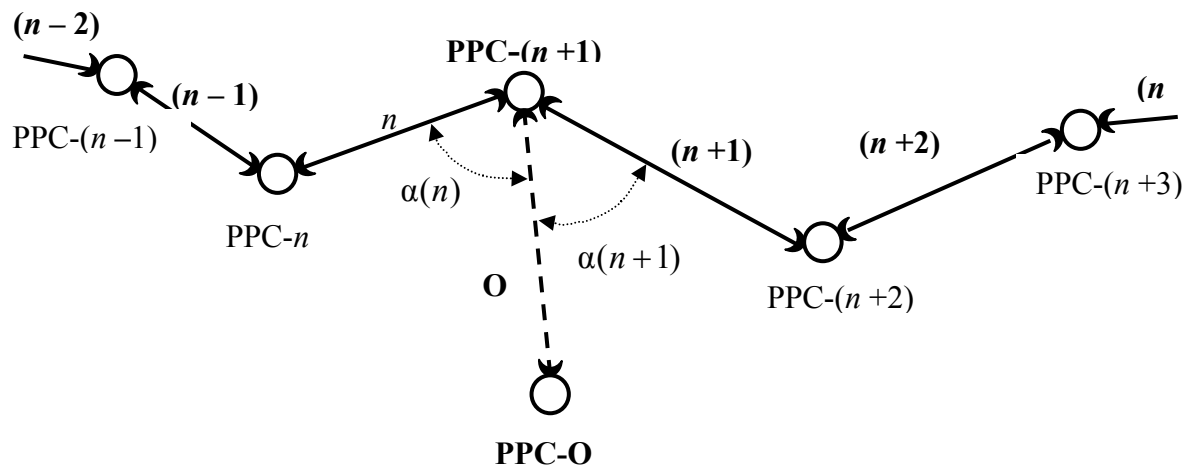


Рис. 6.1. Трасса основной (существующей) РРЛ с ответвлением

6.2. Математическая модель и методика решения задачи оптимизации мощности передатчиков на ответвлении от существующей РРЛ

К уровню мощности передатчиков на ответвлении предъявляются противоречивые требования. Увеличение мощности передатчиков обуславливает уменьшение влияния замираний сигналов на ответвлении и, следовательно, способствует улучшению обоих показателей качества передачи: показателя $SESR$ и показателя неготовности UAR . Уменьшение мощности передатчиков обеспечивает уменьшение влияния ответвления на оба смежных интервала основной РРЛ и, кроме того, способствует улучшению региональной электромагнитной обстановки.

С учетом сказанного и введенных обозначений математическая модель задачи оптимизации мощности передатчиков на ответвлении может быть представлена следующим образом.

Требуется найти наименьшее значение мощности передатчиков на ответвлении

$$T_O \rightarrow \min, \quad (6.1)$$

при котором выполняются следующие условия:

$$SESR_O(T_O) \leq SESR_{O_{\max}}; \quad (6.2)$$

$$UAR_O(T_O) \leq UAR_{\max}; \quad (6.3)$$

$$dM_{n,l-r}(T_O) \leq dM_{n,l-r.\max}; \quad (6.4)$$

$$dM_{n,r-l}(T_O) \leq dM_{n,r-l.\max}; \quad (6.5)$$

$$dM_{n+1,l-r}(T_O) \leq dM_{n+1,l-r.\max}; \quad (6.6)$$

$$dM_{n+1,r-l}(T_O) \leq dM_{n+1,r-l.\max}; \quad (6.7)$$

где $SESR_O(T_O)$ – расчетное значение показателя SESR на ответвлении, соответствующее мощности передатчиков T_O ;

$SESR_{O_{max}}$ – максимально допустимое (нормируемое) значение показателя SESR на ответвлении, определяемое его статусом и длиной;

$UAR_O(T_O)$ – расчетное значение среднегодового показателя неготовности UAR на ответвлении, соответствующее мощности передатчиков T_O ;

$UAR_{O_{max}}$ – максимально допустимое (нормируемое) значение показателя UAR на ответвлении;

$dM_{n,l-r}(T_O)$ и $dM_{n,r-l}(T_O)$ – соответственно увеличения деградации запасов на замирания на n -м интервале из-за влияния ответвления для направлений передачи слева-направо и справа-налево, дБ;

$dM_{n+1,l-r}(T_O)$ и $dM_{n+1,r-l}(T_O)$ – соответственно увеличения деградации запасов на замирания на $(n + 1)$ -м интервале из-за влияния ответвления для направлений передачи слева-направо и справа-налево, дБ;

в правой части неравенств (6.4) – (6.7) указаны априорно заданные максимально допустимые значения увеличения деградации запасов на замирания на n -м и $(n + 1)$ -м интервалах для обоих направлений передачи (в общем случае они могут быть разными).

Решение задачи (6.1) – (6.7) производится путем нахождения минимального значения мощности передатчиков $T_{O_{min}}$, при котором выполняются условия (6.2) и (6.3), с последующей проверкой этого значения с точки зрения выполнения условий (6.4) – (6.7).

В общем случае

$$T_{O_{min}} = \max(T_{O_{min.N-R}}; T_{O_{min.R-N}}), \quad (6.8)$$

где $T_{O_{min.N-R}}$ и $T_{O_{min.R-N}}$ – соответственно наименьшие допустимые значения мощности передатчиков на ответвлении для направления от узловой станции к РРС-О и обратного направления:

$$T_{O_{min.N-R}} = T_{O0_{min}} + \Delta M_{O.N-R}; \quad (6.9)$$

$$T_{O_{min.R-N}} = T_{O0_{min}} + \Delta M_{O.R-N}. \quad (6.10)$$

В (6.9) и (6.10) $T_{O0_{min}}$ – независящее от направления передачи минимально допустимое с точки зрения требований к показателям качества передачи значение T_O без учета влияния помех от интервалов основной РПЛ:

$$T_{O0_{min}} = P_{O_{пор}}(SES) + L_{O0} + L_O - G_{ON} - G_{OR} + M_{O_{min}}, \quad (6.11)$$

$P_{O_{пор}}(SES)$ – пороговый уровень приемников на ответвлении, дБм;

L_{O0} – потери свободного пространства на ответвлении, дБ;

L_O – дополнительные потери на ответвлении, дБ;

G_{ON} и G_{OR} – соответственно коэффициенты усиления на узловом и удаленном концах ответвления, дБ;

M_{Omin} – минимальный запас на замирания на ответвлении, зависящий от требований к показателям качества передачи;

$\Delta M_{O.N-R}$ и $\Delta M_{O.R-N}$ – соответственно величины деградации запасов на замирания на ответвлении из-за влияния помех от смежных интервалов основной РРЛ для направлений передачи от узловой станции к оконечной станции РРС-О ($N-R$) и от РРС-О к узловой станции ($R-N$).

При правильном выборе высот подвеса антенн на ответвлении влиянием субрефракционных замираний на показатели качества можно пренебречь и учитывать лишь влияние многолучевых замираний и ослабления в дождях.

Для приближенной оценки выполнения условий (6.2) и (6.3) можно воспользоваться подходом к оценке показателей качества, предусматривающим учет зависимости показателя $SESR$ только от многолучевых замираний и зависимости показателя UAR только от ослабления радиоволн в дождях [17].

При этом минимальный запас на замирания на ответвлении определяется следующим образом. В диапазонах частот ниже примерно 11 ГГц, когда решающую роль играют многолучевые замирания, M_{Omin} определяется (5.9) при одинарном приеме сигналов и (5.10) – при разнесенном приеме. В диапазонах частот выше примерно (15–18) ГГц, когда решающую роль начинает играть ослабление в дождях, M_{Omin} определяется (5.12). В диапазонах частот в пределах примерно от 11 до (15–18) ГГц в качестве M_{Omin} следует использовать большее из значений, полученных по формулам (5.9) или (5.10) и (5.12).

Входящие в (6.9) и (6.10) величины деградации запасов на замирания $\Delta M_{O.N-R}$ и $\Delta M_{O.R-N}$ определяются (5.15) и (5.16) и не зависят от T_0 . При этом уровни помех от смежных интервалов основной РРЛ зависят от соотношения видов поляризации радиоволн на основной РРЛ и ответвлении.

Вначале рассмотрим случай одинаковой поляризации радиоволн на интервалах основной РРЛ и ответвлении.

В данном случае уровни суммарных мощностей помех от смежных интервалов основной РРЛ $I_{O.N-R}$ и $I_{O.R-N}$ определяются следующими выражениями:

$$I_{O.N-R} = 10 \lg(10^{0,1I_{OR.nr}} + 10^{0,1I_{OR.(n+1)l}}), \quad (6.12)$$

$$I_{O.R-N} = 10 \lg(10^{0,1I_{ON.nl}} + 10^{0,1I_{ON.(n+1)r}}). \quad (6.13)$$

Для направления $N - R$ (от узловой станции к РРС-О) уровни помех, создаваемых n -м и $(n + 1)$ -м интервалами и принимаемых удаленной станцией РРС-О, определяются соответственно выражениями:

$$I_{OR.nr} = T_n + G_{nr} + G_{OR} - E_{nr}[\alpha(n)] - L_{O0} - L_{OR.nr}; \quad (6.14)$$

$$I_{OR.(n+1)l} = T_{n+1} + G_{(n+1)l} + G_{OR} - E_{(n+1)l}[\alpha(n+1)] - L_{O0} - L_{OR.(n+1)l}. \quad (6.15)$$

Для направления $R - N$ (от РРС-О к узловой станции) уровни помех, создаваемых n -м и $(n + 1)$ -м интервалами и принимаемых узловой станцией ответвления, определяются соответственно выражениями:

$$I_{ON.nl} = T_n + G_{nl} + G_{ON} - E_{ON}[\alpha(n)] - L_{n0} - L_{ON.nl}; \quad (6.16)$$

$$I_{ON.(n+1)r} = T_{n+1} + G_{(n+1)r} + G_{ON} - E_{ON}[\alpha(n+1)] - L_{(n+1)0} - L_{ON.(n+1)r}. \quad (6.17)$$

В (6.14) – (6.17):

$\alpha(n)$ и $\alpha(n+1)$ – углы между n -м и $(n + 1)$ -м интервалами основной РРЛ и ответвлением (рис. 6.1);

$E_{nr}[\alpha(n)]$ и $E_{(n+1)l}[\alpha(n+1)]$ – соответственно ослабления помех, создаваемых n -м и $(n + 1)$ -м интервалами основной РРЛ и принимаемых антенной РРС-О, за счет диаграмм направленности правой антенны n -го интервала и левой антенны $(n + 1)$ -го интервала, дБ;

$E_{ON}[\alpha(n)]$ и $E_{ON}[\alpha(n+1)]$ – соответственно ослабления помех, создаваемых n -м и $(n + 1)$ -м интервалами основной РРЛ и принимаемых антенной узловой станции ответвления, за счет диаграммы направленности этой антенны, дБ;

$L_{OR.nr}$ и $L_{OR.(n+1)l}$ – соответственно дополнительные потери на трассах распространения помех от правой антенны n -го интервала и левой антенны $(n + 1)$ -го интервала, принимаемых антенной РРС-О;

$L_{ON.nl}$ и $L_{ON.(n+1)r}$ – соответственно дополнительные потери на трассах распространения помех от левой антенны n -го интервала и правой антенны $(n + 1)$ -го интервала, принимаемых антенной узловой станции ответвления; остальные обозначения соответствуют обозначениям в разд. 5.2.

Теперь рассмотрим случай разной поляризации радиоволн на основной ЦРРЛ и ответвлении. Как и в пп. 5.2.2, при этом будем учитывать излучение и прием каждой антенной радиоволн с совпадающей и с ортогональной поляризацией.

Предположим, что на основной РРЛ используется вертикальная поляризация, а на ответвлении – горизонтальная.

В этом случае антенна РРС-О принимает два мешающих сигнала с горизонтальной и вертикальной поляризацией, излучаемых правой антенной n -го интервала основной РРЛ, и два мешающих сигнала также с горизонтальной и вертикальной поляризацией, излучаемых левой антенной $(n + 1)$ -го интервала.

Суммарная мощность горизонтально и вертикально поляризованных помех от n -го и $(n + 1)$ -го интервалов основной РРЛ, принимаемых антенной РРС-О, дБм:

$$I_{O.N-R} = 10 \lg \left[10^{0, I_{OR.nr}(H/H;V/H)} + 10^{0, I_{OR.nr}(H/V;V/V)} + 10^{0, I_{OR.(n+1)l}(H/H;V/H)} + 10^{0, I_{OR.(n+1)l}(H/V;V/V)} \right], \quad (6.18)$$

где $I_{OR.nr}(H/H;V/H)$ и $I_{OR.nr}(H/V;V/V)$ – соответственно средние мощности горизонтально и вертикально поляризованных помех, создаваемых правой антенной n -го интервала основной РРЛ, дБм;

$I_{OR.(n+1)l}(H/H;V/H)$ и $I_{OR.(n+1)l}(H/V;V/V)$ – соответственно средние мощности горизонтально и вертикально поляризованных помех, создаваемых левой антенной $(n + 1)$ -го интервала основной РРЛ, дБм.

Антенна узловой станции ответвления также принимает два мешающих сигнала с горизонтальной и вертикальной поляризацией, излучаемых левой антенной n -го интервала основной РРЛ, и два мешающих сигнала с горизонтальной и вертикальной поляризацией, излучаемых правой антенной $(n + 1)$ -го интервала.

Суммарная мощность горизонтально и вертикально поляризованных помех от n -го и $(n + 1)$ -го интервалов основной РРЛ, принимаемых антенной узловой станции ответвления, дБм:

$$I_{O.R-N} = 10 \lg \left[10^{0, I_{ON.nl}(H/H;V/H)} + 10^{0, I_{ON.nl}(H/V;V/V)} + 10^{0, I_{ON.(n+1)r}(H/H;V/H)} + 10^{0, I_{ON.(n+1)r}(H/V;V/V)} \right], \quad (6.19)$$

где $I_{ON.nl}(H/H;V/H)$ и $I_{ON.nl}(H/V;V/V)$ – соответственно средние мощности горизонтально и вертикально поляризованных помех, создаваемых левой антенной n -го интервала основной РРЛ, дБм;

$I_{ON.(n+1)r}(H/H;V/H)$ и $I_{ON.(n+1)r}(H/V;V/V)$ – соответственно средние мощности горизонтально и вертикально поляризованных помех, создаваемых правой антенной $(n + 1)$ -го интервала основной РРЛ, дБм.

Входящие в (6.18) и (6.19) средние мощности горизонтально и вертикально поляризованных помех определяются следующим образом:

$I_{OR.nr}(H/H;V/H)$ определяется (6.14) с заменой $E_{nr}[\alpha(n)]$ на $E_{nr}[V/H;\alpha(n)]$, где $E_{nr}[V/H;\alpha(n)]$ – ослабление горизонтально поляризованной помехи от правой антенны n -го интервала, принимаемой антенной РРС-О, за счет диаграммы направленности вертикально поляризованной правой антенны n -го интервала, дБ;

$I_{OR.nr}(H/V;V/V)$ также определяется (6.14) с заменой $E_{nr}[\alpha(n)]$ на $E_{nr}[V/V;\alpha(n)] + XPD_{OR}$, где $E_{nr}[V/V;\alpha(n)]$ – ослабление вертикально поляризованной помехи от правой антенны n -го интервала, принимаемой антенной РРС-О, за счет диаграммы направленности вертикально поляризованной правой антенны n -го интервала, дБ, XPD_{OR} – величина ослабления сигнала с ортогональной поляризацией в направлении главного излучения для удаленной антенны ответвления, дБ;

$I_{OR.(n+1)l}(H/H;V/H)$ определяется (6.15) с заменой $E_{(n+1)l}[\alpha(n+1)]$ на $E_{(n+1)l}[V/H;\alpha(n+1)]$, где $E_{(n+1)l}[V/H;\alpha(n+1)]$ – ослабление горизонтально поляризованной помехи от левой антенны $(n+1)$ -го интервала, принимаемой антенной РРС-О, за счет диаграммы направленности вертикально поляризованной левой антенны $(n+1)$ -го интервала, дБ;

$I_{OR.(n+1)l}(H/V;V/V)$ определяется (6.15) с заменой $E_{(n+1)l}[\alpha(n+1)]$ на $E_{(n+1)l}[V/V;\alpha(n+1)] + XPD_{OR}$, где $E_{(n+1)l}[V/V;\alpha(n+1)]$ – ослабление вертикально поляризованной помехи от левой антенны $(n+1)$ -го интервала, принимаемой антенной РРС-О, за счет диаграммы направленности вертикально поляризованной левой антенны $(n+1)$ -го интервала, дБ;

$I_{ON.nl}(H/H;V/H)$ определяется (2.68) с заменой $E_{ON}[\alpha(n)]$ на $E_{ON}[H/H;\alpha(n)] + XPD_{nl}$, где $E_{ON}[H/H;\alpha(n)]$ – ослабление горизонтально поляризованной помехи от левой антенны n -го интервала, принимаемой антенной узловой станции ответвления, за счет диаграммы направленности горизонтально поляризованной антенны узловой станции ответвления, дБ, а XPD_{nl} – величина ослабления сигнала с ортогональной поляризацией в направлении главного излучения для левой антенны n -го интервала, дБ;

$I_{ON.nl}(H/V;V/V)$ определяется (6.16) с заменой $E_{ON}[\alpha(n)]$ на $E_{ON}[H/V;\alpha(n)]$, где $E_{ON}[H/V;\alpha(n)]$ – ослабление вертикально поляризованной помехи от левой антенны n -го интервала, принимаемой антенной узловой станции ответвления, за счет диаграммы направленности горизонтально поляризованной антенны узловой станции ответвления, дБ;

$I_{ON.(n+1)r}(H/H;V/H)$ определяется (6.17) с заменой $E_{ON}[\alpha(n+1)]$ на $E_{ON}[H/H;\alpha(n+1)] + XPD_{(n+1)r}$, где $E_{ON}[H/H;\alpha(n+1)]$ – ослабление горизонтально поляризованной помехи от правой антенны $(n+1)$ -го интервала, принимаемой антенной узловой станции ответвления, за счет диаграммы направленности горизонтально поляризованной антенны узловой станции ответвления, дБ, а $XPD_{(n+1)r}$ – величина ослабления сигнала с ортогональной поляризацией в направлении главного излучения для правой антенны $(n+1)$ -го интервала, дБ;

$I_{ON.(n+1)r}(H/V;V/V)$ определяется (6.17) с заменой $E_{ON}[\alpha(n+1)]$ на $E_{ON}[H/V;\alpha(n+1)]$ – ослабление вертикально поляризованной помехи от правой антенны $(n + 1)$ -го интервала, принимаемой антенной узловой станции ответвления, за счет диаграммы направленности горизонтально поляризованной антенны узловой станции ответвления, дБ.

В случае использования на основной РРЛ радиорелейного оборудования с автоматической регулировкой мощностей передатчиков (АРМП) в выражениях (6.14) – (6.17) вместо T_n и T_{n+1} следует использовать $T_n - \Delta T(\text{АРМП})$ и $T_{n+1} - \Delta T(\text{АРМП})$.

Описанная выше методика позволяет решать задачи оптимизации мощностей передатчиков на ответвлениях от существующей РРЛ при заданных характеристиках направленности антенн на обоих концах ответвления и высотах подвеса этих антенн.

6.3. Выбор антенн и высот их подвеса на ответвлении

От выбора антенн и высот их подвеса зависят необходимая мощность передатчиков и показатели качества передачи на ответвлении, а также величины деградации запасов на замирания на смежных интервалах основной РРЛ и стоимости антенн на ответвлении и опоры на РРС-О.

Выбор высот антенн на ответвлении производится с учетом существующих критериев допустимости пар высот антенн на пересеченных и слабопересеченных интервалах. При этом для пересеченных интервалов используются критерии (3.3) и (3.5), а для слабопересеченных интервалов – критерии (3.4) и (3.5).

При выборе ПВА на ответвлении следует учитывать, что максимальная высота подвеса антенны на узловой станции ограничена высотой существующей опоры на основной РРЛ. С учетом этого затраты на антенные опоры ответвления зависят только от высоты опоры на РРС-О, которая определяется высотой подвеса антенны на этой РРС.

С точки зрения уменьшения влияния ответвления на основную РРЛ целесообразно уменьшать высоту антенны на узловой станции ответвления, так как при этом увеличивается экранирование мешающих сигналов, создаваемых этой антенной и принимаемых левой антенной n -го интервала и правой антенной $(n + 1)$ -го интервала основной РРЛ.

Так как высота антенны на узловом конце ответвления не может быть больше высот антенн основной РРЛ на РРС- $(n + 1)$, то с точки зрения уменьшения помех, создаваемых удаленной антенной ответвления и принимаемых антеннами узловой станцией основной РРЛ, уменьшение высоты антенны на удаленном конце ответвления за счет увеличения высоты антенны на узловом конце не целесообразно (оно целесообразно с точки зрения уменьшения стоимости опоры на удаленном конце ответвления).

В этих условиях уменьшение влияния ответвления на смежные интервалы основной РРЛ фактически возможно лишь за счет увеличения высоты, а следовательно, и стоимости опоры на удаленном конце ответвления.

От выбора размеров антенн на ответвлении зависит необходимая мощность передатчиков, поэтому в каждом конкретном случае должны быть заранее установлены приоритеты, т. е. указано, является ли предпочтительным уменьшение размеров используемых антенн при соответствующем увеличении мощностей передатчиков или, наоборот, с учетом сложной региональной электромагнитной обстановки целесообразнее максимально снизить мощность передатчиков за счет допустимого увеличения размеров антенн.

При выборе размеров антенн на разных концах ответвления следует иметь в виду, что увеличение диаметра антенны на удаленном конце непосредственно ведет к увеличению уровней помех, принимаемых правой антенной n -го интервала и левой антенной $(n + 1)$ -го интервала основной РРЛ. В то же время увеличение уровней помех, принимаемых левой антенной n -го интервала и правой антенной $(n + 1)$ -го интервала от антенны на узловом конце ответвления с увеличением диаметра этой антенны компенсируется соответствующим увеличением ее коэффициента защитного действия. Поэтому можно считать, что увеличение диаметра антенны на узловом конце ответвления не ведет к увеличению влияния помех для основной РРЛ, создаваемых ответвлением от этой линии.

Таким образом, с точки зрения уменьшения влияния ответвления на основную РРЛ целесообразно увеличивать размер антенны на узловом конце ответвления и уменьшать высоту подвеса этой антенны.

В случае совместной оптимизации выбора мощности передатчиков, размеров антенн и высот их подвеса на ответвлении вначале целесообразно сформировать ранжированную последовательность возможных вариантов антенн на обоих концах ответвления и высот подвеса этих антенн. При этом необходимо учитывать как влияние ответвления на основную РРЛ, так и стоимость опоры на удаленном конце ответвления.

После этого задача оптимизации мощности передатчиков на ответвлении решается последовательно для отобранных вариантов характеристик антенн до тех пор пока не будут выполнены все ограничения, входящие в математическую модель задачи (6.1) – (6.7), т. е. пока не будет найдено решение указанной задачи.

Таким образом определяется последовательность ранжированных лучших решений задачи совместной оптимизации выбора мощности передатчиков, размеров антенн и высот их подвеса на ответвлении от основной ЦРРЛ.

7. ОПТИМИЗАЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ МЕСТНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦИФРОВЫХ СЕТЕЙ ФИКСИРОВАННОЙ РАДИОСВЯЗИ СО ЗВЕЗДООБРАЗНОЙ ТОПОЛОГИЕЙ

7.1. Общая характеристика задач оптимизации построения местных и технологических цифровых сетей фиксированной радиосвязи

В условиях известных природно-географических и демографических особенностей территории России структура сетей связи имеет, как правило, многоуровневый характер, который помимо транспортных сетей, с одной стороны, и сетей доступа, в том числе широкополосного доступа, с другой стороны, предусматривает широкое использование в качестве промежуточного звена местных сетей связи с разной топологией. Аналогичная ситуация имеет место и в технологических сетях связи.

С точки зрения требований к надежности связи и экономичности лучшим вариантом местных соединительных линий являются цифровые радиорелейные линии, обеспечивающие необходимую пропускную способность и большую дальность связи и потому широко используемые в зонах и технологических сетях связи. Именно в этих условиях особенно заметно проявляются достоинства радиосистем в сравнении с кабельными, в том числе с волоконно-оптическими системами связи. К указанным достоинствам относятся, прежде всего, надежность линейного тракта, слабая зависимость от природно-географических и климатических условий местности, а также экономическая эффективность. При этом наиболее широкое распространение получили местные и технологические сети радиорелейной связи с топологией дерева, с кольцевой и звездообразной топологиями.

При построении указанных сетей обычно используются диапазоны частот: 7, 8, 13, 15, 18, 23, 26, 31 и 38 ГГц. Пропускная способность современных местных и технологических цифровых сетей радиосвязи лежит в широких пределах от 2 до 155 Мбит/с. На низкоскоростных технологических линиях со скоростями передачи менее 2 Мбит/с, кроме того, используются дециметровый (400 МГц) и метровый (160 МГц) диапазоны.

При проектировании местных и технологических цифровых сетей фиксированной радиосвязи важную роль играют задачи оптимизации построения этих сетей. Успешное решение указанных задач повышает эффективность использования частотного ресурса, снижает затраты на построение сетей и способствует улучшению региональной электромагнитной обстановки.

Что касается конфигурации оборудования, то в большинстве случаев на рассматриваемых сетях радиосвязи используется одинарный прием сигналов (1 + 0) или конфигурация оборудования (1 + 1) с аппаратным резервированием.

Основными задачами оптимизации построения местных и технологических сетей фиксированной радиосвязи являются: оптимизация выбора топологии сети, оптимизация мощностей передатчиков на интервалах сети, оптимизация высот подвеса антенн, оптимизация частотно-территориального планирования сети.

Во многих случаях при проектировании местных и технологических сетей имеют место дополнительные неформальные или трудноформализуемые ограничения, такие как конструктивные особенности антенных опор и связанные с этим ограничения на высоты подвеса антенн, ограничения на размеры используемых антенн, ограничения на распределение частот и видов поляризации радиоволн на интервалах, ограничения на уровни излучаемой мощности в определенных направлениях и т. д. В этих случаях практический интерес представляет нахождение не только оптимального, но и еще нескольких ранжированных лучших решений рассматриваемой задачи оптимизации.

В разд. 7 рассматриваются задачи многовариантной оптимизации построения местных и технологических сетей фиксированной радиосвязи со звездообразной топологией. При этом в пп. 7.3 и 7.4 рассматриваются соответственно решения задач оптимизации мощностей передатчиков и совместной оптимизации мощностей передатчиков и частотно-территориального планирования на сетях со звездообразной топологией.

7.2. Оценка влияния внутрисистемных помех в цифровых сетях радиосвязи со звездообразной топологией

При повторном использовании частот на сетях радиосвязи со звездообразной топологией основным видом внутрисистемных помех являются помехи узлообразования. В случае, если на всех интервалах (лучах) звезды используются одни и те же пары частот, деградация запаса на замирания для каждого луча зависит от помех, создаваемых всеми другими лучами звезды. Влияние внутрисистемных помех на звездообразной трассе поясняется на рис. 7.1.

Для оценки величины деградации запаса на замирания следует использовать общие выражения (5.15) и (5.16). При этом для направления передачи от оконечной станции (ОС) к узловой станции (УС) средняя суммарная мощность помех узлообразования на входе приемника УС j -го луча звезды определяется выражением, дБм:

$$I_{jn} = 10 \cdot \lg \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N 10^{0,1 \cdot I_{jn.ir}} \right), \quad (7.1)$$

где $I_{jn.ir}$ – мощность мешающего сигнала от передатчика ОС i -го луча на входе приемника УС j -го луча, дБм;

N – общее число лучей звезды.

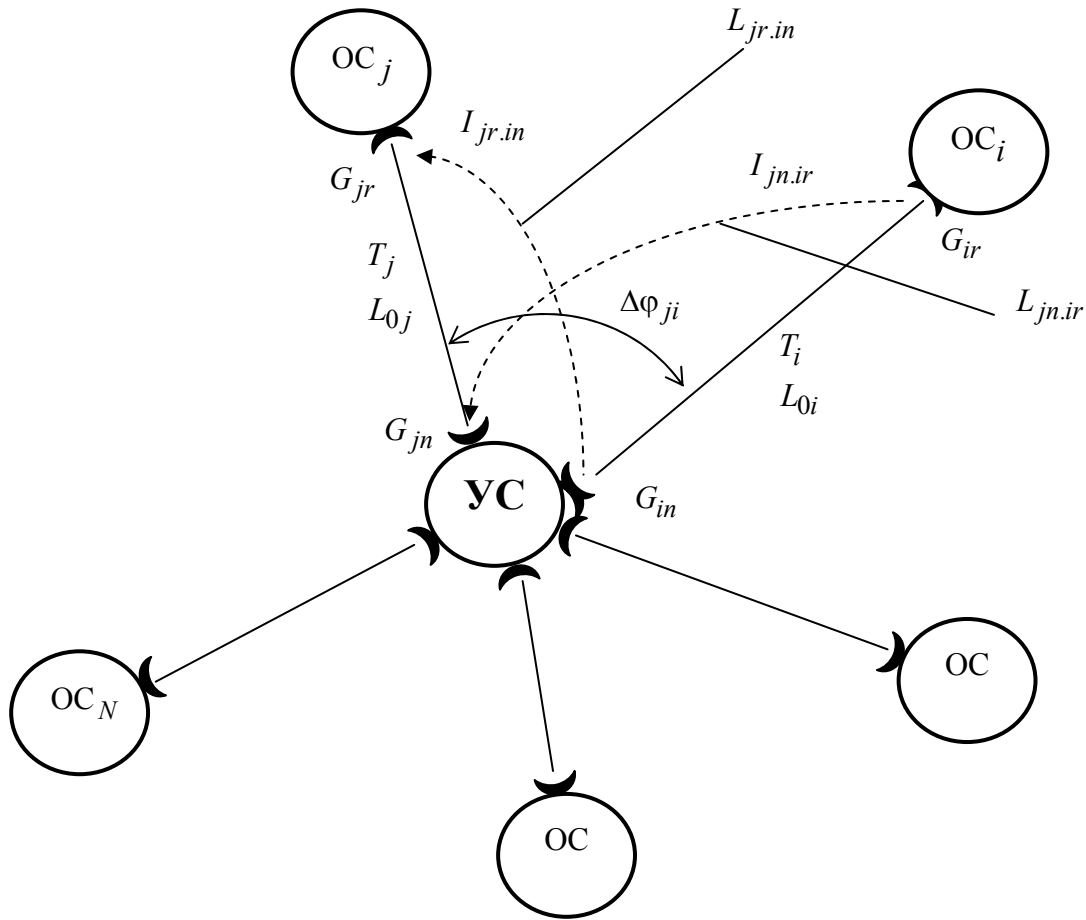


Рис. 7.1. Пример сети радиосвязи со звездообразной топологией

В случае, если на j -м и i -м лучах звезды используется одинаковая поляризация радиоволн

$$I_{jn.ir} = T_i + G_{ir} + G_{jn} - E_{jn}(\Delta\phi_{ji}) - L_{0i} - L_{jn.ir}, \quad (7.2)$$

где T_i – мощность передатчиков на i -м луче звезды, дБм;

G_{ir} – коэффициент усиления антенны на оконечной станции i -го луча, дБ;

G_{jn} – коэффициент усиления антенн на узловой станции j -го луча, дБ;

$E_{jn}(\Delta\phi_{ji})$ – ослабление мешающего сигнала, принимаемого УС j -го луча от ОС i -го луча, за счет диаграммы направленности антенны УС j -го луча, дБ;

L_{0i} – потери свободного пространства на i -м луче, дБ;

$L_{jn.ir}$ – дополнительные потери на трассе распространения мешающего сигнала, принимаемого УС j -го луча от ОС i -го луча, дБ.

Рассмотрим теперь случай, когда на j -м и i -м лучах звезды используется разная поляризация радиоволн. Предположим, что на j -м луче используется вертикальная поляризация, а на i -м луче – горизонтальная поляризация.

В этом случае мощность мешающего сигнала от передатчика ОС i -го луча на входе приемника УС j -го луча, дБм:

$$I_{jn.ir} = 10 \cdot \lg[10^{0,1I_{jn.ir}(H;V/H)} + 10^{0,1I_{jn.ir}(H/V;V)}], \quad (7.3)$$

где $I_{jn.ir}(H;V/H)$ – средняя мощность горизонтально поляризованной помехи от ОС i -го луча, принимаемой вертикально поляризованной антенной УС j -го луча, дБм:

$$I_{jn.ir}(H;V/H) = T_i + G_{ir} + G_{jn} - E_{jn}(V/H; \Delta\varphi_{ji}) - L_{0i} - L_{jn.ir}; \quad (7.4)$$

$I_{jn.ir}(H/V;V)$ – средняя мощность вертикально поляризованной помехи от ОС i -го луча, принимаемой вертикально поляризованной антенной УС j -го луча, дБм:

$$I_{jn.ir}(H/V;V) = T_i + G_{ir} + G_{jn} - XPD_{ir} - E_{jn}(V; \Delta\varphi_{ji}) - L_{0i} - L_{jn.ir}. \quad (7.5)$$

В (7.4) и (7.5): $E_{jn}(V/H; \Delta\varphi_{ji})$ – ослабление горизонтально поляризованной помехи от ОС i -го луча, принимаемой вертикально поляризованной антенной УС j -го луча, за счет кросс-поляризационной диаграммы направленности антенны УС j -го луча, дБ;

XPD_{ir} – величина ослабления сигнала с ортогональной поляризацией в направлении главного излучения для антенны на ОС i -го луча (содержится в списке параметров антенны), дБ;

$E_{jn}(V; \Delta\varphi_{ji})$ – ослабление вертикально поляризованной помехи от ОС i -го луча, принимаемой вертикально поляризованной антенной УС j -го луча, за счет диаграммы направленности антенны УС j -го луча в вертикальной плоскости, дБ.

Для направления передачи от УС к ОС средняя суммарная мощность помех узлообразования на входе приемника ОС j -го луча звезды определяется выражением, дБм:

$$I_{jr} = 10 \cdot \lg\left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N 10^{0,1I_{jr.in}}\right), \quad (7.6)$$

где $I_{jr.in}$ – мощность мешающего сигнала от передатчика УС i -го луча на входе приемника ОС j -го луча, дБм.

В случае, если на j -м и i -м лучах звезды используется одинаковая поляризация радиоволн:

$$I_{jr.in} = T_i + G_{in} + G_{jr} - E_{in}(\Delta\varphi_{ji}) - L_{0j} - L_{jr.in}, \quad (7.7)$$

где G_{in} – коэффициент усиления антенны на УС i -го луча, дБ;

G_{jr} – коэффициент усиления антенн на ОС j -го луча, дБ;

$E_{in}(\Delta\varphi_{ji})$ – ослабление мешающего сигнала, принимаемого ОС j -го луча от УС i -го луча, за счет диаграммы направленности антенны УС i -го луча, дБ;
 L_{0j} – потери свободного пространства на j -м луче, дБ;

$L_{jr.in}$ – дополнительные потери на трассе распространения мешающего сигнала, принимаемого ОС j -го луча от УС i -го луча, дБ.

В случае, если на j -м луче используется вертикальная поляризация, а на i -м луче – горизонтальная поляризация, мощность мешающего сигнала от передатчика УС i -го луча на входе приемника ОС j -го луча, дБм:

$$I_{jr.in} = 10 \cdot \lg \left[10^{0,1 \cdot I_{jr.in}(H;V/H)} + 10^{0,1 \cdot I_{jr.in}(H/V;V)} \right], \quad (7.8)$$

где $I_{jr.in}(H;V/H)$ – средняя мощность горизонтально поляризованной помехи от УС i -го луча, принимаемой вертикально поляризованной антенной ОС j -го луча, дБм:

$$I_{jr.in}(H;V/H) = T_i + G_{in} + G_{jr} - E_{in}(H; \Delta\varphi_{ji}) - XPD_{jr} - L_{0j} - L_{jr.in}; \quad (7.9)$$

$I_{jr.in}(H/V;V)$ – средняя мощность вертикально поляризованной помехи от УС i -го луча, принимаемой вертикально поляризованной антенной ОС j -го луча, дБм:

$$I_{jr.in}(H/V;V) = T_i + G_{in} + G_{jr} - E_{in}(H/V; \Delta\varphi_{ji}) - L_{0j} - L_{jr.in}. \quad (7.10)$$

В (7.9) и (7.10): $E_{in}(H; \Delta\varphi_{ji})$ – ослабление горизонтально поляризованной помехи от УС i -го луча, принимаемой вертикально поляризованной антенной ОС j -го луча, за счет диаграммы направленности антенны УС i -го луча в горизонтальной плоскости, дБ;

XPD_{jr} – величина ослабления сигнала с ортогональной поляризацией в направлении главного излучения для антенны на ОС j -го луча, дБ;

$E_{in}(H/V; \Delta\varphi_{ji})$ – ослабление вертикально поляризованной помехи от УС i -го луча, принимаемой вертикально поляризованной антенной ОС j -го луча, за счет кросс-поляризационной диаграммы направленности антенны УС i -го луча, дБ.

Следует отметить, что для направления от ОС к УС замирания полезных и мешающих сигналов всегда статистически независимы из-за различия трасс распространения, в то время как для обратного направления от УС к ОС степень корреляции замираний полезных и мешающих сигналов зависит от различия высот подвеса антенн разных лучей на УС. В случае одинаковой высоты подвеса всех антенн на УС (при размещении всех антенн на одной площадке) замирания полезных и мешающих сигналов для направления от УС к ОС полностью коррелированы, при этом влиянием помех от сигналов узлообразования можно пренебречь [13].

Отсюда следует, что расчет показателей качества передачи на лучах местных сетей со звездообразной топологией следует выполнять для направления передачи от ОС к УС, которое является худшим.

7.3. Оптимизация выбора мощностей передатчиков на местных и технологических цифровых сетях со звездообразной топологией

Рассматривается задача нахождения заданного числа ранжированных лучших решений при оптимизации выбора мощностей передатчиков на интервалах местных и технологических сетей радиосвязи со звездообразной топологией и повторным использованием частот [18, 19]. При этом предполагается, что на всех лучах звезды используется одна и та же пара частот, что обуславливает взаимное влияние всех лучей друг на друга и связанную с этим необходимость совместного рассмотрения характеристик всех лучей. Указанное влияние зависит от числа лучей, их длины и углов между ними, характеристик направленности антенн, мощностей передатчиков, используемых видов поляризации радиоволн на интервалах (лучах).

Рассматриваемая задача многовариантной оптимизации решается с учетом влияния внутрисистемных помех и существующих требований к обоим нормируемым показателям качества передачи информации: показателю SESR и показателю неготовности [13].

При решении задачи в качестве неизменяемых характеристик используются: число интервалов (лучей), их длины и азимуты, средняя частота используемого диапазона, характеристики направленности антенн на узловой и оконечных станциях (коэффициенты усиления и диаграммы направленности), пороговые уровни приемников и возможные дополнительные потери в волноводных трактах.

Введем следующие обозначения:

K – заданное число отыскиваемых лучших решений задачи;

N – число лучей-интервалов на сети со звездообразной топологией;

T_j – возможное значение мощности передатчиков (МП) на j -м луче, $j = \overline{1, N}$ (нумерация лучей произвольная);

$X = \{T_1, T_2, \dots, T_N\}$ – упорядоченная последовательность МП (УП-МП) на лучах сети;

$\Omega(X)$ – дискретное множество всех возможных УП-МП на сети;

$X^{(k)} = \{T_1^{(k)}, T_2^{(k)}, \dots, T_N^{(k)}\}$ – УП-МП, соответствующая k -му ранжированному лучшему решению задачи;

$T_j^{(k)}$ – МП на j -м луче, входящая в состав УП-МП $X^{(k)}$;

$\Omega^{(k)}(X)$ – множество УП-МП, на котором определяется k -е ранжированное лучшее решение;

$\Omega^{(k)*}(X)$ – множество УП-МП, состоящее из k лучших решений.

Математическая модель рассматриваемой многовариантной задачи оптимизации может быть записана следующим образом: найти такие $X^{(k)} = \{T_1^{(k)}; T_2^{(k)}; \dots; T_N^{(k)}\}$, $k = \overline{1, K}$, для которых средняя МП

$$T_{\Sigma}(X^{(k)}) = \min_{X \in \Omega^{(k)}(X)} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N T_j(X) \quad (7.11)$$

при условиях:

$$\Delta M_{jn}(X^{(k)}) \leq M_{j0}(T_j^{(k)}) - M_{j \min}, \quad j = \overline{1, N}; \quad (7.12)$$

$$\Delta M_{jr}(X^{(k)}) \leq M_{j0}(T_j^{(k)}) - M_{j \min}, \quad j = \overline{1, N}; \quad (7.13)$$

$$\Omega^{(1)}(X) = \Omega(X); \quad \Omega^{(k)}(X) = \Omega(X) \setminus \Omega^{(k-1)*}(X), \quad k = \overline{2, K} \quad (7.14)$$

В выражениях (7.11) – (7.14):

$M_{j0}(T_j^{(k)})$ – запас на плоские многолучевые замирания на j -м луче, соответствующий $T_j^{(k)}$ и зависящий от энергетических характеристик (мощности передатчиков и характеристик направленности антенн) только данного луча, дБ;

$\Delta M_{jn}(X^{(k)})$ и $\Delta M_{jr}(X^{(k)})$ – величины деградации запаса на замирания на j -м луче для направлений передачи от ОС к УС и от УС к ОС, соответствующие $X^{(k)}$; указанная деградация учитывает влияние внутрисистемных помех узлообразования и зависит от энергетических характеристик всех лучей, а также от различия азимутов лучей, дБ;

$M_{j \min}$ – минимально допустимое значение запаса на плоские замирания на j -м луче, зависящее от требований к показателям качества передачи, параметров сигнатурной характеристики оборудования и региональной статистики радиоклиматических параметров [13];

$\Omega^{(k-1)*}$ – множество $(k-1)$ ранжированных лучших УП-МП.

Без учета влияния внутрисистемных помех запас на замирания на j -м луче при $T_j = T_j^{(k)}$ определяется выражением

$$M_{j0}(T_j^{(k)}) = T_j^{(k)} + G_{jn} + G_{jr} - L_{oj} - L_j - P_{j \text{пор}}, \quad (7.15)$$

где L_j – дополнительные потери на трассе распространения полезного сигнала на j -м луче, дБ;

$P_{j \text{пор}}$ – пороговый уровень приемников на j -м луче, дБм; остальные обозначения соответствуют обозначениям п. 5.2.

Для $X = X^{(k)}$ величины деградации запаса на замирания на j -м луче $\Delta M_{jn}(X^{(k)})$ и $\Delta M_{jr}(X^{(k)})$ определяются выражениями (5.15) и (5.16), при

этом уровне суммарной мощности внутрисистемных помех для направлений от ОС к УС и от УС к ОС определяются выражениями (7.1) – (7.5) и (7.6) – (7.10).

При условии, что высоты подвеса антенн на j -м луче выбраны в соответствии с критериями допустимости ПВА (3.3), (3.5) или (3.4), (3.5), минимально допустимое значение запаса на замирания на этом луче

$$M_{j\min} = \max[M_{j\min}(SESR); M_{j\min}(UAR)], \quad (7.16)$$

где $M_{j\min}(SESR)$ – минимальный запас на замирания, учитывающий влияние многолучевости и зависящий от требований к показателю $SESR$, определяемый (5.9);

$M_{j\min}(UAR)$ – минимальный запас на замирания, зависящий от требований к показателю неготовности, учитывающему ослабление в дождях, и определяемый (5.12).

В случае, если антенны всех лучей на узловой станции размещены на одинаковой высоте (на одной площадке), в математической модели (7.11) – (7.14) следует исключить условие (7.13).

Алгоритм решения задачи (7.11) – (7.14) предусматривает выполнение двух этапов.

На первом этапе вначале для каждого луча в соответствии с (5.9), (5.12) и (7.16) вычисляется минимально допустимое значение запаса на замирания $M_{j\min}$, после чего для каждого возможного T_j в соответствии с (7.15) вычисляется запас на замирания без учета помех $M_{j0}(T_j)$ и проверяется условие

$$M_{j0}(T_j) \geq M_{j\min}, \quad j = \overline{1, N}. \quad (7.17)$$

Из числа значений МП, удовлетворяющих (7.17), для дальнейшего использования формируются множества $w_j(X)$, $j = \overline{1, N}$.

Кроме этого, на первом этапе для каждого луча вычисляются дополнительные дифракционные потери на трассах распространения учитываемых мешающих сигналов.

На втором этапе решается собственно задача оптимизации МП на сети со звездообразной топологией.

Учитывая несепарабельный характер функций, входящих в условия ограничения (7.12) – (7.14), решение рассматриваемой задачи оптимизации следует выполнять методом прямого перебора допустимых вариантов.

При этом с целью уменьшения объема вычислений за счет исключения повторных вычислений при неизменных исходных данных на каждом шаге прямого перебора вариантов решения целесообразно изменять МП лишь на одном луче.

В этом случае в полном объеме расчет запаса на замирания для каждого луча

$$M_j(X) = M_{j0}(T_j) + \Delta M_j(X), j = \overline{1, N}, \quad (7.18)$$

где

$$\Delta M_j(X) = \max[\Delta M_{jn}(X); \Delta M_{jr}(X)] \quad (7.19)$$

выполняется только на первом шаге перебора.

На всех остальных шагах (при нахождении очередного варианта решения) на j -м луче с измененной МП запас на замирания изменяется только за счет изменения $M_{j0}(T_j)$, а на лучах с неизменной МП запасы на замирания изменяются только за счет изменения деградаций запаса $\Delta M_{in}(X)$ и $\Delta M_{ir}(X)$, $i = \overline{1, N}$, $i \neq j$. При этом в последнем случае для направления передачи от ОС к УС суммарная мощность помех на входе приемника УС i -го луча звезды I_{in} , $i \neq j$ изменяется лишь за счет изменения мощности мешающего сигнала от передатчика ОС j -го луча звезды $I_{in.jr}$, определяемой выражениями, аналогичными (7.2) или (7.3) – (7.5). Остальные составляющие суммарной мощности помех на входе приемника УС i -го луча звезды $I_{in.vr}$, $v \neq i$, $v \neq j$ остаются неизменными.

Подобным образом определяется деградации запаса на замирания $\Delta M_i(X)$, $i \neq j$ для направления от УС к ОС (в случае, если антенны разных лучей на узловой станции размещены на разных высотах). В этом случае мощность мешающего сигнала от передатчика УС j -го луча звезды на входе приемника ОС i -го луча $I_{ir.jn}$, $i \neq j$ определяется выражениями, аналогичными (7.7) или (7.8), (7.10). Остальные составляющие суммарной мощности помех на входе приемника ОС i -го луча звезды $I_{ir.vn}$, $v \neq i$, $v \neq j$ остаются неизменными.

Таким образом, описанный подход основан на использовании относительной коррекции полученных на предшествующем шаге результатов расчета, что и обеспечивает уменьшение объема вычислений. При этом на каждом шаге, начиная со второго, вначале задается новое значение МП на одном, например j -м луче $T_j \in w_j(X)$, затем производится проверка допустимости каждого луча с неизменной МП ($i \neq j$), после чего выполняются ранжирование всех найденных к этому моменту допустимых решений и выбор заданного числа лучших решений задачи.

Для направления от ОС к УС проверка допустимости каждого i -го луча с неизменной МП предусматривает выполнение следующих этапов:

– вычисление мощности мешающего сигнала от передатчика ОС j -го луча на входе приемника УС i -го луча, дБм, определяемой выражениями:

$$I_{in.jr} = T_j + G_{jr} + G_{in} - E_{in}(\Delta\varphi_{ij}) - L_{0j} - L_{in.jr} \quad (7.20)$$

при одинаковой поляризации радиоволн на j -м и i -м лучах звезды и

$$I_{in.jr} = 10 \cdot \lg \left[10^{0,1 I_{in.jr}(H;V/H)} + 10^{0,1 I_{in.jr}(H/V;V)} \right], \quad (7.21)$$

при разной поляризации на j -м и i -м лучах (при этом $I_{in.jr}(H;V/H)$ и $I_{in.jr}(H/V;V)$ определяются выражениями, аналогичными (7.4) и (7.5));

– вычисление суммарной мощности помех на входе приемника УС i -го луча с использованием прежних значений $I_{in.vr}$, $v \neq i$, $v \neq j$, дБм:

$$I_{in} = 10 \cdot \lg \left(\sum_{v=1}^N 10^{0,1 I_{in.vr}} \right), \quad (7.22)$$

в выражениях (7.20) – (7.22) использованы те же обозначения, что и в п. 7.2;

– вычисление деградации запаса на замирения на i -м луче в соответствии с (5.15) и (5.16), дБ;

– вычисление запаса на замирения на i -м луче, дБ,

$$M_i(T_i) = M_{i0}(T_i) - \Delta M_i(X);$$

– проверка условия допустимости i -го луча

$$M_i(T_i) \geq M_{i \min}. \quad (7.23)$$

Если условие (7.23) выполняется для всех $i = \overline{1, N}$, то производится ранжирование рассматриваемого решения относительно найденных ранее решений, по результатам которого выбираются не более K лучших решений, которым соответствуют наименьшие значения $T_{\Sigma}(X^{(k)})$. В случае невыполнения условия (7.23) хотя бы для одного луча рассматриваемая УП-МП считается недопустимой и исключается из дальнейшего рассмотрения.

Аналогично выполняется проверка допустимости для направления передачи от УС к ОС.

Очевидно, общее число проверок допустимости УП-МП

$$J(X) = \prod_{j=1}^N J(T_j), \quad (7.24)$$

где $J(T_j)$ – число условно допустимых значений МП на j -м луче звезды, удовлетворяющих (7.17).

7.4. Совместная оптимизация мощностей передатчиков и частотно-территориальных планов на местных и технологических сетях со звездообразной топологией

Частотно-территориальное планирование (ЧТП) является одной из основных задач проектирования местных и технологических сетей радиосвязи со звездообразной топологией. От распределения частот и видов поляризации на лучах звездообразной трассы зависят эффективность использования частотного ресурса, уровни внутрисистемных помех и региональная электромагнитная обстановка. Очевидно, что наибольшая эффективность достигается при совместной оптимизации мощностей передатчиков и частотно-территориального планирования.

Рассматривается задача многовариантной совместной оптимизации мощностей передатчиков и частотно-территориального планирования на местных и технологических сетях радиосвязи со звездообразной топологией при повторном использовании частот [18, 19]. Как и в п. 7.3, рассматриваемая задача многовариантной оптимизации решается с учетом влияния внутрисистемных помех и существующих требований к обоим нормируемым показателям качества передачи информации: показателю SESR и показателю неготовности [13]. При этом в качестве критерия оптимальности также используется минимум средней мощности передатчиков на лучах, усредненной по всем лучам звезды.

При решении задачи в качестве неизменяемых характеристик используются те же характеристики, что и в п. 7.3.

Введем следующие дополнительные обозначения:

m_j – возможный номер частотной пары на j -м луче;

z_j – возможный вид линейной поляризации (вертикальная или горизонтальная) на j -м луче;

$y_j = \{T_j; m_j; z_j\}$ – элемент множества возможных мощностей передатчиков, номеров пар частот и видов поляризации (МПЧП) на j -м луче;

$Y = \{y_1; y_2; \dots; y_N\}$ – возможная упорядоченная последовательность МПЧП (УП-МПЧП) для N -лучевой звездообразной сети;

$\Omega(Y)$ – дискретное множество всех возможных УП-МПЧП на сети;

$T_j(Y)$ – вариант МП, входящий в состав y_j , а следовательно, и в Y ;

$Y^{(k)} = \{y_1^{(k)}; y_2^{(k)}; \dots; y_N^{(k)}\}$ – k -я ранжированная лучшая УП-МПЧП;

$\Omega^{(k)}(Y)$ – множество УП-МПЧП, на котором определяется k -е ранжированное лучшее решение;

$\Omega^{(k)*}(Y)$ – множество УП-МПЧП, состоящее из k лучших решений.

Математическая модель рассматриваемой задачи многовариантной совместной оптимизации мощностей передатчиков и частотно-территориального планирования аналогична модели (7.11) – (7.14) и может быть записана следующим образом:

найти такие $Y^{(k)} = \{y_1^{(k)}; y_2^{(k)}; \dots; y_N^{(k)}\}$, $k = \overline{1, K}$, для которых средняя МП

$$T_{\Sigma}(Y^{(k)}) = \min_{Y \in \Omega^{(k)}(Y)} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N T_j(Y) \quad (7.25)$$

при условиях:

$$\Delta M_{jn}(Y^{(k)}) \leq M_{j0}(T_j^{(k)}(y_j^{(k)})) - M_{j\min}, j = \overline{1, N}; \quad (7.26)$$

$$\Delta M_{jr}(Y^{(k)}) \leq M_{j0}(T_j^{(k)}(y_j^{(k)})) - M_{j\min}, j = \overline{1, N}; \quad (7.27)$$

$$\Omega^{(1)}(Y) = \Omega(Y); \Omega^{(k)}(Y) = \Omega(Y) \setminus \Omega^{(k-1)*}(Y), k = \overline{2, K}. \quad (7.28)$$

Обозначения в (7.25) – (7.28) аналогичны обозначениям в математической модели (7.11) – (7.14).

В случае, если антенны всех лучей на узловой станции размещены на одинаковой высоте (на одной площадке), в математической модели (7.25) – (7.28) следует исключить условие (7.27).

Алгоритм решения задачи (7.25) – (7.28) также предусматривает выполнение двух этапов и подобен алгоритму, описанному в п. 7.3.

При этом на первом этапе для каждого луча отбираются условно допустимые варианты МПЧП в соответствии с условием

$$M_{j0}(T_j^{(k)}(y_j^{(k)})) \geq M_{j\min}, j = \overline{1, N}. \quad (7.29)$$

На втором этапе на основе метода прямого перебора решается непосредственно задача оптимизации МПЧП на сети со звездообразной топологией. При этом, как и в разд. 7.3, для уменьшения объема вычислений на каждом очередном шаге процесса оптимизации изменяется вариант МПЧП лишь на одном луче и используется относительная коррекция результатов расчета, полученных на предшествующем шаге.

В этом случае на каждом шаге (кроме первого) при изменении МПЧП на j -м луче за счет изменения $T_j(y_j)$ запас на замирания на этом луче изменяется только за счет изменения $M_{j0}(T_j(y_j))$. В то же время запас на замирания на j -м луче остается неизменным при изменении y_j за счет изменения характеристик ЧТП m_j или z_j .

На остальных лучах с неизменными МПЧП запасы на замирания изменяются только за счет изменения деградаций запаса $\Delta M_{in}(Y)$ и $\Delta M_{ir}(Y)$, $i \neq j$ при изменении любых компонентов МПЧП на j -м луче (T_j, m_j или z_j).

При этом суммарные мощности помех на входах приемников i -го луча звезды, $i \neq j$ изменяются лишь за счет мощностей мешающих сигналов от j -го луча, в то время как остальные составляющие суммарных мощностей указанных помех остаются неизменными.

Очевидно, решая последовательно задачу оптимизации мощностей передатчиков для разного возрастающего числа пар частот на всех или некоторых лучах звезды, можно найти минимальное число необходимых пар частот, при котором выполняются условия допустимости (7.26) и (7.27). Это позволяет обеспечить наибольшую эффективность использования частотного ресурса.

Общее число проверок допустимости УП-МПЧП

$$J(Y) = \prod_{j=1}^N J(y_j), \quad (7.30)$$

где $J(y_j)$ – число условно допустимых вариантов МПЧП на j -м луче, удовлетворяющих (7.29):

$$J(y_j) = J(T_j) \times J(m_j) \times J(z_j), \quad (7.31)$$

$J(T_j)$, $J(m_j)$ и $J(z_j)$ – соответственно числа условно допустимых МП, пар частот и видов поляризации на j -м луче.

Из (7.24), (7.30) и (7.31) видно, что в сравнении с алгоритмом, описанным в п. 7.3, рассматриваемый алгоритм совместной оптимизации МП и ЧТП предусматривает неизбежное увеличение объема вычислений, которое зависит от вариантности пар частот и видов поляризации на лучах звезды.

Несмотря на то, что в реальных условиях, число рассматриваемых пар частот на интервале обычно не превышает 3–4, а число видов линейной поляризации не больше двух, при прямом переборе вариантов решение задачи совместной оптимизации приводит к существенному увеличению объема вычислений. Это обуславливает необходимость соответствующего уменьшения вариантности МП на лучах, что ведет к снижению точности решения задачи оптимизации.

Объем необходимых вычислений может быть существенно уменьшен, если перейти от задачи совместной оптимизации МП и ЧТП к решению последовательности задач оптимизации только МП для разных, однозначно заданных и предварительно ранжированных вариантов ЧТП, т. е. вариантов выбора номеров пар частот и видов поляризации на всех лучах. При этом первый ранжированный вариант ЧТП, для которого существует требуемое число лучших решений задачи, удовлетворяющих (7.26) и (7.27), считается безусловно оптимальным.

8. ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА ТРАСС МЕСТНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СЕТЕЙ РАДИОСВЯЗИ С КОЛЬЦЕВОЙ ТОПОЛОГИЕЙ

8.1. Постановка задачи оптимизации и основные этапы ее решения

При проектировании новых местных и ведомственных сетей радиосвязи важной задачей является выбор топологии этих сетей. От выбора топологии зависят затраты на строительство сети, эффективность использования частотного ресурса, необходимые уровни мощностей передатчиков, а следовательно, региональная электромагнитная обстановка, надежность работы сети и показатели качества передачи.

При заданном положении пунктов, которые должны быть соединены, и выбранном типе радиорелейного оборудования в условиях, когда звенья сети, соединяющие соседние пункты, являются одноинтервальными, затраты на строительство сети, зависящие от выбора ее топологии, определяются в основном стоимостью антенных опор, которая зависит от необходимых высот подвеса антенн.

С точки зрения повышения аппаратурной надежности сети, улучшения показателей качества передачи, учитывающих влияние распространения радиоволн, и обеспечения максимально возможной длины интервалов наилучшим видом топологии сети является кольцевая топология, обеспечивающая возможность коммутации направлений приема сигналов на каждом пункте сети. При этом следует отметить, что использование кольцевой топологии сети является эффективным методом борьбы со всеми видами замираний сигналов на интервалах: субрефракционными, интерференционными замираниями, а также с замираниями, обусловленными ослаблением в дождях [20].

Повышение эффективности использования частотного ресурса на сетях с кольцевой топологией достигается за счет использования двухчастотного плана распределения частот.

В реальных условиях выбор конкретного варианта кольцевой топологии сети является многоальтернативной задачей. В этой связи актуальной является задача оптимизации такого выбора [20]. При этом наиболее целесообразной представляется оптимизация выбора варианта кольцевой топологии сети на основе принципа минимума суммарных затрат на все антенные опоры.

Хотя общее число возможных вариантов кольцевой топологии сети при реальном числе пунктов местной или технологической связи (10–30) может быть достаточно большим, на практике обычно нетрудно отобрать относительно небольшое число (как правило, не более 10–15) наиболее предпочтительных вариантов кольцевой топологии трассы. Для каждого из отобранных вариантов трассы необходимо выбрать такие высоты антенн на интервалах, при которых достигаются условно минимальные суммарные затраты на все

опоры сети. После этого выбирается наилучший вариант кольцевой трассы, которому соответствует наименьшая величина указанных суммарных затрат.

При наличии дополнительных неформальных ограничений на последовательность звеньев кольца необходимо найти несколько ранжированных лучших вариантов кольцевой топологии, после чего выбрать лучший вариант с учетом указанных ограничений.

Пример местной (технологической) сети с кольцевой топологией показан на рис. 8.1 (кружками обозначены заданные пункты связи, сплошные линии – звенья (интервалы), входящие в состав выбранного варианта кольцевой топологии сети, пунктирные линии соответствуют возможным альтернативным вариантам сети).

Таким образом, решение рассматриваемой задачи выбора оптимального варианта кольцевой топологии сети включает 3 этапа.

На первом этапе формируется множество звеньев – интервалов, соединяющих заданные пункты связи, которые предположительно могут быть включены в трассу кольцевой РРЛ.

На втором этапе формируются несколько предпочтительных вариантов кольцевой трассы, из числа которых и должен быть выбран оптимальный вариант.

На третьем этапе вначале для каждого из отобранных вариантов трассы определяются минимально возможные затраты на все антенные опоры, после чего выбирается оптимальный вариант кольцевой трассы, которому соответствуют наименьшая величина указанных затрат, или несколько ранжированных лучших вариантов, из числа которых выбирается наилучший с учетом дополнительных неформальных ограничений.

На первом этапе – этапе предварительного отбора интервалов – претендентов на включение в сеть с кольцевой топологией вначале исключаются из рассмотрения априорно недопустимые интервалы (если такие указаны). Затем с учетом трудности или невозможности выполнения требований к показателям качества передачи исключаются слишком протяженные интервалы, соединяющие достаточно удаленные друг от друга пункты сети.

Каждый из оставшихся интервалов вначале проверяется с точки зрения допустимости максимально возможных высот подвеса антенн. Указанная проверка производится в соответствии с критериями, основанными на оценке величин просветов при средней рефракции и субрефракции радиоволн [12, 13]. Интервалы с недопустимыми высотами антенн также исключаются из рассмотрения.

После этого для каждого из оставшихся интервалов проверяется условие допустимости с точки зрения требований к показателям качества

$$M_{0n} \geq M_{n.min}, n = \overline{1, N}, \quad (8.1)$$

и для дальнейшего рассмотрения оставляются лишь интервалы, удовлетворяющие этому условию.

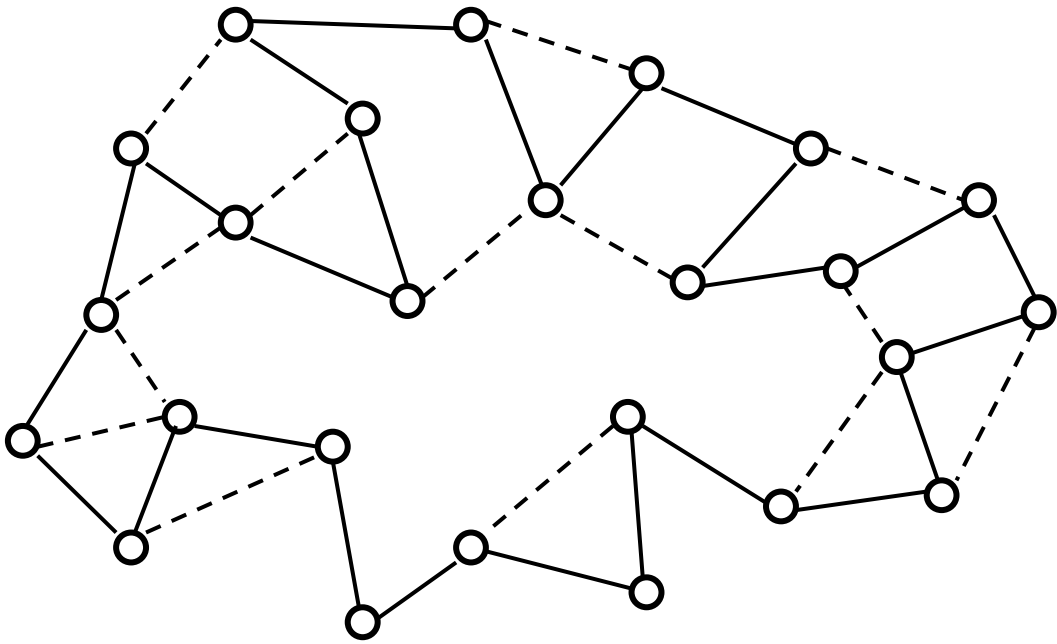


Рис. 8.1. Пример местной (технологической) сети с кольцевой топологией

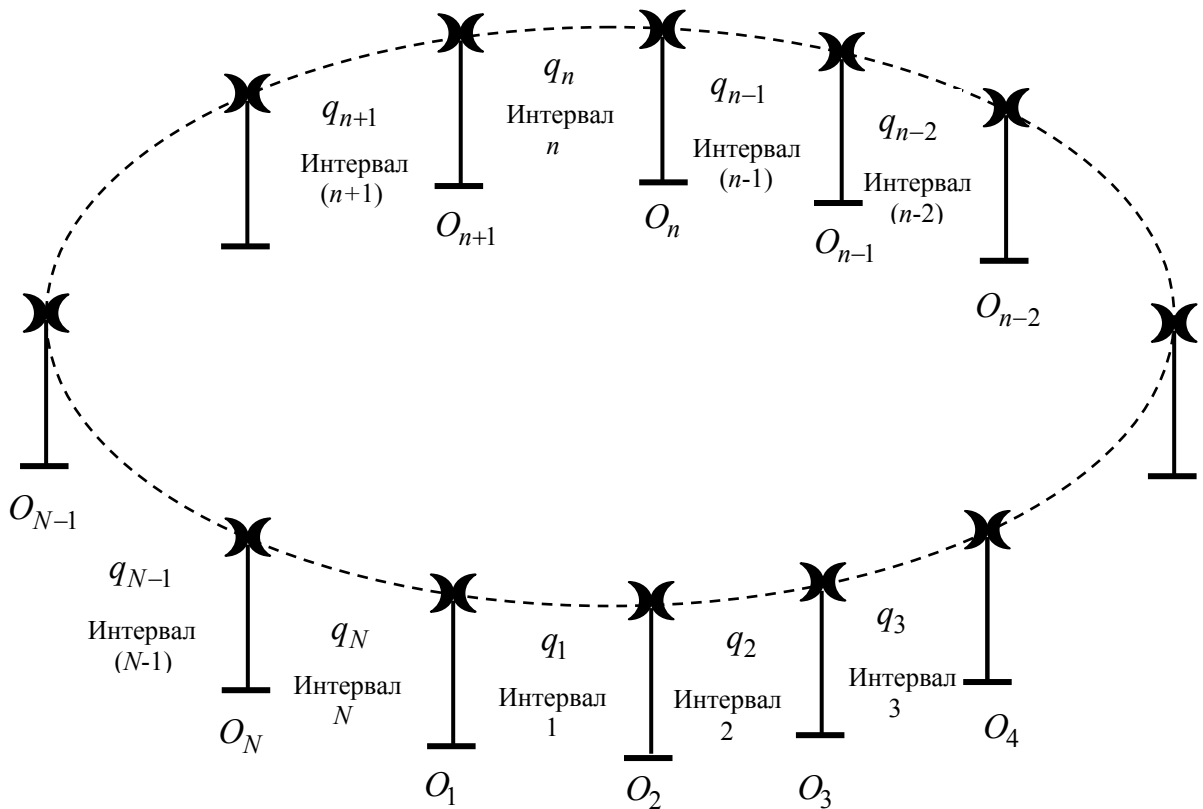


Рис. 8.2. К выбору оптимальных высот антенн в сети с кольцевой топологией

В (8.1) M_{0n} – расчетное значение запаса на замирания на интервале n , а $M_{n.min}$ – минимально допустимое значение запаса на замирания без учета влияния внутрисистемных помех.

Величина M_{0n} зависит от энергетических характеристик радиорелейного оборудования на n -м интервале и определяется выражением

$$M_{0n} = T_n + G_{nl} + G_{nr} - L_{0n} - L_{n.ad} - P_{n.пор}, \quad (8.2)$$

где T_n – мощность передатчиков, дБм;

G_{nl} и G_{nr} – усиления антенн на левом и правом концах интервала, дБ;

L_{0n} – потери в свободном пространстве, дБ,

$L_{0n} = 92,44 + 20\lg f + 20\lg R$ (f – частота, ГГц; R – длина интервала, км);

$L_{n.ad}$ – дополнительные потери на трассе распространения полезного сигнала, дБ;

$P_{n.пор}$ – пороговый уровень приемников на n -м интервале, дБм.

Минимально допустимое значение запаса на замирания

$$M_{n.min} = \max [M_{n.min}(SESR); M_{n.min}(UAR)], \quad (8.3)$$

где $M_{n.min}(SESR)$ – минимальный запас на замирания, учитывающий влияние многолучевости и зависящий от требований к показателю качества по ошибкам для сильно пораженных секунд (показателю $SESR$);

$M_{n.min}(UAR)$ – минимальный запас на замирания, зависящий от требований к показателю неготовности (UAR).

На местных и технологических сетях радиосвязи обычно используется одинарный прием сигналов без резервирования или с резервированием.

При одинарном приеме сигналов

$$M_{n.min}(SESR) = 10\lg \left[P_{0n} / (SESR_{n.max} - SESR_{sn}) \right]. \quad (8.4)$$

При правильно выбранных высотах антенн минимальный запас на замирания, зависящий от требований к показателю неготовности (UAR)

$$M_{n.min}(UAR) = 0,12L_{rn}(0,01\%)(\alpha_r UAR_{n.max})^{-[0,546+0,046\lg(\alpha_r UAR_{n.max})]} \quad (8.5)$$

Необходимые пояснения к выражениям (8.4) и (8.5) содержатся в п. 5.1.

Таким образом, окончательное число оставшихся для дальнейшего рассмотрения интервалов

$$N_{И} = \frac{1}{2} N(N-1) - \bar{N}_{И0} - \bar{N}_{ИR} - \bar{N}_{Ин} - \bar{N}_{Им},$$

где N – число пунктов, образующих рассматриваемую сеть;

$\bar{N}_{И0}$, $\bar{N}_{ИR}$, $\bar{N}_{Ин}$ и $\bar{N}_{Им}$ – соответственно числа интервалов, априорно недопустимых, недопустимых из-за большой протяженности, недопустимых по высотам антенн и недопустимых по величине запаса на замирания.

На втором этапе при формировании множества рассматриваемых вариантов сети с кольцевой топологией, с одной стороны, следует избегать вариантов сети с большими углами излома трасс соседних интервалов, чтобы свести к минимуму влияние помех от сигналов обратного направления (СОН) при недостаточном их ослаблении за счет диаграмм направленности антенн, с другой стороны, необходимо обеспечить достаточную зигзагообразность на 3-интервальных участках трассы, чтобы исключить сильное влияние помех от сигналов прямого прохождения с первой станции на четвертую (СПП).

Критерий достаточной зигзагообразности соответствует увеличению показателя качества по ошибкам (*SESR*) из-за влияния СПП не более чем на 10% от нормируемого значения для каждого направления передачи. Обычно критерий зигзагообразности проверяется на 3-интервальных участках трассы, однако в отдельных случаях может потребоваться проверка и на 5-интервальных участках. Для направления слева-направо на 3-интервальном участке, включающем пункты с номерами (в порядке их соединения) $j, j + 1, j + 2$ и $j + 3$ и соответственно интервалы $j, j + 1$ и $j + 2$ условие достаточной зигзагообразности может быть записано в виде [13]:

$$E_{jl}(\alpha_1) + E_{j+2,r}(\alpha_4) \leq Z_{\max} + 20 \lg \frac{R_{j,j+3}}{R_{j+2}} + L_g(R_{j,j+3}) - \bar{L}(R_{j+2}) - \Delta T_{j,j+2} - \Delta G_{j,j+2},$$

где α_1 и α_4 – соответственно углы между направлениями передачи и приема полезных сигналов и мешающего СПП;

$E_{jl}(\alpha_1)$ и $E_{j+2,r}(\alpha_4)$ – соответственно ослабления СПП за счет диаграмм направленности антенн, излучающей и принимающей СПП, дБ;

Z_{\max} – параметр, зависящий от статистических характеристик тропосферного распространения СПП; можно полагать $Z_{\max} = 45$ дБ для сухопутных трасс и $Z_{\max} = 54$ дБ для приморских трасс;

$R_{j,j+3}$ – длина трассы распространения СПП, км;

R_{j+2} – длина интервала, подверженного воздействию СПП, км;

$L_g(R_{j,j+3})$ – потери в газах тропосферы на трассе распространения СПП, дБ;

$\bar{L}(R_{j+2})$ – средние потери на интервале $j + 2$, дБ;

$\Delta T_{j,j+2}$ – различие мощностей передатчиков СПП и полезного сигнала, дБ;

$\Delta G_{j,j+2}$ – различие коэффициентов усиления антенн, излучающих СПП и полезный сигнал, дБ.

Аналогичным образом оценивается достаточность зигзагообразности трассы для направления справа-налево.

На третьем этапе для окончательного выбора наилучшего варианта кольцевой трассы сети решается задача оптимизации выбора высот подвеса антенн на сети с кольцевой топологией.

8.2. Оптимизация выбора высот антенн на сети с кольцевой топологией

Произвольным образом пронумеруем входящие в кольцевую трассу интервалы и введем следующие обозначения:

N – число интервалов, образующих кольцевую трассу и равное числу пунктов связи;

q_n – возможная (с учетом конструктивных особенностей используемых антенных опор) пара высот антенн (ПВА) на интервале n , $n = \overline{1, N}$;

$Q = \{q_1; q_2; \dots; q_N\}$ – упорядоченная последовательность возможных ПВА (УП-ПВА) на кольцевой трассе (возможная УП-ПВА);

$\Omega(Q)$ – дискретное множество возможных УП-ПВА на всей РРЛ, $Q \in \Omega(Q)$;

$f_n(q_{n-1}; q_n)$ – затраты на n -ю опору, зависящие от ПВА на $(n - 1)$ -м и n -м интервалах, $n = \overline{2, N}$;

$f_1(q_N; q_1)$ – затраты на 1-ю опору, зависящие от ПВА на N -м и 1-м интервалах;

$F(Q)$ – суммарные затраты на все опоры сети для УП-ПВА Q .

Математическая модель рассматриваемой задачи оптимизации высот антенн на сети с кольцевой топологией может быть записана следующим образом: найти УП-ПВА $Q^* = \{q_1^*; q_2^*; \dots; q_N^*\}$, для которой суммарные затраты на все антенные опоры

$$F(Q^*) = \min_{\Omega(Q)} \left[f_1(q_1; q_N) + \sum_{n=2}^N f_n(q_{n-1}; q_n) \right], \quad (8.8)$$

при условиях

$$q_n \in G_{qn}, n = \overline{1, N}, \quad (8.9)$$

где G_{qn} – множество допустимых ПВА на n -м интервале.

Решение задачи (8.8) – (8.9) выполняется в два этапа.

На первом этапе для каждого интервала сети выполняются камеральные работы с использованием топографических карт, на основе которых формируется множество допустимых ПВА G_{qn} , $n = \overline{1, N}$. При этом в качестве критериев допустимости ПВА целесообразно использовать упрощенные критерии, основанные на величинах просвета при средней рефракции и субрефракции радиоволн [17]. Следует отметить, что использование указанных критериев не требует построения профилей интервалов и может быть полностью автоматизировано.

На втором этапе решается задача оптимального выбора УП-ПВА на кольцевой трассе. В принципе решение этой задачи может быть найдено методом простого перебора всех допустимых УП-ПВА, состоящих из допустимых ПВА на интервалах. Однако при решении большинства реальных задач оптимизации с достаточно большой варианностью ПВА на интервалах и большим числе пунктов связи использование прямого перебора вариантов обуславливает исключительно большой объем вычислений.

С учетом сепарабельности целевой функции (8.8) в этих условиях для решения рассматриваемой задачи оптимизации целесообразно использовать метод динамического программирования [10].

В отличие от оптимизации высот антенн на линейной трассе оптимизация на кольцевой трассе предусматривает выполнение цикла вычислений условно минимальной суммарной стоимости всех антенных опор для каждой допустимой ПВА на одном из интервалов. Другими словами, для каждой из указанных ПВА производится условная оптимизация УП-ПВА на всех остальных интервалах. Процедура условной оптимизации имеет многошаговый характер и поясняется на рис. 8.2.

Вначале произвольно выбирается один (любой) из интервалов кольцевой трассы, которому присваивается номер 1. На этом интервале фиксируется одна из допустимых ПВА q_1 , для которой в результате выполнения многошаговой процедуры на основе динамического программирования определяется условно оптимальная УП-ПВА на всей кольцевой трассе.

Рассмотрим алгоритм многошагового процесса нахождения оптимального решения рассматриваемой задачи оптимизации.

На первом шаге рассматривается участок кольцевой трассы, содержащий 1-й и 2-й интервалы. Для каждой допустимой ПВА $q_2 \in G_{q_2}$ на интервале 2 с учетом фиксированной ПВА q_1 определяется стоимость антенной опоры $O_2 - f_2(q_2 / q_1)$.

На втором шаге фиксируется некоторая допустимая ПВА $q_3 \in G_{q_3}$ на интервале 3 и для каждой $q_2 \in G_{q_2}$ вычисляется суммарная стоимость опор O_2 и O_3 :

$$F_3(q_3 / q_2; q_1) = f_3(q_3; q_2) + f_2(q_2 / q_1). \quad (8.10)$$

Осуществляя в (8.10) минимизацию по всем $q_2 \in G_{q_2}$, найдем условно минимальную суммарную стоимость опор O_2 и O_3 :

$$F_3^*(q_3 / q_1) = \min_{q_2 \in G_{q_2}} F_3(q_3 / q_2; q_1) = f_3[q_3; q_2^*(q_3) / q_1] + f_2[q_2^*(q_3) / q_1],$$

где $q_2^*(q_3)$ – условно оптимальная допустимая ПВА на интервале 2, соответствующая фиксированной ПВА q_3 .

Подобные вычисления производятся для всех $q_3 \in G_{q_3}$. Таким образом, в результате выполнения второго шага оптимизации для каждого $q_3 \in G_{q_3}$ имеются условно оптимальная ПВА на интервале 2 $q_2^*(q_3 / q_1)$ и соответствующая ей условно минимальная суммарная стоимость опор O_2 и O_3 – $F_3^*(q_3 / q_1)$.

Аналогично выполняются другие шаги условной оптимизации.

Пусть на некотором произвольном шаге рассматривается участок кольцевой трассы, содержащий 1, 2, ..., n -й интервалы. Предположим, что в результате выполнения предшествующего шага оптимизации, на котором рассматривался участок ЦРРЛ, содержащий 1, 2, ..., $(n - 1)$ -й интервалы, для каждой допустимой ПВА $q_{n-1} \in G_{q_{n-1}}$ найдены условно оптимальная УП-ПВА на интервалах 2, 3, ..., $(n - 2)$:

$$Q_{n-2}^*(q_{n-1} / q_1) = \{q_2^*(q_{n-1} / q_1); q_3^*(q_{n-1} / q_1); \dots; q_{n-2}^*(q_{n-1} / q_1)\}$$

и соответствующая ей условно минимальная суммарная стоимость $F_{n-1}^*(q_{n-1} / q_1)$ опор O_2, O_3, \dots, O_{n-1} .

Предположим теперь, что фиксирована $q_n \in G_{q_n}$. Выберем некоторую допустимую ПВА $q_{n-1} \in G_{q_{n-1}}$ и найдем суммарную стоимость опор O_2, O_3, \dots, O_n :

$$F_n(q_n / q_{n-1}; q_1) = f_n(q_n; q_{n-1}) + F_{n-1}^*(q_{n-1} / q_1).$$

После вычисления $F_n(q_n / q_{n-1}; q_1)$ для всех $q_{n-1} \in G_{q_{n-1}}$ запишем функциональное уравнение, определяющее условно минимальную суммарную стоимость опор O_2, O_3, \dots, O_n при фиксированном q_n :

$$F_n^*(q_n / q_1) = \min_{q_{n-1} \in G_{q_{n-1}}} F_n(q_n / q_{n-1}; q_1) = f_n[q_n; q_{n-1}^*(q_n) / q_1] + F_{n-1}^*[q_{n-1}^*(q_n) / q_1],$$

где $q_{n-1}^*(q_n)$ – условно оптимальная ПВА на интервале $(n - 1)$, соответствующая фиксированной ПВА q_n , а $F_{n-1}^*[q_{n-1}^*(q_n) / q_1]$ – найденные на предшествующем шаге условно минимальные затраты.

Полученной стоимости $F_n^*(q_n / q_1)$ соответствует условно оптимальная УП-ПВА на интервалах 2, 3, ..., $(n - 1)$:

$$Q_{n-1}^*(q_n / q_1) = \{q_2^*(q_n / q_1); q_3^*(q_n / q_1); \dots; q_{n-1}^*(q_n / q_1)\}.$$

Подобные вычисления производятся для всех $q_n \in G_{q_n}$. Таким образом, в результате выполнения рассматриваемого шага оптимизации для каждого

допустимого $q_n \in G_{q_n}$ имеются условно оптимальная УП-ПВА на интервалах $2, 3, \dots, (n-1)$ $Q_{n-1}^*(q_n / q_1)$ и соответствующая ей условно минимальная стоимость $F_n^*(q_n / q_1)$ антенных опор O_2, O_3, \dots, O_n .

На последнем шаге рассматривается вся кольцевая трасса. Вначале для каждого $q_N \in G_{q_N}$ находится условно оптимальная УП-ПВА на $2, 3, \dots, (N-1)$ -м интервалах $Q_{N-1}^*(q_N / q_1)$ и соответствующая условно минимальная стоимость $F_N^*(q_N / q_1)$ опор O_2, O_3, \dots, O_N . После этого определяются условно оптимальная УП-ПВА на интервалах $2, 3, \dots, N$ $Q_N^*(q_1)$ и соответствующая условно минимальная суммарная стоимость всех опор кольцевой трассы

$$F_N^*(q_1) = \min_{q_N \in G_{q_N}} \left[F_N^*(q_N / q_1) + f_1(q_N; q_1) \right].$$

Для нахождения безусловно оптимальной УП-ПВА на всей кольцевой трассе Q^* выполняется цикл вычислений суммарной стоимости всех опор, соответствующих всем $q_1 \in G_{q_1}$.

При этом безусловно минимальная суммарная стоимость всех антенных опор на кольцевой трассе

$$F(Q^*) = \min_{q_1 \in G_{q_1}} F_N^*(q_1).$$

Для ориентировочной оценки объема вычислений при оптимизации выбора высот антенн на кольцевой трассе используем общее число вычислений частных значений целевой функции.

Нетрудно убедиться, что при оптимизации на основе динамического программирования общее число вычислений значений целевой функции

$$V_{\text{КДП}} = \left(J_2 + \sum_{n=3}^N J_n J_{n-1} \right) J_1,$$

где J_n – вариантность ПВА на n -м интервале.

При этом верхняя граница $V_{\text{КДП}}$:

$$\sup V_{\text{КДП}} = J^2 + (N-2)J^3, \text{ где } J = \max_n J_n.$$

При оптимизации на основе прямого перебора вариантов УП-ПВА верхняя граница общего числа вычислений значений целевой функции $\sup V_{\text{КПП}} = J^N$.

Как видно, в отличие от прямого перебора оптимизация на основе динамического программирования обеспечивает возможность решения задачи оптимального выбора высот антенн на кольцевой трассе при любых реальных значениях числа интервалов и вариантности ПВА на интервалах.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Пример оптимизации выбора высот антенн на многоинтервальной РРЛ с использованием динамического программирования

Рассмотрим пример оптимизации высот антенн на 8-интервальном участке РРЛ методом динамического программирования. Пусть на предварительном этапе оптимизации для каждого из 8-ми интервалов отобраны по 4 нехудшие допустимые ПВА (табл. П.1).

Предположим, что на всех интервалах используются однотипные секционные опоры-мачты, для которых зависимость стоимости от высоты определяется табл. П.2.

Процесс пошаговой оптимизации поясняется табл. П.3 – П.9, которые содержат стоимости отдельных опор и суммарные стоимости опор для участков РРЛ (жирным шрифтом выделены условно минимальные суммарные стоимости опор на участках).

Как видно из табл. П.9, безусловно минимальные затраты на все опоры рассматриваемой РРЛ равны 235,82 тыс. у. е. Указанные затраты обеспечиваются при использовании на интервалах ПВА, выделенных жирным шрифтом в табл. П.1. Более наглядно рассматриваемые ПВА на интервалах и безусловно оптимальная УП-ПВА для всей 8-интервальной РРЛ (жирная линия) показаны на рис. П.1.

Таблица П. 1

Нехудшие допустимые пары высот антенн на интервалах, м							
1	2	3	4	5	6	7	8
50 – 80	53 – 100	70 – 110	55 – 90	50 – 95	70 – 110	50 – 90	30 – 80
60 – 70	65 – 85	85 – 95	70 – 75	70 – 85	80 – 95	65 – 80	50 – 65
65 – 52	80 – 80	95 – 75	85 – 70	92 – 75	90 – 80	70 – 63	70 – 57
90 – 40	95 – 65	105 – 60	100 – 60	106 – 74	105 – 65	85 – 40	85 – 42

Таблица П. 2

Высота опоры, м	30	36	42	48	54	60	72	78	90	102	108	120
Стоимость опоры, тыс. у. е.	11,06	13,76	15,11	16,48	18,42	20,58	23,82	26,04	33,06	35,94	37,75	41,92

Таблица П. 3 (шаг 1)

$\begin{matrix} \text{И 8} \\ \text{И 7} \end{matrix}$	30 – 80	50 – 65	70 – 57	85 – 42
50 – 90	$33,06+33,06=66,12$	$33,06+23,82=56,88$	$33,06+20,58=53,64$	$33,06+15,11=48,17$
65 – 80	$33,06+33,06=66,12$	$33,06+23,82=56,88$	$33,06+20,58=53,64$	$33,06+15,11=48,17$
70 – 63	$23,82+33,06=56,88$	$23,82+23,82=47,64$	$23,82+20,58=44,40$	$33,06+15,11=48,17$
85 – 40	$15,11+33,06=48,17$	$18,42+23,82=42,24$	$23,82+20,58=44,40$	$33,06+15,11=48,17$

Таблица П. 4 (шаг 2)

$\begin{matrix} \text{И 7} \\ \text{И 6} \end{matrix}$	50 – 90	65 – 80	70 – 63	85 – 40
70 – 110	$41,92+48,17=90,09$	$41,92+48,17=90,19$	$41,92+44,40=86,32$	$41,92+42,24=84,16$
80 – 95	$35,94+48,17=84,11$	$35,94+48,17=84,11$	$35,94+44,40=80,34$	$35,94+42,24=78,18$
90 – 80	$33,06+48,17=81,23$	$33,06+48,17=81,23$	$33,06+44,40=77,46$	$33,06+42,24=75,30$
105 – 65	$23,82+48,17=71,99$	$23,82+48,17=71,99$	$23,82+44,40=68,22$	$33,06+42,24=75,30$

Таблица П. 5 (шаг 3)

$\begin{matrix} \text{И 6} \\ \text{И 5} \end{matrix}$	70 – 110	80 – 95	90 – 80	105 – 65
50 – 95	$35,94+84,16=120,10$	$35,94+78,18=114,12$	$35,94+75,30=111,24$	$37,75+68,22=105,97$
70 – 85	$33,06+84,16=117,22$	$33,06+78,18=111,24$	$33,06+75,30=108,36$	$37,75+68,22=105,97$
92 – 75	$26,04+84,16=110,20$	$33,06+78,18=111,24$	$33,06+75,30=108,36$	$37,75+68,22=105,97$
106 – 74	$26,04+84,16=110,20$	$33,06+78,18=111,24$	$33,06+75,30=108,36$	$37,75+68,22=105,97$

Таблица П. 6 (шаг 4)

$\begin{matrix} \text{И 5} \\ \text{И 4} \end{matrix}$	50 – 95	70 – 85	92 – 75	106 – 74
55 – 90	$33,06+105,97=139,03$	$33,06+105,97=139,03$	$35,94+105,97=141,91$	$37,75+105,97=143,72$
70 – 75	$26,04+105,97=132,01$	$26,04+105,97=132,01$	$35,94+105,97=141,91$	$37,75+105,97=143,72$
85 – 70	$23,82+105,97=129,79$	$23,82+105,97=129,79$	$35,94+105,97=141,91$	$37,75+105,97=143,72$
100 – 60	$20,58+105,97=126,55$	$23,82+105,97=129,79$	$35,94+105,97=141,91$	$37,75+105,97=143,72$

Таблица П. 7 (шаг 5)

И 3 \ И 4	55 – 90	70 – 75	85 – 70	100 – 60
70 – 110	41,92+139,03=180,95	41,92+132,01=173,93	41,92+129,79=171,71	41,92+126,55=168,47
85 – 95	35,94+139,03=174,97	35,94+132,01=167,95	35,94+129,79=165,73	35,94+126,55=162,49
95 – 75	26,04+139,03=165,07	26,04+132,01=158,05	33,06+129,79=162,85	35,94+126,55=162,49
105 – 60	20,58+139,03=159,61	23,82+132,01=155,83	33,06+129,79=162,85	35,94+126,55=162,49

Таблица П. 8 (шаг 6)

И 2 \ И 3	70 – 110	85 – 95	95 – 75	105 – 60
53 – 100	35,94+168,47=204,41	35,94+162,49=198,43	35,94+158,05=193,99	37,75+155,83=193,58
65 – 85	33,06+168,47=201,53	33,06+162,49=195,55	35,94+158,05=193,99	37,75+155,83=193,58
80 – 80	33,06+168,47=201,53	33,06+162,49=195,55	35,94+158,05=193,99	37,75+155,83=193,58
95 – 65	23,82+168,47=192,29	33,06+162,49=195,55	35,94+158,05=193,99	37,75+155,83=193,58

Таблица П. 9 (шаг 7)

И 1 \ И 2	53 – 100	65 – 85	80 – 80	95 – 65
50 – 80	51,48+193,58=245,06	51,48+193,58=245,06	51,48+193,58=245,06	54,36+192,29=246,65
60 – 70	44,40+193,58=237,98	44,40+193,58=237,98	53,64+193,58=247,22	56,52+192,29=248,81
65 – 52	42,24+193,58=235,82	47,64+193,58=241,22	56,88+193,58=250,46	59,76+192,29=252,05
90 – 40	51,48+193,58=245,06	56,88+193,58=250,46	66,12+193,58=259,70	69,00+192,29=261,29

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бутенко, В. В.* Цифровизация сети РРЛ прямой видимости / В. В. Бутенко Вестник связи. – 2009. – № 8. – С. 15–21.
2. Радиорелейные линии связи во второй декаде XXI века // Вестник связи. – 2011. – № 2.
3. *Лаврентьев, М.* Транспорт по «телеком-бездорожью» / М. Лаврентьев Технологии и средства связи. – 2011. – № 3.
4. *Матвиив, Р. М.* Цифровые РРЛ в транспортной сети связи / Р. М. Матвиив Вестник связи. – 2008. – № 4.
5. ITU-R Recommendation F.746-9. Radio-frequency arrangements for fixed service systems, 2007. – 17 с.
6. Правила применения цифровых радиорелейных систем связи плезиохронной цифровой иерархии. Ч. 1. – М., 2007. – 16 с.
7. Правила применения цифровых радиорелейных систем связи синхронной цифровой иерархии. Ч. 2. – М., 2007. – 36 с.
8. ITU-T Recommendation G.826. End-to-end error performance parameters and objectives for international, constant bit-rate digital paths and connections, 2002. – 34 с.
9. ITU-T Recommendation G.827. Availability performance parameters and objectives for end-to-end international constant bit-rate digital paths, 2003. – 26 с.
10. *Моисеев, Н. Н.* Методы оптимизации / Н. Н. Моисеев, Ю. П. Иванюков, Е. М. Столярова – М. : Наука, 1978.
11. *Данилович, О. С.* Оптимизация радиотехнических систем на основе многовариантного динамического программирования / О. С. Данилович // Радиотехника. – 1990. – № 4. – С. 13 – 17.
12. Проектирование цифровых радиорелейных линий. Выбор высот подвеса антенн: учеб. пособие (спец. 210400) / О. С. Данилович ; ГОУВПО СПбГУТ. – СПб, 2008. – 82 с.
13. Методика расчета трасс цифровых РРЛ прямой видимости в диапазоне частот 2 – 20 ГГц. – М. : ЗАО «Инженерный центр», 1998. – 233 с.
14. *Данилович, Д. А.* Оптимизация высот подвеса антенн на многоинтервальных цифровых РРЛ с учетом дополнительных неформальных ограничений / Д. А. Данилович, М. А. Сиверс, С. П. Зайцев // Электросвязь. – 2008. – № 7. – С. 36 – 38 .
15. *Данилович, О. С.* Расчет показателей качества передачи при проектировании цифровых радиорелейных линий / О. С. Данилович. – СПб. : Линк, 2009. – 76 с.
16. *Данилович, Д. А.* Оптимизация уровней мощности передатчиков на цифровых РРЛ с учетом внутрисистемных помех и дополнительных ограничений / Д. А. Данилович, О. С. Данилович // Труды учебных заведений связи / СПбГУТ. – СПб, 2007. – № 175. – С. 217 – 222.

17. ITU-R Recommendation P.530-13. Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems, 2009. – 49 с.

18. *Данилович, Д. А.* Совместная оптимизация распределения мощностей передатчиков и частотно-территориального планирования в системах радиодоступа // Международный телекоммуникационный симпозиум «Мобильная связь» : мат-лы / Д. А. Данилович ; СПбГУТ. – СПб., 2007. – С. 96 – 102.

19. *Данилович, Д. А.* Оптимизация мощностей передатчиков и частотно-территориального планирования на сетях радиосвязи со звездообразной топологией / Д. А. Данилович, О. С. Данилович, Н. Н. Бабин // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 4. – С. 67 – 75.

20. *Данилович, Д. А.* Оптимизация выбора трасс местных и технологических сетей радиосвязи с кольцевой топологией / Д. А. Данилович, О. С. Данилович // Техника связи. – 2010. – № 2. – С. 24 – 30.

Данилович Олег Сигизмундович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ
РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ЛИНИЙ И СЕТЕЙ СВЯЗИ**

Учебное пособие

Редактор Л. А. Медведева

План 2013 г., п. 72

Подписано к печати 18.03.2013
Объем 5,25 усл.-печ. л. Тираж 125 экз. Заказ 283
Издательство СПбГУТ. 191186 СПб., наб. р. Мойки, 61
Отпечатано в СПбГУТ