

УДК 534

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В ДИАПАЗОНАХ ДВ, СВ, КВ, УКВ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КАЧЕСТВО ВЕЩАНИЯ

Рожков А.И., студент гр. ИУК1-42Б, 2 курс

Научный руководитель: Никифоров Д.К., к.ф.-м.н., доцент

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
г. Калуга

Вакуумная среда обеспечивает наиболее благоприятные условия для распространения радиоволн, при которых отсутствуют какие-либо искажения.

Расчет радиолиний в таком случае довольно простой – для этого достаточно знать методы классической электродинамики.

Однако в реальных условиях радиоволны распространяются в различных средах, взаимодействуя с ними. Характер взаимодействия и его результат зависят от электромагнитных свойств среды и длины волны. Электромагнитные параметры сред часто являются функцией времени и координат. Поэтому расчет радиолиний на практике сопряжен со значительными трудностями и зачастую не имеет строгого однозначного решения. В этом случае важен эксперимент, позволяющий вести расчет эмпирическими методами. [1]

Цель исследования — на основе сравнительного анализа физических особенностей распространения радиоволн в диапазонах ДВ, СВ, КВ и УКВ определить их основные преимущества, недостатки и области эффективного применения в современных системах радиовещания, включая сложные условия городской среды.

Таблица 1. Диапазоны радиоволн [1]

| № | Название диапазона радиоволн                        | $\lambda$ , м | $f$ , Гц                      | Название в радиовещании |
|---|-----------------------------------------------------|---------------|-------------------------------|-------------------------|
| 1 | Мириаметровые волны, или очень низкие частоты (ОНЧ) | $10^5 - 10^4$ | $3 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^4$ | Сверхдлинные (СДВ)      |
| 2 | Километровые волны, или низкие частоты (НЧ)         | $10^4 - 10^3$ | $3 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$ | Длинные (ДВ)            |
| 3 | Гектометровые волны, или средние частоты (СЧ)       | $10^3 - 10^2$ | $3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^6$ | Средние (СВ)            |

|   |                                                       |                     |                                     |                      |
|---|-------------------------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|----------------------|
| 4 | Декаметровые волны, или высокие частоты (ВЧ)          | $10^2 - 10^1$       | $3 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7$       | Короткие волны (КВ)  |
| 5 | Метровые волны, или очень высокие частоты (ОВЧ)       | $10 - 1$            | $3 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^8$       | Ультракороткие (УКВ) |
| 6 | Дециметровые волны, или ультравысокие частоты (УВЧ)   | $1 - 10^{-1}$       | $3 \cdot 10^8 - 3 \cdot 10^9$       |                      |
| 7 | Сантиметровые волны, или сверхвысокие частоты (СВЧ)   | $10^{-1} - 10^{-2}$ | $3 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^{10}$    |                      |
| 8 | Миллиметровые волны, или крайне высокие частоты (КВЧ) | $10^{-2} - 10^{-3}$ | $3 \cdot 10^{10} - 3 \cdot 10^{11}$ |                      |
| 9 | Децимиллиметровые волны                               | $10^{-3} - 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{11} - 3 \cdot 10^{12}$ |                      |

Под свободным пространством понимают среду, которая не оказывает заметного воздействия на радиоволны определенной длины. Таким образом, в свободном пространстве радиоволны заметно не поглощаются, не рассеиваются и не отражаются, распространяясь прямолинейно со скоростью света.

Понятие свободного пространства не является абсолютным, поскольку воздействие среды на радиоволны существенно варьируется в зависимости от их длины.

Проведённые измерения показывают: радиоволны с длиной более 10 сантиметров проходят через тропосферу практически без потерь, независимо от наличия водяного пара, осадков, тумана, облачности и прочих атмосферных явлений. Напротив, для волн короче 10 см характерно существенное затухание, которое в неблагоприятных метеоусловиях может достигать такой величины, что радиосвязь становится невозможной.

Среди факторов, вызывающих поглощение сигнала в тропосфере, выделяют четыре: ослабление в капельной влаге (дождь, град, снег, туман), молекулярное поглощение, рассеяние на молекулярных агрегатах (характерное для дымки) и поглощение взвешенными твёрдыми частицами.

В структуре ионосферы Земли выделяют ионизированные области (слои), обозначаемые символами D, E,  $F_1$ ,  $F_2$ .

**Слой D.** Данный слой является наиболее близким к земной поверхности среди всех ионосферных областей. Он располагается на высотах 60...90 км. Формирование слоя происходит исключительно в дневное время, когда поток

солнечного излучения достигает уровня, достаточного для запуска процессов ионизации. Высокая плотность газовой среды обуславливает частые столкновения электронов с тяжёлыми частицами, что придаёт слою выраженные поглощающие свойства.

**Слой Е.** Образуется на высотах 95...120 км и является наиболее стабильным слоем, он мало подвержен случайным изменениям. В этом слое также изменение концентрации электронов будет зависеть от времени суток.

**Слой F.** Он характеризуется наибольшей электронной концентрацией среди всех ионосферных слоёв. Наиболее закономерный суточный ход плотности ионизации и высоты слоя F наблюдается в зимние месяцы. В летние месяцы суточное изменение параметров слоя F имеет совершенно другой характер. В дневные часы он разделяется на два слоя, один из которых  $F_2$  располагается выше, чем  $F_1$ . Слой  $F_1$  по своим характеристикам близок к слою E.

В суточном ходе электронной плотности слоя  $F_2$  ярко выраженный максимум отсутствует. В летний период в ночные часы присутствует только один слой F. Степень его ионизация определяется географической широтой и долготой. Кроме того, характерно годовое изменение ионизации слоя F для всего земного шара.

Рассмотренная выше регулярная пространственная структура ионосферы часто нарушается. Причиной этого являются изменения в деятельности Солнца, наблюдающиеся особенно часто в годы максимума одиннадцатилетнего цикла солнечной активности. [2]

**Радиоволны очень низких и низких частот** (мираметровые и километровые волны) занимают диапазоны частот  $3 \cdot 10^4 \dots 3 \cdot 10^5$  Гц (НЧ) и  $3 \cdot 10^3 \dots 3 \cdot 10^4$  Гц (ОНЧ). Эти частоты соответствуют длинам волн от  $10^5$  до  $10^3$  м. Применительно к радиовещанию радиоволны этого диапазона традиционно называются также сверхдлинными (СДВ) и длинными волнами (ДВ).

Из-за значительной длины эти волны эффективно огибают кривизну земной поверхности, а процесс их распространения подчиняется законам дифракции.

Для отражения от ионосферы длинных и сверхдлинных волн требуется электронная концентрация, не превышающая величины  $10^3$  эл/см<sup>3</sup>. Поэтому в дневное время эти волны способны отражаться от нижней границы слоя D, а в ночное время – от нижней границы слоя E, не проникая в глубь слоя и не испытывая при этом значительного поглощения.

К характерным чертам распространения длинных и сверхдлинных волн можно отнести слабую зависимость их прохождения от сезона, времени суток и уровня солнечной активности. В ночные часы напряжённость поля несколько возрастает, поскольку отражение волн происходит от слоя E, в котором количество столкновений электронов с нейтральными частицами ниже, чем в слое D.

Поскольку длинные и сверхдлинные волны не проникают в глубинные слои ионосферы, они остаются нечувствительными к ионосферным возмущениям и показывают высокую стабильность распространения. Благодаря этому их применяют в системах аварийной связи и радионавигации. Кроме того, сверхдлинные волны способны проникать на значительную глубину в море, что делает их пригодными для поддержания связи с подводными лодками, находящимися в полупогружённом положении.

Недостатком рассматриваемого диапазона волн является высокий уровень атмосферных помех и применение передатчиков большой мощности, работающих с антеннами очень больших размеров.

**Радиоволны средних частот** (гектометровые, или средние волны) занимают диапазон частот от  $3 \cdot 10^5$  до  $3 \cdot 10^6$  Гц, что соответствует длине волны от 1000 до 100 м.

Средние волны (СВ) могут распространяться как земные (поверхностные) волны и как пространственные (ионосферные). В отличие от диапазона СДВ и ДВ на этих волнах поверхность Земли проявляет себя как полупроводящая среда, благодаря чему из-за большого поглощения дальность распространения поверхностной волны не превышает расстояния 500...700 км.

Для отражения средних волн от ионосферы требуется электронная концентрация не менее  $10^3$  эл/см<sup>3</sup>. Отсюда следует, что основным отражающим слоем для средних волн является слой E, в то время как слой D является поглощающим слоем.

Для ближней зоны, охватываемой поверхностной волной, характерна высокая стабильность напряжённости поля — она не зависит ни от времени дня и года, ни от ионосферных условий. Как следствие, в этой зоне средневолновые вещательные станции гарантируют высокое качество приёма.

В средней зоне уровни напряжённости поверхностной и пространственной волн сравнимы, и ситуация качественно отличается от ближней зоны. В дневные часы из-за сильного поглощения в слое D, пространственная волна практически отсутствует и связь обеспечивается за счет поверхностной волны. Как и в ближней зоне, напряженность поля поверхностной волны сохраняет высокую стабильность. Ночью слой D исчезает, появляется пространственная волна, и в пункте приёма возникает интерференция двух волн — поверхностной и пространственной.

Средние волны в виде поверхностных могут распространяться лишь на расстояние порядка нескольких сотен километров, поэтому этот диапазон используется главным образом в целях местного и регионального вещания, а также в системах служебной радиосвязи.

**Радиоволны высоких частот** (декаметровые, или короткие, волны) занимают диапазон от 3 до 30 МГц, что соответствует длинам волн от 100 до 10 м.

Короткие волны (КВ) земной волной распространяются на расстояния, не превышающие десятков километров.

Коротковолновая радиосвязь на дальних расстояниях обеспечивается в основном пространственными волнами — они распространяются на большие расстояния, многократно отражаясь от ионосферы и Земли. На практике это позволяет связать любые две точки Земли с помощью передатчиков сравнительно малой мощности.

Чтобы снизить поглощение сигнала в ионосфере при коротковолновой связи, целесообразно использовать более высокие частоты. Однако при этом необходимо помнить: для радиолинии заданной протяжённости должно выполняться условие отражения волны от ионосферы. Следовательно, рабочая частота не может превышать максимально допустимую для данной линии. Работа на максимальной частоте связана с риском нарушения отражения из-за нестабильности слоя  $F_2$ . Исходя из этого рабочую частоту на практике выбирают примерно равной  $0.7 f_{max}$ , что снижает риск нарушения радиосвязи.

**Волны ультракоротковолнового диапазона (УКВ)** занимают в целом полосу частот от 30 МГц до 3000 ГГц. В соответствии с регламентом радиосвязи весь этот диапазон частот разбивается на пять поддиапазонов: метровые волны (очень высокие частоты); дециметровые волны (ультравысокие частоты); сантиметровые волны (сверхвысокие частоты); миллиметровые волны (крайне высокие частоты); децимиллиметровые волны.

Если исключить поддиапазоны миллиметровых и децимиллиметровых волн, которые пока практически не используются в наземных системах радиосвязи, то ширина полосы основной части диапазона составит около 30000 МГц. Это более чем в 1000 раз превышает ширину полосы частот диапазона декометровых волн.

Ультракороткие волны — это единственный диапазон, позволяющий передавать телевидение и обеспечивать высококачественное ЧМ-радиовещание по наземным и спутниковым каналам связи.

Хотя каждый поддиапазон УКВ имеет свои особенности распространения, существуют общие закономерности, характерные для всего диапазона в целом. К ним можно отнести следующие: все УКВ-волны движутся прямолинейно и практически не огибают шарообразную поверхность Земли. Для этих волн земная поверхность воспринимается как негладкая. Влияние тропосферы сказывается в том, что все волны данного диапазона преломляются в ней. Что касается ионосферы, то она практически не воздействует на распространение радиоволн почти во всём УКВ-диапазоне.

Метровый поддиапазон охватывает частоты от 30 до 300 МГц, чему соответствуют длины волн в интервале от 10 до 1 метра. В обычном состоянии ионосферы условия для отражения на этих волнах, как правило, не выполняются, поэтому они беспрепятственно уходят в космос.

Дифракция метровых волн вокруг земной поверхности выражена слабо, поэтому в качестве земных волн они распространяются на расстояние, лишь незначительно превышающее прямую видимость.

Рельеф местности оказывает заметное влияние на распространение метровых волн: он ослабляет уровень сигнала и порождает отражённые лучи

от различных препятствий. Наиболее ярко этот эффект выражен в условиях плотной городской застройки, где возникает экранирующий эффект.

К дециметровым, сантиметровым и миллиметровым радиоволнам относят частоты от 300 до 30 000 МГц, которым соответствуют длины волн в диапазоне от 1 м до 1 мм. Радиоволны субмиллиметрового диапазона пока не нашли практического применения.

Огромную роль в приёме качественного сигнала играет наличие помех. При радиосвязи необходимо это учитывать. Важно рассмотреть методы борьбы с ними.

**Промышленные помехи.** Среди них выделяются помехи, создаваемые сторонними радиостанциями, а также помехи, порождаемые различными типами промышленных электроустановок. Для их подавления применяют направленные приёмные антенны с управляемой диаграммой направленности — они позволяют в ряде случаев отстроиться от помехи, если направление её прихода не совпадает с направлением полезного сигнала. Нередко эффективной мерой снижения уровня помех служит также перестройка рабочей частоты.

Промышленные электроустановки выступают в роли активных генераторов радиоизлучения в широком частотном диапазоне. Как правило, электромагнитные волны генерируются в моменты коммутации токонесущих цепей, сопровождающиеся возникновением электрического разряда (искрения).

Проникновение помех от промышленного оборудования в приёмный тракт возможно, как через антенну (посредством радиоволн), так и через цепи питания, если источник помех и приёмник запитаны от общей электросети.

Наименее подвержены воздействию промышленных помех радиолинии ультракоротковолнового диапазона. Основными способами подавления таких помех служат экранирование источников паразитного электромагнитного излучения, а также включение в цепи электропитания приёмников специальных фильтров, ослабляющих высокочастотные составляющие тока. С целью снижения влияния промышленных помех профессиональные радиоцентры, как правило, размещают за пределами городской черты.

**Атмосферные помехи.** Атмосферные помехи генерируются грозовыми разрядами. Каждая молния создаёт мощный электромагнитный импульс. Суммарное излучение от множества удалённых друг от друга гроз формирует флуктуационную помеху, обладающую сплошным спектром и по своим свойствам приближающуюся к гладкому шуму.

С увеличением частоты уровень атмосферных помех существенно снижается. Это объясняется тем, что электромагнитное излучение, порождаемое грозовыми разрядами, способно распространяться на значительные расстояния лишь благодаря отражению от ионосферы и только в диапазоне частот ниже 30 МГц. Следовательно, мешающее воздействие атмосферных помех проявляется преимущественно в длинноволновом и средневолновом диапазонах.

**Помехи, возникающие в результате радиоизлучения Земли.** Как любое нагретое тело, Земля генерирует радиоволны. В декаметровом и более длинноволновом диапазонах это излучение практически незаметно на фоне доминирующих атмосферных и промышленных помех. Таким образом, радиоизлучение Земли проявляет себя главным образом в УКВ-диапазоне.

**Собственные шумы приемных устройств.** Внутренние шумы приемника становятся доминирующей помехой на частотах, превышающих 1000 МГц.

### **Особенности распространения радиоволн в городе**

Распространение радиоволн в городских условиях резко отличается от условий распространения радиоволн при прямой видимости. При прямой видимости основными факторами, негативно влияющими на качество приема радиоволн, являются: потери в свободном пространстве; влияние тропосферы; наличие отражений от земной поверхности; эффект Доплера; шумы. [3]

В условиях городской застройки распространение радиоволн сопровождается возникновением ряда дополнительных нежелательных явлений. Их причиной служат многочисленные здания, высотные сооружения, инженерные конструкции и особенности уличной планировки, которые вызывают многократное переотражение сигнала. При стационарном положении приёмного устройства уровень принимаемого сигнала может изменяться вследствие отражений от движущегося автотранспорта.

В большинстве случаев прямая видимость между базовой станцией и мобильным терминалом может отсутствовать, а во время движения условия распространения радиоволн будут многократно меняться. Многолучевое распространение сигнала порождает интерференцию и резкое изменение уровня принимаемого сигнала.

Стены зданий, особенно железобетонные, интенсивно отражают и поглощают энергию радиоволн. Окна и дверные проёмы частично снижают это ослабление. Из-за большого разнообразия толщин стен, материалов и геометрии строений вывести единую формулу для оценки затухания в городской среде не представляется возможным.

### **Вывод**

Проведенный анализ распространения радиоволн в основных вещательных диапазонах (ДВ, СВ, КВ, УКВ) и их взаимодействия с различными средами позволяет сформулировать следующие заключительные положения:

Выбор оптимального диапазона является компромиссной задачей, решение которой определяется целевыми требованиями к дальности связи, качеству звука, устойчивости к помехам и экономической эффективности.

ДВ/СВ обеспечивают стабильное региональное покрытие, но требуют мощного оборудования и сильно подвержены атмосферным помехам.

КВ остаются незаменимыми для дальней межконтинентальной связи благодаря отражению от ионосферы, однако качество связи нестабильно и зависит от времени суток и солнечной активности.

УКВ предоставляет высокое качество звука и устойчивость к помехам, но ограничено зоной прямой видимости, что требует развитой сети ретрансляторов.

Качество вещания напрямую зависит от физических свойств волны и параметров среды. Ключевыми дестабилизирующими факторами являются:

Для ДВ/СВ/КВ — состояние ионосферы (слои D, E, F) и уровень атмосферных помех.

Для УКВ — рельеф местности, плотность городской застройки и поглощение в тропосфере (для волн короче 10 см).

В современных условиях наиболее сложной является организация качественного вещания в плотной городской застройке.

Перспективы развития радиовещания связаны с освоением высших поддиапазонов УКВ (дециметрового, сантиметрового) для цифрового и сотового вещания, а также с развитием адаптивных систем, способных динамически подбирать параметры (частоту, мощность, схему кодирования) в ответ на меняющиеся условия распространения.

Таким образом, эффективное проектирование систем радиовещания возможно лишь на основе комплексного учёта фундаментальных закономерностей распространения радиоволн и специфических условий работы в выбранном диапазоне и местности.

### **Список литературы:**

1. Андрусевич, Л. К. Антенны и распространение радиоволн: учебное пособие / Л. К. Андрусевич, А. А. Ищук, К. А. Лайко. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2010. — 422 с.
2. Жуков, В. М. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства систем радиосвязи: учебное пособие / В. М. Жуков, А. Н. Сысоев. — Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2013. — 81 с.
3. Моделирование распространения радиоволн в пакете Wireless InSite: учебное пособие / Н. Н. Кисель; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Южный федеральный университет, Южный федеральный университет, Инженерно-технологическая академия. - Ростов-на-Дону, Таганрог: Южный федеральный университет, 2018. - 108 с.