РАДИОРЕЛЕЙНЫЕ ЛИНИИ СВЯЗИ

Коммуникация - это процесс установления связи между двумя точками пространства и передачи информации между ними. Радиосвязь – это телекоммуникация, осуществляемая посредством радиоволн и радиосигналов. Информация передаётся в виде сигнала. Сигналом может быть всё от импульсов и до различных параметров электромагнитных колебаний.

*Радиорелейная связь* основана на многократной ретрансляции (переизлучении) радиосигналов, передаваемых радиоволнами дециметровых и более коротких диапазонов станциями, расположенными на поверхности Земли. Цепочка приёмо-передающих станций, расположенных на расстояниях устойчивой радиосвязи, называется *радиорелейной линией* (РРЛ) прямой видимости (название происходит от английского «relay»). Наиболее подходящий перевод слова «relay» для понимания сути работы РРЛ - «эстафета», то есть поэтапная передача информации. Радиорелейные линии связи (РРС) относятся к *наземным*, *фиксированным* и *беспроводным* системам передачи информации и характеризуются рабочим диапазоном частот, скоростью передачи информации, излучаемой мощностью, диаграммой направленности приёмо-передающих антенн, средой распространения.

Технические средства и среда распространения радиоволн образуют *радиорелейную линию* связи. Промежуток между двумя ближайшими станциями называется *пролётом* РРЛ. Протяжённость пролёта зависит от многих причин и достигает 50 - 60 км в диапазонах частот до 2 - 8 ГГц и нескольких км в диапазонах 30 - 50 ГГц.

Совокупность приёмопередающего оборудования на пролёте образует  *ствол* РРЛ. Различаются однонаправленные и двунаправленные (для дуплексной связи) стволы. Примерами однонаправленных стволов являются линии телевизионного и радиовещания, передача изображений радиолокационных станций, передача скоростных потоков данных и т.п. В РРЛ с большой нагрузкой образуются многоствольные структуры с различным количеством используемых частот.

По радиорелейным линиям можно передавать телевизионные сигналы, сигналы звукового вещания, а так же организовать в одной радиорелейной линии до нескольких тысяч телефонных каналов.

Общая классификация РРЛ

В зависимости от *места* в сети связи РРЛ подразделяются на:

 - *местные* линии, которые соединяют станции телефонные общего пользования (СТОП) в пределах города, районный центр с селом и т.д.;

 - *зоновые* линии с условной средней ёмкостью 60…600 каналов ТЧ для внутриобластных регионов, связь между городами области;

 - *магистральные* линии большой протяжённости относятся к межгосударственным системам;

- *технологические* или *корпоративные* линии используются для телекоммуникационных организаций связи при эксплуатации нефтепроводов и газопроводов, финансово-экономических и оборонных учреждений и др.

**Частотная классификация РРЛ**

В настоящее время освоен весьма широкий выделенный Международным Союзом Электросвязи (МСЭ) для фиксированной связи диапазон рабочих частот с помощью РРЛ. Для работы РРЛ выделено 19 полос частот в диапазонах: 1,4; 2; 4; 5; 6; 7; 8; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 18; 23; 27; 31; 38; 55 ГГц (15 см – 5 мм).

Выбор указанных диапазонов обусловлен необходимостью организации большого количества каналов, каждый из которых должен иметь достаточно широкую полосу пропускания (для 1000 каналов ширина полосы пропускания должна быть не менее 4 МГц). Рассмотрим характеристики некоторых из выделенных диапазонов.

### **Диапазон 2 ГГц (15 см) (1.7**÷**2.1 ГГц).** С учётом частотной зависимости затухания мощности радиосигнала в свободном пространстве этот диапазон обладает возможностью распространения сигналов на  достаточно больших  пролётах (до 50-80 км). Устойчивость распространения радиоволн в сильной степени зависит от экранирующего действия препятствий на интервалах РРЛ при атмосферной рефракции. В этом диапазоне волн антенны обладают весьма большими габаритами, и поэтому коэффициенты усиления не превышают 35-38 дБ при диаметрах параболических антенн до 5 м. С уменьшением размеров антенн эффективность системы связи резко падает.  Диапазон подвержен влиянию помех от других радиотехнических средств.

### **Диапазон 4 ГГц (7,5 см) (3.4**÷**3.9 ГГц) -** наиболее освоенный и загруженный РРЛ диапазон частот. В этом диапазоне работают многие магистральные системы связи. Характеризуется возможностью получать довольно протяжённые линии (40-55 км) при  хороших качественных показателях. Остронаправленные антенны (с коэффициентами усиления порядка 40 дБ) обладают значительными габаритами и весом и, следовательно, требуют весьма дорогостоящих антенных опор.

На распространение сигналов оказывает существенное воздействие атмосферная рефракция, приводящая к экранированию сигнала препятствиями на пролётах, и интерференция прямых и отражённых волн. Диапазон сложен с точки зрения электромагнитной совместимости, так как в нём работает множество радиотехнических средств.

### **Диапазон 6 ГГц (5 см) (5.6**÷**6.2 ГГц) -** популярный в последние десятилетия диапазон частот, предназначенный для магистральных систем связи. Позволяет получить достаточно эффективные системы РРЛ, передающие большие объёмы информации. Средняя протяжённость пролёта достигает 40-45 км. Размеры антенн не слишком велики (например, антенна с коэффициентом усиления 43 дБ имеет диаметр 3.5 м). На распространение сигналов оказывает существенное воздействие атмосферная рефракция, приводящая к экранированию сигнала препятствиями на пролётах, и интерференция прямых и отражённых волн.

### **Диапазон 8 (3,75 см) ГГц (7.9**÷**8.4 ГГц)** освоен достаточно хорошо. В нём работает большое количество радиорелейных систем средней ёмкости, имеющих 300-700 телефонных каналов в стволе для аналоговых и до 55 Мбит/с - для цифровых систем. Существует и аппаратура большой ёмкости, предназначенная для передачи потоков STM-1. В этом диапазоне на распространение сигнала начинают оказывать влияние гидрометеоры (дождь, снег, туман и пр.). Средняя протяжённость пролёта РРЛ составляет 30÷40 км. Антенны имеют высокий коэффициент усиления при диаметрах около 1.5 ÷ 2.5 м.

Число радиосредств, использующих этот диапазон, пока относительно невелико, и, следовательно, электромагнитная обстановка благополучна. Однако необходимо учитывать помехи от соседних радиорелейных линий, работающих в данном диапазоне частот.
    В настоящее время диапазон применяется для организации региональных линий связи и различных ответвлений от магистральных систем. Многие фирмы хорошо освоили производство аппаратуры и предлагают на рынке широкий спектр аналоговых и цифровых систем как средней, так и большой ёмкости.

**Диапазоны 11 и 13 ГГц  (2,5 см) (10.7**÷**11.7, 12.7**÷**13.2 ГГц)** перспективны с точки зрения эффективности систем РРЛ. При протяжённости пролёта 15-30 км, высокоэффективные антенны имеют небольшие габариты и вес, что обеспечивает относительную дешевизну антенных опор.

Доля влияния атмосферной рефракции на устойчивость работы систем уменьшается, но увеличивается влияние гидрометеоров.   В этих диапазонах, в основном, строятся цифровые радиорелейные системы связи на скорости до 55 Мбит/с, хотя, есть примеры передачи цифровых потоков со скоростями до 155 Мбит/с.

Аппаратура часто строится в виде моноблоков, т.е. приёмопередатчики объединены с антенной и располагаются на вершине антенной опоры. Эти диапазоны используют большое количество разнообразных радиосредств. Спутниковые системы связи, различные радиолокаторы и пеленгаторы, охранные системы создают неблагоприятную электромагнитную обстановку, что затрудняет работу в данных диапазонах.

### **Диапазоны 15 и 18 ГГц (14.5**÷**15.35, 17.7**÷**19.7 ГГц).** Интенсивное развитие систем связи привело к бурному освоению этих диапазонов частот. Средняя протяжённость пролётов достигает 20 км для зон с умеренным климатом. Аппаратура выполняется в виде моноблока. Типовые параболические антенны имеют диаметры 0.6, 1.2 или 1.8 м при коэффициентах усиления от 38 до 46 дБ. В ряде регионов СНГ диапазон 15 ГГц уже перегружен радиосредствами. Диапазон 18 ГГц пока более  свободен.

На распространение сигналов сильное влияние оказывают гидрометеоры и интерференция прямых и отражённых волн. Ослабление в дожде может составлять 1÷12 дБ/км (при интенсивности дождей 20-160 мм/час). Некоторое влияние оказывает и сама атмосфера (молекулы кислорода и воды), ослабление в которой достигает 0.1 дБ/км.

  **Диапазон 23 ГГц (21.2**÷**23.6 ГГц).** В этом диапазоне разрешено строить  системы аналоговой и цифровой связи любой ёмкости. Средняя протяжённость пролётов меньше 20 км, так как на распространение сигналов сильное влияние оказывают гидрометеоры и ослабления в атмосфере. Желательно использовать вертикальную поляризацию радиоволн, хотя разрешено использование любой поляризации. Типовые параболические антенны имеют диаметры 0.3, 0.6 и 1.2 м.

Ослабление в дождях может быть от 2 до 18 дБ/км, а в атмосфере достигает 0.2 дБ/км. Диапазон разрешено использовать в спутниковых системах связи. Поэтому при расчётах необходимо учитывать возможность помех и электромагнитной совместимости.

### **Диапазон 27 ГГц (25.25**÷**27.5 ГГц)** предназначен для построения систем фиксированной радиосвязи. Он характеризуется погонным ослаблением сигнала в атмосфере меньше 0.1 дБ/км. Средняя рекомендуемая протяжённость пролёта 12 км. Ослабление в дождях  3-24 дБ/км. Антенны имеют диаметр 0,3 ÷  0,6 м.

### **Диапазон 38 ГГц (37**÷**39.5, 38.6**÷**40 ГГц).** В этом диапазоне разрешено строить  системы аналоговой и цифровой связи любой ёмкости. Протяжённость пролёта меньше 8 км. В случае если показатель неготовности линии связи соответствует локальному качеству, протяжённость интервала можно довести до 15 км.

Аппаратура представляет собой моноблок с антенной диаметром 0.3 м. Используется только вертикальная поляризация, так как, при этом получается лучшая устойчивость системы связи при наличии дождей.

Ослабление в атмосфере составляет порядка 0.12 дБ/км, а в гидрометеорах при интенсивности дождей от 20 до 160 мм/час от 5 до 32 дБ/км.

### **Диапазон 55 ГГц (0,54 см) (54.25**÷**57.2 ГГц).** Протяжённость пролёта составляет несколько километров при антеннах диаметром 15 см. Ослабление сигнала в атмосфере до 5 дБ/км, а в дождях - от 7 до 40 дБ/км.

### **Диапазон 58 ГГц (0,517 см) (57.2**÷**58.2 ГГц).** Необходимо учитывать, что этот диапазон является почти предельным для создания радиосистем, так как на частотах выше 60 ГГц наблюдается непрозрачность атмосферы для радиоволн из-за поглощения энергии в атомах кислорода (резонансные частоты поглощения равны 60 и 120 ГГц). Однако, в последние годы, появился интерес к этим диапазонам для создания безлицензионных радиосистем с пролётами протяжённостью 1-2 км.

В условиях очень сухого климата, при малой вероятности осадков или на коротких пролётах, может использоваться диапазон частот 84-93 ГГц и выше.

**Типы РРЛ станций**

Все радиорелейные станции в зависимости от мест их расположения, назначения и комплектации подразделяются на оконечные, промежуточные и узловые станции.



***f H***

***f B***

**ПРС**

**ОРС**

**ОРС**

**ПРС**

**УРС**

**1÷50 км**



####

####  Рисунок 1- Радиорелейные линии прямой видимости

*Оконечные радиорелейные станции* (ОРС) – расположены на концах магистральной линии или на концах линий, ответвляемых от магистральной линии. Они содержат модуляторы и передатчики в направлении передачи сигналов и приёмники с демодуляторами в направлении приёма. Для приёма и передачи применяется одна антенна, соединенная с трактами приёма и передачи при помощи антенного разветвителя (дуплексера) и общие радиофильтры (РФ). Модуляция и демодуляция сигналов проводится на одной из стандартных промежуточных частот (70 - 1000 МГц). При этом модемы могут работать с приёмопередатчиками, использующими различные частотные диапазоны. Передатчики предназначены для преобразования сигналов промежуточной частоты в рабочий диапазон СВЧ, а приёмники - для обратного преобразования и усиления сигналов промежуточной частоты. На ОРС производится введение и выделение сообщений, передаваемых по РРЛ. ОРС связываются с междугородными телефонными станциями (МТС), междугородными телевизионными аппаратными (МТА) и междугородными вещательными аппаратными (МВА), которые являются основными источниками информации, передаваемой по РРЛ.

***Д***

***М***

***R***

***Т***

**РФ**

***fсм***

***Оконечная станция РРЛ***

***Информационный***

***сигнал***



 Рис. 2 - Блок-схема оконечной станции РРЛ

На ОРС всегда имеется обслуживающий персонал, обеспечивающий исправность аппаратуры не только данной ОРС, но и нескольких подчинённых ПРС на участке резервирования. Упрощённая структурная схема оконечной станции показана на рис. 2.

*Промежуточные радиорелейные станции* (ПРС) *-* предназначены для приёма модулированных радиоволн от предыдущей станции, их усиления и передачи в направлении последующей станции. Приём и передача сигналов на промежуточных станциях должны проводиться на разных частотах для устранения паразитных связей в приёмопередатчиках за счёт  влияния обратного излучения близко расположенных антенн. Разница между частотами приёма и передачи называется частотой *сдвига* (Δ*fсдв*). Этот вопрос более подробно будет рассмотрен в разделе «частотное планирование». Эти станции оборудованы автоматизированной аппаратурой и не обеспечиваются обслуживающим персоналом. Управление и мониторинг работы аппаратуры ПРС производится дистанционно с ОРС или УРС.

На рис. 3 показана структурная схема промежуточной станции.

**РФ**

***Т***

***R***

***R***

***Т***

**РФ**

***f*2 = *f*1±Δ*fсдв***

***f*1**

***f*1(*f*3)**

***f*2(*f*4)**

***f*2**

***fдр***

***Промежуточная станция РРЛ***



 Рис. 3 - Блок-схема промежуточной станции РРЛ

*Узловые радиорелейные станции* (УРС) *–* так же как и ОРС, имеют обслуживающий технический персонал. Узловые станции (рис. 4) выполняют как функции промежуточных станций, так и функции ввода и вывода информации.

***Д***

***М***

***R***

***Т***

**РФ**

***fпч***

***T***

***R***

***М***

***Д***

**РФ**

***fпч***

***Узловая станция РРЛ***

**Аппаратура ввода и**

**вывода информации**



 Рис. 4 - Блок-схема узловой станции РРЛ

Поэтому они устанавливаются  в крупных населённых пунктах или в точках ответвления  линий связи. Устанавливаются УРС в тех пунктах трассы РРЛ, где требуется производить выделение или замену программ телевидения. Выделенные телефонные, телевизионные или другие сообщения далее подаются к соответствующим потребителям.

**Частотное планирование**

Широкое развитие информационных радиосетей вынуждает строго регламентировать использование рабочих частот в выделенных диапазонах волн. Чтобы уменьшить взаимные помехи, рабочие частоты стволов располагаются по определённому плану, определяемому Регламентом радиосвязи. Регламент радиосвязи – основной международный документ, регулирующий все вопросы радиосвязи. Для РРС международный союз электросвязи МСЭ разработал следующие рекомендации: Т 338-4, F385,  [Р387-2](http://vlobatch.narod.ru/Book/Literat.htm#9), G.826, Р.837.

На рис. 5 показан пример распределения рабочих частот для системы РРЛ, работающей в диапазоне 11 ГГц.

***В***

**Передача-Приём**

 **40 МГц**

 **530 МГц**

 **130 МГц**

**11700**

**МГц**

**10700**

**МГц**

**Приём-**

**Передача**

 **1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12**

 **80 МГц**

 **1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12**

***Н***

Рис. 5 – Рекомендованный план частотного распределения в диапазоне 11 ГГц

Весь диапазон вмещается между 10700 и 11700 МГц и состоит из двух частей. Сдвиг между частями составляет 90 МГц. В обеих частях выделено по 12 стволов по 40 МГц каждый. Дуплексная связь осуществляется между двумя одноимёнными полосами обеих частей, сдвиг между которыми равен 530 МГц. Например, первый с первым, второй со вторым и т.д.

    В более высокочастотных диапазонах волн применяются гибкие частотные планы. Разнос частотных каналов в таких случаях определяется пропускной способностью (скоростью работы) РРЛ и видом модуляции. Чаще всего применяется шаг разноса рабочих частот равный 3.5 МГц. Тогда, к примеру, при скорости работы  4 Мбит/с и 4-х уровневой модуляции разнос частот можно выбрать равным шагу разноса, а при кратном увеличении скорости  разнос  также кратно увеличивается и может равняться  7, 14 или 28 МГц.

Подобные распределения частот производятся и в других выделенных диапазонах.

Рекомендованный список несущих частот для стволов РРЛ в диапазоне 7 ГГц. Разнос частот *Tx* - *Rx* составляет 161 МГц, интервал между стволами равен 7 МГц.

В последние годы разработаны новые частотные планы с использованием двойной поляризации радиоволн, позволяющие существенно повысить эффективность использования частотного спектра.

Таблица 1 – Примеры распределения двухчастотных диапазонов по стволам

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Ствол | *f* н, МГц |  *f* в, МГц  |
|  1 | 7428  |  7589 |
|  2 | 7435 |  7596 |
|  3 | 7442 |  7603 |
|  4 | 7449 |  7610 |
|  5 | 7456 |  7617 |
|  … |  … |  … |
|  19 | 7554  |  7715 |
|  20 | 7561 |  7722 |

 Таблица 2 - Размещение частот в стволах

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Диапазон частот, ГГц | Полоса частотГГц | Разнос между стволами, МГц |
| 1,4 | 1,35-1,53 | 0,25; 0,5; 1; 2; 3 |
| 2 | 1,9 – 2,3 | 3,5; 2,5 |
| 4 | 3,6 – 4,2 | 10; 40; 60 … |
| 6 | 5,85 – 6,435 | 60; 80; 90 |
| 11 | 1,7 – 11,7 | 40; 60; 80 |
| 31 | 31,0 – 31,3 | 25; 50 |

Организация стволов связи

Напомним, что *стволом*  РРЛ называется совокупность приёмопередающего оборудования на пролёте.  Для повышения пропускной способности и надёжности РРЛ практически всегда компонуются *многоствольными* линиями связи. Каждый ВЧ-ствол образован цепочкой приёмо-передающей аппаратуры и представляет собой самостоятельную РРЛ. Для многоствольной работы на каждой станции устанавливается несколько комплектов ВЧ-оборудования, работающих на разных частотах, но на общую антенну. Чтобы уменьшить взаимные помехи, рабочие частоты стволов располагаются по определённой геометрической конфигурации и плану *распределения частот*.

Наиболее распространены трёхствольные группировки двух видов (двухчастотный (*а*) и четырёхчастотный (*б*) планы), схемы которых приведены на рис. 6.

РРЛ с двухчастотным планом (в каждом стволе по две частоты), причём каждая станция излучает и принимает на разных частотах и разность этих частот называют частотой *дуплексного разноса* (*fдр* = *f*1 – *f*4). Двухчастотный план экономит частотный спектр, но требует использования более дорогостоящих антенн (с низким уровнем задних лепестков), четырёхчастотный же план - наоборот.

В остальных стволах также по четыре частоты (частоты используют обычно чётные, либо нечётные). Меняется и поляризация излучаемых радиоволн, например, излучение в одном направлении осуществляется с горизонтальной поляризацией, а в противоположном направлении - с вертикальной поляризацией.

Каждый ствол станции имеет стандартное обозначение, например: 2*ВН*, где 2- номер ствола, буква *В* означает приём на верхней частоте, *Н* передача (излучение) на нижней частоте. Комплект оборудования на другой стороне пролёта будет иметь соответственно обозначение 2*НВ*.

Передача информации РРЛ осуществляется в аналоговом или цифровом виде.

Цифровые РРЛ, по сравнению с аналоговыми станциями, имеют существенные преимущества. Для цифровых станций достаточен меньший запас на замирания 15-35 дБ вместо обычных для аналоговых систем 35-50 дБ. В них отсутствует влияние многолучёвости, эхосигналов в фидерах, проще техническое обслуживание. В цифровых станциях проще измерения показателей качества передачи без остановки связи. Поэтому в настоящее время процесс замены аналоговых каналов на цифровые каналы близок завершению.

# **Выбор мест расположения станций РРЛ**

При выборе мест расположения станций нужно учитывать упоминаемый ранее принцип "зигзагообразности" линии связи, наличие подъездных путей и источников электропитания, общий рельеф местности, характер почвы и пр. Следует учитывать и отражающие объекты, расположенные в горизонтальной плоскости (возвышенности, металлосодержащие сооружения и т.п.). Это достаточно длительный и неоднозначный процесс, так как необходимо проводить оптимальный выбор из множества возможных вариантов проведения трассы РРЛ. Кроме того, удачный выбор мест расположения станций для одного пролёта может быть неприемлемым для соседних пролётов.

Следовательно, при расчёте РРЛ необходимо строить как вертикальные, так и горизонтальны геометрические профили каждого пролёта.

В теории распространения радиоволн вблизи земной поверхности и в приземной атмосфере основными явлениями, влияющими на характеристики принимаемых радиоволн, являются поглощение электромагнитной энергии и интерференция разномодовых сигналов. В плане интерференционных взаимодействий рассматривают воздействия зон Френеля, вертикального профиля диэлектрической проницаемости и отражающих или переизлучающих поверхностей. Рассмотрим действенность каждого из механизмов.

**Механизмы интерференции радиоволн**

 Одной из основных причин нарушения связи является интерференция волн, приходящих в пункт приёма различными путями распространения. Как правило, рассматривают интерференцию прямого луча, распространяющегося кратчайшим путём от передатчика к приёмнику, с лучом, распространяющимся иным путём. Причины, приводящие к появлению мешающих волн, различны. Теория распространения радиоволн рассматривает два принципа передачи энергии излучателя: 1. Принцип Ферма, согласно которому распространение волны происходит по траектории, требующей наименьшего времени и
2. Принцип Гюйгенса-Френеля, согласно которому распространение радиоволн обеспечивается благодаря синхронному и синфазному переизлучению поступающей энергии любой точкой пространства. Рассмотрим некоторые из них.

**Принцип Гюйгенса-Френеля**

Согласно волновым принципам, при распространении электромагнитных волн даже в свободном пространстве различные его области не одинаково влияют на формирование поля в удалённой от излучателя точке приёма. **При этом всегда можно выделить некоторую область пространства, в которой распространяется основная часть передаваемой в заданном направлении энергии электромагнитных волн. Её конфигурацию и размеры определяют исходя из известного принципа Х. Гюйгенса - О. Френеля. Принцип был разработан для объяснения наблюдаемой интерференционной картины за экраном с отверстием в оптическом диапазоне. Картина представляла собой ряд чередующихся конических окружностей с меняющейся яркости. Центральная окружность при этом была наиболее яркой. Согласно предположению Х. Гюйгенса, каждая точка пространства, в котором распространяется электромагнитная волна (свет), является вторичным излучателем. О. Френель дополнил это утверждение тем, что эта точка излучает волну когерентно с первоисточником. Векторное сложение волн различных мод даёт в приёмном пункте интерференционную картину, которая может привести как к возрастанию, так и уменьшению результирующего поля.** В дальнейшем принцип Гюйгенса-Френеля был распространён и на весь диапазон электромагнитных волн, в том числе на радиоволны. Изобразим график зависимости отношения истинной напряжённости поля *Е* к напря­жённости поля при отсутствии экрана *Е*0от площади отверстия *S*,отнесённой к площади первой зоны Френеля *S*1(рис. 7).



Рис. 7 - Зависимость относительной амплитуды поля от площади отверстия

Мощность переизлучённого сигнала на любом из элементарных участков будет невелика по сравнению с мощностью сигнала, пришедшего по кратчайшему пути *TR*. Закономерность затухания мощности радиосигнала за счёт сферической расходимости можно записать в следующем виде

 ** (19)

Затухание мощности радиосигнала за счёт рассеяния в любой точке пространства *S* по принципу Гюйгенса-Френеля:

 *.* (20)

Отношение мощностей переотражённого (рассеянного) и прямого сигнала будет определяться выражением

 . (21)

Можно подойти к сравнению энергетических расходов принципов распространения по Ферма и принципу Гюйгенса-Френеля несколько по другому. Рассмотрим, корректность использования принципа Гюйгенса-Френеля в решении радиофизических задач. На рисунке 8 представим простейшую линию радиосвязи, размещённую в свободном пространстве.

***T***

***R***

***λ***

***d***

Рисунок 8 – Схема распространения энергии излучателя по принципам Ферма и

Гюйгенса-Френеля

Пусть излучаемая передатчиком мощность – *РТ*. Для определения регистрируемой в точке приёма *PR* мощности радиосигнала с учётом степени затухания потока мощности на удалении *d* от излучателя *LTR* для модели сферического расхождения мощности используют формулу

 ** (1)

где

 

Выведем формулы зависимости затухания мощности от расстояния для принципов Ферма *L*1 и Гюйгенса-Френеля *L*2. Выберем шаг удаления приёмника от передатчика, равным длине волны *λ* радиосигнала. Нетрудно убедиться, что значения мощности радиоволны на расстоянии *d*= *λ* будут одинаковы для обоих случаев. То есть

 

Но уже со второго шага (*d*= 2*λ* ) ситуация меняется

  

Далее

  

 **…**

   (3)

Здесь *n=d/λ* .

Итак, лишь на удалении *d*= *λ* затухание мощности радиоволны для обоих схем распространения совпадает. С увеличением удаления затухание сигнала по принципу Гюйгенса-Френеля *L*2 стремительно по отношению к *L*1 возрастает. В эксперименте истинное затухание соответствует формуле (1).

Схема затухания мощности радиоволны по принципу Гюйгенса-Френеля вынуждает полагать, что энергия излучения имеет составляющую в противоположном направлении относительно первоначального движения. Кроме того, каждая излучающая точка пространства должна быть «видна» из любой точки. Это значит, мы не можем наблюдать звёздное небо в таком виде, в каком мы его видим. Каждый источник света должен восприниматься как размытое по всему пространству свечение.

То же самое должно наблюдаться и в радиодиапазоне. Невозможно осуществление работы таких радиосистем как пеленгация, навигация и локация. Однако эти системы работают.

 Таким образом, принцип Гюйгенса-Френеля является качественным законом, не подтверждаемый энергетической составляющей, и поэтому, не может использоваться при расчётах радиолиний.

Излучатель, помещённый в точку *T*,имеет диаграмму направленности *fТ*(*θ, ϕ*). Поэтому принимаемая мощность *РТSR* в выражении (20) будет меньше, чем в (19), что ещё более уменьшит отношение (21). Кроме того, если принять переизлучение любой точки пространства за реальный факт, то излучённый сигнал в процессах рассеяния должен быстро затухать из-за закона сохранения энергии. Поэтому влиянием переизлучения в пространстве по принципу Гюйгенса-Френеля на высоту подвеса антенн можно пренебречь.

**Влияние процессов рефракции**

Атмосфера в вертикальной плоскости неоднородна. Как уже отмечалось, плотность компонент атмосферного газа уменьшается с высотой по барометрическому закону

  (1)

Или, если *ρ* - плотность атмосферного газа дана в единицах кг/м3, данные в квадратных скобках значения концентрации компонент - в единицах lg(м-3). Молекулярная плотность убывает с высотой *h* по экспоненциальному закону.

. (1)

Это один из видов барометриче­ского уравнения, где *Н* – высота однородной атмосферы или, как представлено в справочнике [8], эта зависимость может быть таковой

 

где *р*0 - давление на уровне моря, *h* - высота над уровнем моря в метрах.

[[8] Справочник. Физические величины / Под ред. И.С. Григо­рьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991].

**Отрицательный высотный градиент диэлектрической проницаемости *ε*, а значит и показателя преломления *n*, позволяет сделать следующее заключение. Рефракция волны, излучаемой под углом ниже линии, соединяющей антенны пролёта, не позволит ей попасть в приёмную антенну. Поэтому влиянием атмосферной рефракции на высоту подвеса антенн можно пренебречь.**

Процессы рефракции в реальной атмосфере приведут к увеличению диаграммы направленности с расстоянием.

**Роль эффекта отражений**

**Отражение – одно из наиболее известных явлений в геометрической оптике на примере отражения солнечного луча от зеркала - «угол падания равен углу отражения». Происходит оно на поверхности тела или раздела сред. Количественной характеристикой отражательной способности является величина, называемая коэффициентом отражения *  Er/E*0*,* где *Er*и*E*0 – ам**плитуды отражённой и падающей волны. Известным законом отражения является равенство углов падения и отражения электромагнитной волны. **В описании процессов распространения используют два наименования углов: зенитный угол – угол между вертикалью и направлением распространения волны, обозначаемый греческой буквой *θ* и угол падения *ϕ* - угол между направлением распространения луча и горизонталью. Соотношение между ними составляет *ϕ* = 90о-*θ*.** Но не всё так просто.

Представим электрический вектор радиоволны уравнением *E* = *E*0⋅ cos(*ωt* + *α*).

При отражении *горизонтально* поля­ризованной радиоволны в ней происходит скачок фазы *α,* всегда равный 180° или числу *π* в радианах.

Для *вертикально* поляри­зованной волны скачок фазы при отражении может принимать два значения:

 

где *ϕ -* угол падения луча, *ϕ*0 - угол Брюстера, который приблизительно определяется из условия

 

Первое выражение для скачка фазы *α* относится к крутому падению (короткая трасса), а второе для протяжённых трасс.

Таким образом, в точке приёма отражённая радиоволна будет иметь вид

 *Er* = *Г*⋅*E*0⋅ *f*(*ϕ*)⋅cos(*ωt* + Δ*ϕсдв*+*α*),

где Δ*ϕсдв* – сдвиг фазы из-за запаздывания волны, распространяющейся по большему пути, *Г*-коэффициент отражения, *f*(*ϕ*)- коэффициент диаграммы направленности.

*Интересно, как будет отражаться радиоволна с круговой поляризацией? При вертикальной и горизонтальной поляризации скачок фазы при  будет различным. Каковы свойства отражённого сигнала при угле падения ϕ*0 *?*

В реальных экспериментах не вся энергия отражённой волны уходит в одном направлении. Её величина зависит от электрических и геометрических свойств отражающей поверхности. Из-за неидеальной гладкости отражающей поверхности часть энергии рассеивается во всех направлениях. Наиболее наглядно такой вид отражения наблюдается на радиолокационных станциях в виде появления местных отражений, затрудняющих обзор в ближней зоне.

**Итак, единственной причиной возникновения интерференции на реальных трассах будет эффект отражения радиоволны от земной поверхности.**

**Поэтому на амплитуду отражённого сигнала и, соответственно, на результат интерференции волн в точке приёма могут оказать следующие факторы:**

**- рабочая частота радиоволны;**

**- электрические свойства отражающей поверхности (морская вода, пресная вода, снег лёд, песок, тип грунта, лес, трава);**

**- геометрические параметры отражающей поверхности (ровная поверхность, возвышенности и углубления, волны на водной поверхности, шероховатость твёрдых грунтов);**

**- угол падения (или зенитный угол) радиоволны на отражающую поверхность**;

**- диаграммы направленности приёмной и передающей антенн.**

Следует учесть и скачкообразное изменение фазы отражённого сигнала на 180о.

На рис. 7 - 10 показаны примеры характерных вертикальных профилей пролётов. Рассмотрим особенности этих профилей, их возможные влияния на устойчивость работы линии связи и области применения в различных условиях.

Вертикальный профиль в середине трассы имеет плоскую отражающую поверхность.

***h*2**

***h*1**

***k****j*

 Рис.7 - Отражение от ровной водной поверхности

Здесь и на последующих рисунках *kj*= *dj*/*d*0.

Как было сказано амплитуда отражённого сигнала зависит от электрических свойств отражающей поверхности. Наибольшая она от морской воды, наименьшая от лесного покрытия. Коэффициент отражения от поверхности солёной воды близок к 1 (при отсутствии волнения) и энергия отражённой волны будет почти равна энергии прямой волны. Это приведёт при малом Δ*ϕсдв* к возможному **падению** суммарной мощности сигнала на входе приёмника при интерференции **до 0**.

При длине волны короче 5 см отражения от поверхности, покрытой лесонасаждениями, носят диффузный характер и коэффициент отражения *Г* 0. Следовательно, с точки зрения интерференционных замираний такой вид профиля удачен, поскольку напряжённость поля в точке приёма будет определяться одним прямым лучом.

Сложный по конфигурации профиль земной поверхности может дать бесконечно большие наборы ситуаций. На результирующий сигнал, безусловно, окажут влияния и электрические свойства поверхности и её рассеивающие свойства и величина Δ*ϕсдв*.

Рассмотрим несколько произвольно выбранных ситуаций.

***h*2**

***h*1**

***k****j*

Рис. 8 - Пролёт с существенными изменениями высоты поверхности и частичными лесонасаждениями

    Профиль пролёта, показанный на рис. 8, содержит участок   (*kj* = 0.87) от которого возможно появление отражённой волны. Но форма препятствия такова, что отражение может произойти от одной точки, а не от какой-то поверхности. В этом случае уровень отражённой волны невелик, и замирания сигнала из-за интерференции не очень глубокие.
    Поэтому подобные профили пролётов позволяют получить приемлемые результаты работы линии связи.

Ещё лучшее качество работы линии связи позволяют получить пролёты, в которых отражённая волна экранируется какими-либо препятствиями на профиле (например, лесом или возвышенностью) как показано на рис. 9.

***h*2**

***h*1**

***k****j*

Рис. 9 – Пролёт с резко выделяемой поверхностью, покрытой лесонасаждениями

    При наличии таких профилей необходимо проследить, чтобы экранирование отражённой волны происходило при всех значениях градиента диэлектрической проницаемости (т.е. при любой возможной трансформации профиля).

***h*2**

***h*1**

***k****j*

 Рис. 10 - Пролёт с несколькими резко выделяемыми поверхностями

Профиль пролёта (рис. 10) имеет две возможные точки отражения электромагнитных волн. Показанные пунктиром линия прямой видимости и отражённые  лучи, получаются здесь при примерно одинаковых высотах подвеса антенн.

Как следует из практики, добиться устойчивой работы цифровой РРЛ при двух или нескольких точках отражения очень трудно и дорого. Стремление получить только одну точку отражения заставляет выбирать разные высоты подвеса антенн (рис. 10). При этом отражённая волна от одного из препятствий, экранируется другим препятствием. Естественно, это условие необходимо проверять при различных трансформациях профиля.

**Выбор высот подвеса антенн**

Земная поверхность может оказать существенное воздействие на параметры радиоволны, распространяющейся между передатчиком и приёмником. Степень этого воздействия зависит как от её удаления от земной поверхности, так и от длины несущей радиоволны. Расчёт высот подвеса антенн является общим, как для аналоговых линий, так и для цифровых РРС.

В большинстве же процедур, связанных с проектированием РРЛ, подходы различаются.

**Высокие технические характеристики современной аппаратуры цифровых РРЛ при правильном выборе профилей пролёта позволяют пользоваться упрощённой методикой для определения просветов на интервалах линии связи и, следовательно, высот подвеса антенн.**

На рисунке 11 приведён профиль пролёта РРЛ (вертикальный разрез местности, проходящий через места установки антенн). Принятые обозначения:

 *A*1, *A*2 – приёмо-передающие антенны РРЛ;

 *h*1, *h*2 – высоты подвеса антенн; *CD*, *MO*, *ZY* – высоты местности;

 *M* –критическая точка (вершина препятствия);

 *х* = *ON* – реальная кривизна Земли, которую можно определить по приближённой формуле:

 , (2)

где *d*0 измеряется в км; *R*⊕=6370 км – радиус Земли. Кстати значения *х* для середины пролёта совпадают со значениями *hmin*, полученными ниже по формуле (21а).

Из выбранной трассы РРЛ, представленной на рис. 11, выбирается оптимальный в географическом плане, пролёт. На концах дуги *DY* устанавливаем опоры антенн равной высоты. Первым выбором высот подвеса антенн являются высоты, обеспечивающие прямую видимость антенн по скользящей к поверхности земли линии. **Расположение этой линии определяется из выражения для размеров зоны покрытия**

 ****

Для равновысотных  *hT =h R* антенн имеем

  (21а)

где *hmin* в м, а *d*0 в км.

С увеличением удаления приёмной станции от передатчика *d*0 минимальная высота подвеса антенн *hmin* резко возрастает.

Таблица А – Зависимость минимальной высоты повеса антенн от длины пролёта

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *d*0, км | 5 | 10 | 20 | 40 | 60 | 80 |
| *hmin* , м | 0,5 | 2,0 | 7,8 | 31,4 | 70,6 | 125,5 |

Расчётные высоты подвеса антенн *hmin* (21а) для протяжённых линий связи не могут удовлетворить оптимальности радиосвязи. Кроме того, прохождение радиоволны в непосредственной близости от земной поверхности приводит к искривлению диаграммы направленности, которая «загибается» вверх и регистрируемая напряжённость поля будет меньше ожидаемой.

***C*1**

***D***

***d*0**

***ρ*1=*b***

***Y***

***Z***

***N***

***C***

***dj***

***A*1**

***A*2**

***x***

***K***

***A***

***M***

***h*2**

***h*1**

***ρj***

***B***

***T***

***R***

***С*2**

***ρj***

***О*2**

***O***

 Рисунок 11 – Схема пролёта РРЛ в вертикальной плоскости

Согласно теории такой эффект искривления главной линии диаграммы направленности наблюдается до тех пор, пока удаление прямого луча от поверхности земли не превысит величины *λ*/4.

Тогда высоты обеих антенн, рассчитанные из выражения (21а), увеличиваются до тех пор, пока удаление прямой, соединяющей антенны над критической *ОМ* (самой высокой) станет больше *λ*/4. Для трассы, изображённой на рисунке 11, можно записать

 *h*1 = *hmin +λ*/4 +*OM*– *CD*;

 *h*2 = *hmin +λ*/4 +*OM*– *ZY*.

**Для определения размеров просвета между прямой линии связи и земной поверхностью следует учитывать следующие эффекты:**

**1. Возвышение земной поверхности над трассой распространения из-за её сферичности *х* приводит к необходимости увеличения высот подвеса приёмных или передающих антенн, или и тех и других. Здесь необходим компромисс.**

**2. Диаграммы направленности приёмо-передающих антенн.**

**3. Коэффициент отражения радиолуча от земной поверхности.**

4. Радиусы первых двух зон Френеля *ρ*1,2. При мизерном коэффициенте отражения от земной поверхности радиоволны возвышение прямого луча может быть выбранным равным или меньше радиуса первой зоны Френеля. При существенной мощности отражённого сигнала высота прямого луча выбирается равной радиусу между первой и второй зонами Френеля.

Последние два эффекта теоретически могут привести к интерференции отражённого луча с прямым лучом и уменьшению результирующей мощности принимаемого сигнала.

1. Если высота земной поверхности на трассе выше прямой, соединяющей основания передающей и приёмной антенн, то она уменьшает зазор между земной поверхностью и линией прямой видимости излучающей и принимающей антеннами. Строгая тео­рия показывает, что если ан­тенны подвешены высоко и луч проходит далеко от земной поверхности и разность хода прямого и отражённого лучей становится больше примерно Δ*d*=*λ*/6, то следует учитывать прямую и отражённую волны.

2. Радиусы первых зон Френеля в пространстве определяет конечную конфигурацию лучей, при которой векторное сложение прямого луча и луча, проходящего в её пределах и достигающего приёмника, даёт интерференционное сложение результирующего поля. Правда, амплитуда луча, образованного по принципу Гюйгенса-Френеля из-за волновых свойств радиоволны, будет много ниже прямого луча (21). Если его затухание оценивается как затухание в свободном пространстве, то переизлучающая точка рассеивает сигнал по сфере и лишь небольшая её часть направляется к приёмной антенне. В любом случае зона Френеля определяет допустимую границу, при которой суммарное значение поля или мощности всех волн будет выше или ниже поля прямой волны. Итак, выбор высотного просвета меньше первой зоны Френеля для рассеянных по принципу Гюйгенса-Френеля волн приведёт лишь к возрастанию суммарной напряжённости поля.

Если в пределах первой зоны Френеля расположена область отражения радиолуча, то результирующий в точке приёма сигнал из-за скачка фазы на 180о будет по амплитуде меньше прямого сигнала.

3. В практических случаях связи на РРЛ в пределах прямой видимости выполняется условие *d*0 > *λ*/6 и уже только поэтому наличием *дифракционной волны*  *можно пренебрегать*. Кроме того, радиоволна, излучаемая под углом к линии, соединяющей приёмную и передающую антенны, в направлении земной поверхности (ниже прямого луча), будет ещё больше отклоняться в направлении земли и просто не попадёт в приёмную антенну. Следовательно, возможное её сложение с прямой волной исключается.

Из пункта 3 следует, что при наличии существенного по амплитуде отражённого сигнала подъём приёмо-передающих антенн следует увеличить до размеров второй зоны Френеля. Если же амплитуда отражённого сигнала незначительна, то увеличение высот подвеса антенн можно ограничить первой зоной Френеля.

Все вышесказанное, относящееся к выбору высот подвеса антенн, не учитывает погрешности географических карт. Реальные величины просветов необходимо выбирать увеличенными на максимальную погрешность карт. В ряде случаев, желательно проводить изыскательские работы для практического определения высотных отметок местности не только в пунктах расположения антенных опор, но и в критических точках пролётов, имеющих возвышенности.

Иногда в расчётах принимаемого поля рекомендуют использовать часть энергии передатчика, распространяющейся в сторону приёмной антенны внутри минимальной зоны Френеля, которой называют область пространства, формирующую в точке приёма напряжённость, рассчитываемую без учёта принципов Гюйгенса-Френеля[[1]](#footnote-1). Радиус минимальной зоны Френеля в любой точке пролёта рекомендуется определять по формуле:

  (1)

где *d*0 – длина пролёта;

*kj* = *d*j/*d*0 – относительная координата точки препятствия;

*d*j – расстояние до точки препятствия.

Формула (1) даёт радиус минимальной зоны Френеля в точках передачи и приёма, равный нулю, что не соответствует истине. Значит формула (1) неверна.

Пересечённой трассой считается пролёт, у которого высоты неровности земной поверхности Δ*hi* ≥ 2*ρ*0.

Вывод формулы для радиуса 1-ой зоны Френеля середины трассы, как функции длины пролёта и используемой радиоволны, можно произвести следующим образом.

Используя первый закон Кеплера для эллиптических орбит и условие о том, что в первой зоне Френеля непрямой луч должен пройти путь на *λ*/4 больше прямого луча, находим, что расстояние от фокуса эллипса до края большой полуоси *АТ* должно составлять *λ*/8. То есть *TCR* – *TR* = *λ*/4. Введём обозначения

*RB* = *AT* =*λ*/8, *C*1*O* = *b* = *ρn*, *AO* = *OB* = *a* = *d*0/2 + *n*⋅*λ/*8*, TO = OR = d*0/2,

*n*-номер зоны Френеля.

Тогда получаем



При этом мы пренебрегаем значением четвёртого члена в подкоренном выражении

Тогда для *d*0= 40 км, *λ*= 0,15 м имеем *ρ*1=19,4 м, а *ρ*2=27,4 м.

**Радиус первой зоны Френеля для любой точки пролёта, с учётом, что *d*0>>*λ*, можно приближённо определять и по формуле1:**

 ****                                                 (3)

где *d*0 - протяжённость пролёта, км, *f* - рабочая частота, (ГГц),  *kj* - относительная координата наивысшей точки на трассе.

Формула (3) даёт радиус минимальной зоны в точках передачи и приёма, равный нулю, что не соответствует истине. Значит формула (3), как и (1) близка к истинному решению, но неверна.

При перемещении приёмника вдоль трассы, когда меняется *d*0при сохранении высот *h*1 и *h*2*,* изменяется разница фаз прямой и отра­жённой волн из-за фазового набега на Δ*d*= *d*2 – *d*1. Зависимость множителя ослаб­ления от расстояния немонотонная (рис. 20).

***d***

 Рис. 20. Зависимость множителя ослабления от расстояния

 Чем больше удаление, тем меньше набег фаз на единицу длины трассы.



 Рис. 21. - Зависимость множителя ослабления от высоты

При подъёме приёмной антенны вверх, когда меняется *h*2при сохранении вы­соты *h*1 и расстояния *d*0, также изменяется разница фаз прямой и отражённой волн из-за фазового набега на Δ*d*= *d2 – d*1. Зависимость множителя ослабления от высо­ты немонотонная (рис. 21).

Анализ множителя ослабления обычно проводят при условиях *d*2 » (*h*1+ *h*2)2 и

 *ϕ*1= *ϕ*2=*ϕ* «1.

При этих условиях Δ*d = d2* –*d*1 ≈ (2*h*1*h*2)/*d*. Максимумы поля будут при выполнении условия

(95)

где *т* = 1, 2, 3… номера лепестков, начиная с дальнего по расстоянию или нижнего по высоте подъёма приёмной антенны (рис. 20 и 21).

Выражение (95) является общим, поэтому моделирование распростране­ния радиоволны у плоской земной поверхности можно осуществлять на его основе.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

 ***Радиорелейная связь* основана на эстафетной ретрансляции станциями**, **расположенными на поверхности Земли.**

Радиорелейные линии связи (РРС) относятся к *наземным*, *фиксированным* и *беспроводным* системам передачи информации. Совокупность приёмопередающего оборудования на пролёте образует  *ствол* РРЛ. Различаются однонаправленные и двунаправленные стволы. РРЛ подразделяются на *местные*, *зоновые, магистральные,* *технологические* или *корпоративные* линии. Для работы РРЛ выделено 19 полос частот в диапазонах от 1,4 до 55 ГГц.

**Все РРС в зависимости от мест их расположения, назначения и комплектации подразделяются на оконечные, промежуточные и узловые станции.**

 Частотное планирование делит выбранный диапазон на 2 поддиапазона, каждый из которых содержит по равному количеству стволов. Дуплексная связь соседних станций осуществляется одинаковыми по номерам стволами поддиапазонов.

 При выборе мест РРС станций используется принцип "зигзагообразности" линии связи, наличие подъездных путей и источников электропитания, общий рельеф местности, характер почвы и пр.

 Основной причиной нарушения связи является интерференция волн, приходящих в пункт приёма различными путями распространения. Влияниями переизлучения в пространстве по принципу Гюйгенса-Френеля и атмосферной рефракции на высоту подвеса антенн можно пренебречь. Единственной причиной возникновения интерференции на реальных трассах будет эффект отражения радиоволны от земной поверхности.

На амплитуду отражённого сигнала и, соответственно, на результат интерференции волн в точке приёма могут оказать следующие факторы: рабочая частота, электрические свойства отражающей поверхности, геометрические параметры отражающей поверхности, угол падения радиоволны на отражающую поверхность, диаграммы направленности приёмной и передающей антенн, изменение фазы отражённого сигнала на 180о.

 Высота подвеса приёмо-передающих антенн РРЛ определяется воздействием подстилающей поверхности на форму диаграммы направленности, а также на результирующую амплитуду и фазу отражённого сигнала.

Первым выбором высот подвеса антенн являются высоты, обеспечивающие прямую видимость антенн по скользящей к поверхности земли линии.

**Для равновысотных передающих и приёмныхантенн имеем**

 ****

где *hmin* в м, а *d*0 в км.

Прохождение радиоволны в непосредственной близости от земной поверхности приводит к искривлению диаграммы направленности, которая «загибается» вверх и регистрируемая напряжённость поля будет меньше ожидаемой. **Такой эффект наблюдается, если удаление прямого луча от поверхности земли, включая возвышенности, не превысит величины *λ*/4.** **Антенны следует приподнять, то есть *h*А = *hmin +λ*/4.**

 На следующем этапе надо выбрать такую высоту антенн, чтобы отражённый от земной поверхности луч не влиял отрицательно на суммарную мощность (напряжённость). Отражённый сигнал, имеющий амплитуду в 10 раз меньшую амплитуды прямого луча, позволяет земной поверхности быть в пределах 1-ой зоны Френеля. Если нет, то антенны следует приподнимать, чтобы отражение находилось в пределах 2-ой зоны Френеля.

Сводка основных формул

Затухание мощности радиосигнала между передатчиком и приёмником за счёт сферической расходимости:

**

Затухание мощности радиосигнала за счёт рассеяния в любой точке пространства *S* по принципу Гюйгенса-Френеля:

*.*

Отношение мощностей переотражённого (рассеянного) и прямого сигналов будет определяться выражением

.

Напряжённость поля отражённой радиоволны в точке приёма будет иметь вид

 *E* = *Г*⋅*E*0⋅ *f*(*ϕ*)⋅cos(*ωt* + Δ*ϕсдв*+*α*),

где Δ*ϕсдв* – сдвиг фазы из-за запаздывания волны, *α*- скачок фазы отражённого сигнала.

Приближённое значение *х* реальной кривизны Земли на относительном удалении *kj*:

 ,

где *d*0 - расстояние между передающей и приёмной антеннами в км; *R*⊕=6370 км – радиус Земли.

Дальность видимости между антеннами

 .

Для равновысотных антенн *hT =h R* минимальное их возвышение *hmin* в зависимости от взаимного удаления равно

 

где *hmin* в м, а *d*0 в км.

Радиус первой зоны Френеля для любой точки пролёта, с учётом, что *d*0>>*λ*, можно приближённо определять и по формуле1:

                                                  (3)

где *d*0 - протяжённость пролёта, км, *f* - рабочая частота, (ГГц),  *kj* - относительная координата наивысшей точки на трассе.

Размер радиуса *n*-ой зоны Френеля для середины трассы

****

Радиус минимальной зоны Френеля в любой точке пролёта рекомендуется определять по формуле:

 

1. Мордухович Л.Г. Радиорелейные линии связи. Курсовое и дипломное проектирование: Учебное пособие для техникумов. – Москва: Радио и связь, 1989. [↑](#footnote-ref-1)