

СПРАВОЧНИК ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ ЗЕМНЫХ ВОЛН

Издание 2014 года
Бюро радиосвязи



Справочник
по распространению
земных волн

Издание 2014 года

Бюро радиосвязи



Введение

Распространение земных волн представляет особый интерес для связи, особенно радиовещания на низких частотах, где этот режим используется уже свыше 90 лет.

Справочник разделен на четыре основные части, в которых рассматриваются:

- основные положения и теория;
- основные широкие аспекты и методы прогнозирования, используемые для оценки совместимости и процедур планирования, применяемых для управления использованием спектра и решения задач, связанных с покрытием;
- изменчивость характеристик меньшего масштаба, которая может играть важную роль при оценке качества предоставляемых услуг;
- измерения и фазы.

В подготовке настоящего Справочника принимали участие (в порядке английского алфавита):

Итциар АНГУЛО

Лес БАРКЛЕЙ

Юрий ЧЕРНОВ

Ник ДЕМИНКО

Игорь ФЕРНАНДЕС

Унаи ГИЛ

Давид ГУЭРРА

Джон МИЛСОМ

Иван ПЕНЬЯ

Давид ДЕ ЛА ВЕГА.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

ЧАСТЬ 1 – Теоретические аспекты	1
1 Введение.....	1
2 Развитие теории распространения поверхностных волн.....	1
3 Теория распространения поверхностных волн	3
3.1 Введение в теорию	3
3.2 Теория для однородной гладкой Земли	4
3.3 Влияние атмосферы	7
ЧАСТЬ 2 – Метод прогнозирования, рекомендованный МСЭ-R	9
4 Рекомендация МСЭ-R P.368	9
5 Поверхностное полное сопротивление	11
6 Проводимость земной поверхности	11
6.1 Проводимость для суши	11
6.2 Проводимость для моря.....	13
ЧАСТЬ 3 – Отклонение от основной процедуры прогнозирования.....	15
7 Гладкая поверхность Земли со смешанной проводимостью	15
7.1 Эффект восстановления при распространении над морем	15
7.2 Метод Миллингтона для смешанных трасс.....	17
7.3 Расчет типового значения проводимости для смешанных трасс в диапазоне СЧ.....	17
8 Неровность поверхности моря.....	18
9 Сельские условия	19
10 Городские условия	19
10.1 Влияние городских районов с плотной застройкой, от 0,1 до 20 км	19
10.2 Расстояния свыше 25 км.....	26
11 Сезонные изменения в распространении поверхностных волн.....	29
11.1 История исследований.....	29
11.2 Ежедневные изменения в распространении поверхностных волн.....	32

Стр.

ЧАСТЬ 4	33
12 Приемные антенны.....	33
13 Определение характеристик пространственной изменчивости напряженности поля.....	34
14 Неровности рельефа.....	35
15 Локальные воздействия в зонах застройки.....	37
15.1 Измерение сигналов, поступающих в зоны плотной застройки.....	37
15.2 Влияние частоты передачи в городских условиях.....	41
15.3 Крупномасштабное изменение напряженности поля.....	41
16 Мелкомасштабное пространственное изменение напряженности поля	43
17 Распространение радиоволн внутри помещений	43
ЧАСТЬ 5	47
18 Методы измерения	47
18.1 Измеритель напряженности поля	47
18.2 Измерение излучаемой мощности.....	47
18.3 Измерение эффективной проводимости почвы	48
19 Фаза поверхностной волны [71].....	49
19.1 Введение	49
19.2 Гладкая однородная Земля.....	49
19.3 Возмущения вторичной фазы	49
19.4 Неоднородные трассы	49
19.5 Неровности рельефа.....	50
19.6 Влияние метеорологических условий.....	50
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 – Обобщенный метод Ли.....	51
20 Справочные документы	53

ЧАСТЬ 1

Теоретические аспекты

1 Введение

На средних частотах в дневное время распространяющиеся посредством пространственной волны сигналы, проходя через ионосферу, значительно ослабевают. Распространение посредством земной, а точнее, поверхностной волны – это режим распространения всех сигналов, занимающих полосу частот, распределенную по СЧ-радиовещанию. Кроме того, поверхностные волны используются для обеспечения работы систем НЧ-радиовещания, ОНЧ/НЧ-связи и навигации, ВЧ-связи малого радиуса действия и некоторых видов ВЧ-радиолокаторов – во всех этих случаях могут также использоваться режимы распространения пространственных волн.

Распространение поверхностных волн обусловлено электрическими токами, протекающими в земле. Наличие атмосферы влияет на характеристики распространения радиоволн, но не является существенным фактором для данного режима. Горизонтально поляризованные поверхностные волны подвержены сильному затуханию и почти не имеют практической ценности. Во всех упомянутых выше приложениях используются вертикально поляризованные поверхностные волны.

В отличие от сигналов ионосферного распространения, поверхностные волны обладают незначительным рассеянием, поэтому в принципе широкополосные сигналы могут передаваться при помощи одних только поверхностных волн.

Замирание возникает лишь при наличии временных изменений характеристик на трассе распространения сигнала. Сигналы, распространяющиеся посредством земных волн над сушей, являются стабильными, в ряде случаев наблюдаются лишь сезонные колебания. Кроме того, на малых расстояниях могут наблюдаться изменения, связанные с наличием сооружений или особенностями рельефа. Волны, распространяющиеся над поверхностью моря, могут быть подвержены медленному замиранию, связанному с переменным воздействием приливов-отливов, и затуханию, обусловленному неровностью поверхности моря.

Как показала многолетняя практика, методы, базирующиеся на теоретических выкладках, составляющих основу Рекомендации МСЭ-R P.368, обеспечивают надежный и довольно простой способ прогнозирования зон покрытия, например, систем СЧ- и НЧ-радиовещания. Разработка методов прогнозирования для городских районов с высотной застройкой еще не завершена. Дополнительные потери, связанные с местными препятствиями, неблагоприятными топографическими условиями и т. д., играют важную роль, особенно при оценке общего качества предоставляемой услуги. Использование надежных методов модуляции, временное и частотное рассеяние поверхностной волны и комбинированное применение распространения поверхностных и пространственных волн вряд ли способны стать причиной существенного ухудшения характеристик.

В первой части настоящего Справочника приводится теория распространения земных волн, затем следует описание методов и процедур прогнозирования, пригодных для общего широкого прогнозирования зон покрытия для целей управления использованием спектра, планирования и проектирования. Однако на характеристики и качество обслуживания, особенно в случае систем с цифровой модуляцией, могут влиять маломасштабные эффекты, связанные с наличием строений, топографическими особенностями и т. д. В заключение приводится информация о результатах измерений и об относительной фазе земной волны.

2 Развитие теории распространения поверхностных волн

В 1909 году Зоммерфельд [1] получил решение задачи об излучении вертикального электрического диполя на плоской границе раздела между изолятором и проводником. Работа Зоммерфельда не была пригодна для практического применения в инженерной деятельности, и, кроме того, в ней содержалась ошибка, которая вела к определенной путанице. В 1936 году Нортону [2] удалось в значительной мере преодолеть эти проблемы, и в следующей его работе, изданной в 1937 г. [3], был представлен метод

расчета распространения над плоской поверхностью Земли. Благодаря серии работ Ван дер Поля и Бреммера [4], опубликованных в 1937–1939 годах, стало возможным рассчитывать значения напряженности поля в удаленных точках сферической поверхности Земли с использованием остаточного ряда. Еще одна работа Нортон [5], изданная в 1941 году, сделала данный метод более пригодным для применения в инженерной практике.

Однако эти методы не позволяли учитывать вариации постоянных земной поверхности (диэлектрической постоянной и проводимости) вдоль трассы распространения. Данный аспект особенно важен при наличии смешанной сухопутно-морской трассы, значения проводимости на которой могут различаться примерно в тысячу раз. В 1949 году Миллингтон [6] представил полуэмпирический метод, позволяющий получить довольно точные результаты для трассы, который учитывал изменения постоянных земной поверхности. В 1952 году Хаффорд [7] опубликовал работу, в которой были учтены произвольные изменения постоянных земной поверхности и формы Земли вдоль трассы распространения. Это выражено в виде интегрального уравнения, которое на практике не поддается решению вручную. Компьютерный метод решения данного уравнения был опубликован в 1970 году Оттом и Берри [8].

В 1982 году Хиллом [9] был описан аналитический метод, расширяющий метод Отта и Берри [8] и позволяющий прогнозировать распространение радиоволн в лесистых и застроенных местностях, где такие местности представлены как диэлектрические слои на неоднородном рельефе. Исходный код приведен в дополнении к отчету Хилла. В последующих работах, опубликованных Деминко [10], [11] в 1986 году, были представлены удобные для использования компьютерные реализации моделей Отта-Берри [8] и Хилла [9]. Среди этих компьютерных моделей Деминко имелась также модель распространения земных волн на смешанной трассе для гладкой сферической Земли, в которой использован описываемый далее метод Миллингтона [6], [19], [20] для расчета смешанных трасс, а также модели различных антенн, работающих в диапазонах НЧ, СЧ и ВЧ, для проведения системных вычислений. Компьютерные модели прошли проверку с использованием результатов измерений, полученных Киссиком и др. [12], [13], Оттом, Фоглером, Хаффордом [14], а также Адамсом и др. [15]. В более поздних работах Деминко [16], [17], изданных в 1999 и 2000 годах, модели смешанной трассы для гладкой сферической Земли и смешанной трассы для неоднородной земной поверхности были объединены с моделями антенн и системными расчетами, в результате чего была получена модель НЧ/СЧ на базе ОС Windows [15], [17], которая могла применяться на практике в качестве инструмента анализа прогнозов для трасс "из пункта в пункт" и "из пункта в зону" как для наземных, так и для приподнятых антенн. В эту систему также вошел ряд моделей ионосферного распространения.

Ротерем [18], [19], [20] изучил влияние земной атмосферы на распространение поверхностных волн, а затем занялся разработкой общего метода прогнозирования распространения земных волн и соответствующей компьютерной программы. Этот метод включает экспоненциальный профиль индекса атмосферной рефракции и является основой кривых распространения для наземных антенн, приведенных в Рекомендации МСЭ-R P.368.

Соответствующая программа, предназначенная для прогнозирования напряженности поля земной волны как для наземных, так и для приподнятых антенн над гладкой сферической поверхностью Земли (GRWAVE), доступна на веб-странице 3-й Исследовательской комиссии МСЭ-R.

Проведенные ранее циклы измерений радиовещательных передач выявили наличие аномалий в распространении радиоволн в городских районах. Косбрук [21], [22] также установил, что городские районы и неоднородный рельеф нельзя описать в простой форме, поскольку ток, протекающий в вертикальных проводниках и даже в листве деревьев, фактически создает индуктивный проводящий слой на земной поверхности. В результате создается затухание, которое сильно различается в зависимости от расстояния, по сравнению со случаем простой гладкой Земли, а отношение напряженности электрического поля к напряженности магнитного поля в этой среде с множеством препятствий не равно внутреннему полному сопротивлению свободного пространства.

Наблюдаемый в последнее время интерес к цифровым методам модуляции привел к возобновлению интереса к маломасштабным локальным изменениям уровня сигналов, которые в случае мобильного приема соответствуют временному замиранию, поскольку могут влиять на качество принимаемого сигнала.

3 Теория распространения поверхностных волн

3.1 Введение в теорию

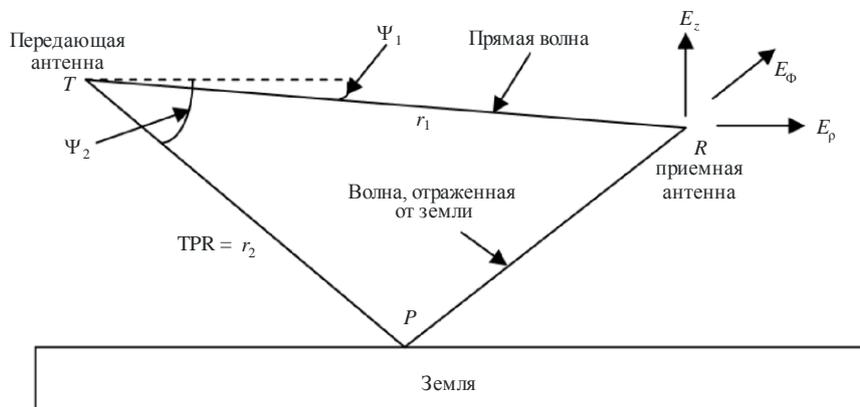
Рассмотрим простейшую передающую антенну T над идеально проводящей плоской земной поверхностью, как показано на рисунке 1. Напряжение V , индуцированное в приемной антенне в произвольном положении R , может быть выражено как сумма векторов прямого и отраженного от земли компонентов:

$$V = QI \left\{ Q_1 \frac{\exp(-jk r_1)}{r_1} + Q_2 R \frac{\exp(-jk r_2)}{r_2} \right\}, \quad (1)$$

где I – ток в передающей антенне, Q – постоянная, Q_1 и Q_2 учитывают полярные диаграммы направленности передающей и приемной антенн, R – соответствующий коэффициент отражения, а k – волновое число $= 2\pi/\lambda$. Прочие слагаемые определены на рисунке 1.

РИСУНОК 1

Геометрия прямой и отраженной от земли волн



Ground Wave Prop. 01

Во многих случаях, особенно если частота излучаемого сигнала находится в полосе ОВЧ или более высоких частот, вышеприведенный расчет дает результат, идеально подходящий для практического применения. Однако полное описание поля в точке R требует введения дополнительного слагаемого в сумму векторов:

$$V = QI \left\{ Q_1 \frac{\exp(-jk r_1)}{r_1} + Q_2 R \frac{\exp(-jk r_2)}{r_2} + S \frac{\exp(-jk r_2)}{r_2} \right\}, \quad (2)$$

где S – сложный множитель, зависящий от электрических свойств почвы, поляризации передаваемого сигнала, частоты и расположения оконечных устройств.

Вводимое таким образом слагаемое хочется считать несущественным, представляющим интерес главным образом для специалистов в области математической физики. Однако это третье слагаемое представляет поверхностную волну, а данный режим распространения имеет большое практическое значение для систем радиосвязи, работающих в диапазоне ВЧ и ниже.

Иногда эта комбинация волн, отображенная в уравнении (2), называется земной волной, которая состоит из пространственной волны и поверхностной волны:

$$\text{земная волна} = \underbrace{\text{прямая волна} + \text{отраженная волна}}_{\text{пространственная волна}} + \text{поверхностная волна}$$

Но терминология в разных источниках может различаться, и поверхностная волна часто называется земной волной, а иногда именуется земной волной Нортон или поверхностной волной Нортон в честь Нортон, разработавшего простые методы ее расчета.

Если точки T и R расположены близко к земной поверхности, то коэффициент отражения от земной поверхности равен -1 , а прямая и отраженная от земли волны гасят друг друга, в результате чего единственным значимым компонентом остается поверхностная волна.

3.2 Теория для однородной гладкой Земли

3.2.1 Плоская Земля с конечным значением проводимости

Теория плоской Земли Зоммерфельда-Нортон:

Зоммерфельд [1] и Нортон [2], [3] вывели выражения для компонентов напряженности поля земной волны над плоской поверхностью Земли с конечной проводимостью, связанные с коротким вертикальным элементом тока. В полной форме уравнение 2 выглядит так:

$$E_z = j30kIdl \left[\left\{ \cos^2 \psi_1 \frac{\exp(-jk r_1)}{r_1} + \cos^2 \psi_2 R_v \frac{\exp(-jk r_2)}{r_2} \right\} + \left\{ (1 - R_v)(1 - u^2 + u^4 \cos^2 \psi_2) F \frac{\exp(-jk r_2)}{r_2} \right\} \right], \quad (3)$$

$$E_p = -j30kIdl \left[\sin \psi_1 \cos \psi_1 \frac{\exp(-jk r_1)}{r_1} + \sin \psi_2 \cos \psi_2 R_v \frac{\exp(-jk r_2)}{r_2} - \cos \psi_2 (1 - R_v) u \sqrt{1 - u^2 \cos^2 \psi_2} \left\{ 1 - \frac{u^2}{2} (1 - u^2 \cos^2 \psi_2) + \frac{\sin^2 \psi_2}{2} \right\} F \frac{\exp(-jk r_2)}{r_2} \right], \quad (4)$$

где ψ_1 и ψ_2 определены на рисунке 1, Idl – произведение тока источника и длины ("дипольный момент"), R_v – коэффициент отражения плоской волны Френеля для вертикальной поляризации, а F – функция затухания, зависящая от типа почвы и длины трассы. F задается выражением:

$$F = \left[1 - j \sqrt{(\pi w) \exp(-w) \left\{ \operatorname{erfc} \left(j \sqrt{w} \right) \right\}} \right], \quad (5)$$

где erfc – дополнительная функция ошибок, а

$$w = \frac{-j2kr_2 u^2 (1 - u^2 \cos^2 \psi_2)}{(1 - R_v)}, \quad (6)$$

$$u^2 = \frac{2}{(\epsilon_r - jx)} \quad (7)$$

и

$$x = \frac{\sigma}{(w \epsilon_0)} = 1,8 \times 10^4 \frac{\sigma}{f_{MГц}}, \quad (8)$$

где σ – проводимость земной поверхности в См/м, $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ – относительная диэлектрическая проницаемость земной поверхности, а $f_{MГц}$ – частота в МГц.

Следует отметить, что уравнения (3) и (4) представляют компоненты поля в вертикальном и радиальном направлениях цилиндрической системы координат.

3.2.1.1 Особый случай наземных оконечных устройств

Если точки T и R находятся на земле, а $R_v = -1$ и $\psi_1 = \psi_2 = 0$, прямая и отраженная от земли волны действуют в противоположных направлениях и в сумме дают нуль. Подобные условия имеют место во многих практических приложениях на низких частотах. В этом случае преобладает поверхностная волна, которая может быть описана путем некоторого упрощения уравнений (3) и (4), следовательно:

$$E_z = j60kIdl(1-u^2+u^4)F \frac{\exp(-jkr)}{r}, \quad (9)$$

$$E_p = j30kIdl \left\{ u \sqrt{(1-u^2)(2-u^2+u^4)} \right\} F \frac{\exp(-jkr)}{r}. \quad (10)$$

Таким образом, для поверхностных волн с наземными антеннами по-прежнему присутствуют вертикальный и радиальный компоненты электрического поля. На языке физики это означает, что фронт распространяющейся волны является наклонным. Радиальный компонент, заданный уравнением (10), незначителен относительно вертикального компонента, описываемого уравнением (9). Соотношение фаз таково, что фронт волны имеет умеренный наклон в направлении распространения. Степень наклона зависит от проводимости почвы и частоты. Результаты измерения наклона волны могут использоваться для получения электрических параметров локального участка земли (см. п. 18.3.3). Поскольку величина E_p является конечной, а магнитный компонент поля – горизонтальным, то существует убывающий компонент вектора Пойнтинга и энергия горизонтально распространяющейся волны теряется. В связи с этим появляется дополнительное затухание волны помимо затухания, обусловленного стандартным рассеянием по обратно квадратичному закону. В рамках теории Зоммерфельда-Нортонa это дополнительное затухание выражается членом F – см. уравнение (5), в котором для наземных оконечных устройств величина w приведена к упрощенному виду:

$$w = \frac{-jkr u^2}{2} (1-u^2). \quad (11)$$

3.2.1.2 Интерпретация результатов

Прогнозирование радиопокрытия почти всегда осуществляется в единицах напряженности электрического поля. Это справедливо также в отношении НЧ- и СЧ-радиовещания, хотя большинство бытовых радиоприемников оборудованы магнитными антеннами в виде ферритовых стержней. За исключением случаев, когда среда с множеством местных препятствий содержит вертикальные проводники (см. разделы 11 и 12), распространяющаяся поверхностная волна включает горизонтальный магнитный компонент H_ϕ , который приблизительно связан с главным электрическим компонентом выражением:

$$H_\phi = -\frac{E}{Z_0}, \quad (12)$$

где Z_0 – внутреннее полное сопротивление свободного пространства (120π Ом). Таким образом, этого достаточно для планирования зон покрытия служб радиосвязи в единицах напряженности электрического поля.

Затухание поверхностной волны возникает из-за наклона ее электрического поля вперед. Скорость затухания становится все более заметной по мере увеличения угла наклона. Путем комбинирования уравнений (9) и (10) можно отобразить отношение компонентов электрического поля простой формулой:

$$\frac{E_p}{E_z} \approx u = \frac{1}{\sqrt{K_r}}, \quad (13)$$

где K_r – комплексная диэлектрическая проницаемость земной поверхности. Она изменяется в зависимости от частоты и электрических свойств земной поверхности.

Некоторые типовые значения приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1

Типовые значения K_r (комплексная диэлектрическая проницаемость) для различных типов земной поверхности и частот

Тип земной поверхности	Частота (кГц)	
	200 (НЧ)	1 000 (СЧ)
Море ($\sigma = 5$ См/м, $\epsilon_r = 70$)	70-j450 000	70-j90 000
Земля с хорошей проводимостью ($\sigma = 10^{-2}$ См/м, $\epsilon_r = 10$)	10-j900	10-j180
Земля с плохой проводимостью ($\sigma = 10^{-3}$ См/м, $\epsilon_r = 4$)	4-j90	4-j18

Большие значения K_r соответствуют небольшому наклону вперед и, следовательно, низкому затуханию. Морская вода имеет очень высокую проводимость, и поверхностная волна, обладающая почти вертикальным электрическим полем, распространяется над поверхностью воды с относительно низким затуханием. С другой стороны, затухание поверхностной волны имеет максимальное значение над земной поверхностью с низкой проводимостью и на высоких радиочастотах.

Множитель $(1 - u^2 + u^4)$ в уравнении (9) практически всегда близок к единице. Таким образом, можно показать, что амплитуда вертикального компонента электрического поля задается выражением

$$|E_z| = \frac{300}{r} \sqrt{P} |F|, \quad (14)$$

где P – суммарная мощность, излучаемая диполем Герца (элементом тока) или коротким вертикальным излучателем, выраженная в кВт, r – это длина трассы в км, а E – напряженность электрического поля в мВ/м.

Это уравнение применяется для короткой вертикальной антенны, расположенной на идеально проводящей плоской земной поверхности, и дает эталонное значение.

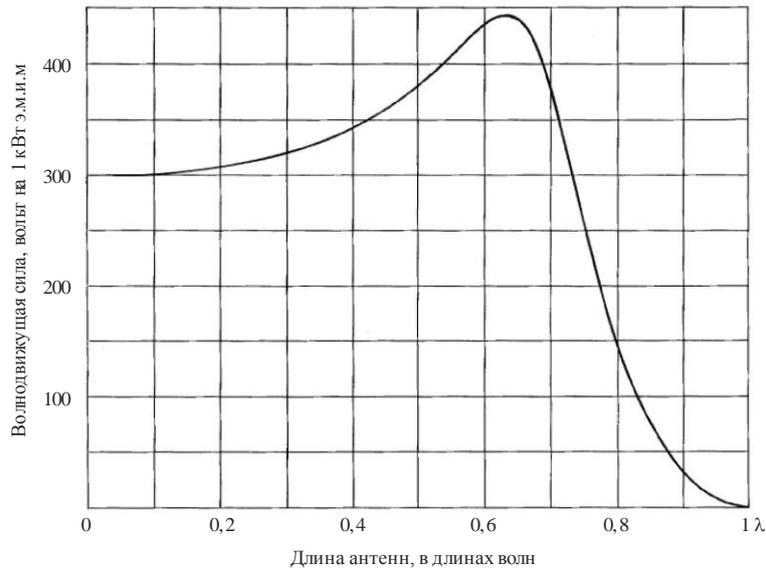
В пределах нескольких длин волн антенны постоянная $|F|$ приблизительно равна единице, а напряженность поля изменяется как $1/r$, то есть обратно пропорционально расстоянию. На достаточно больших расстояниях, пока действует допущение Зоммерфельда о плоской поверхности Земли, $|F|$ постепенно становится обратно пропорциональной расстоянию; другими словами, напряженность поля изменяется как $1/r^2$.

Для четвертьволновой ($\lambda/4$) вертикальной антенны постоянная в правой части уравнения (14) становится равной 314 (см. Рекомендацию МСЭ-R P.341, Приложение 1, таблица 1, где эта постоянная отображена как волнодвижущая сила).

На рисунке 2 приведены соответствующие значения постоянной для заземленных вертикальных антенн различной высоты.

РИСУНОК 2

Волнодвижущая сила для вертикальных антенн над идеально проводящей плоской поверхностью Земли



Ground Wave Prop. 02

3.2.2 Сферическая Земля с конечным значением проводимости

Математические расчеты распространения земной волны вокруг искривленной поверхности Земли являются сложными, и в них порой трудно разобраться. Они описаны Бреммером [23]. На малых расстояниях модель распространения земных волн Зоммерфельда может применяться без адаптации. На более дальних расстояниях необходимо рассчитывать поля с надлежащим учетом дифракции волн вокруг искривленной поверхности Земли. Существует еще третий режим, как правило относящийся к расстояниям за пределами расстояния, на котором наблюдается изменение поля по обратно-квадратичному закону, где уменьшение напряженности поля становится экспоненциальным на искривленной поверхности Земли. Расстояние, на котором эти изменения принимают экспоненциальный характер, можно рассчитать с помощью приводимого ниже выражения. Земля может считаться плоской на расстоянии d (в километрах), задаваемом формулой из работы [24]:

$$d = \frac{80}{\sqrt[3]{f(\text{МГц})}} \quad (15)$$

Не считая этого дополнительного изменения на дальних расстояниях, большинство других характеристик поверхностной волны над сферической Землей идентичны тем, которые были получены на основе модели плоской Земли Зоммерфельда.

3.3 Влияние атмосферы

В теоретических работах Зоммерфельда, Нортон, ван дер Поля и Бреммера влияние атмосферы не учитывалось в предположении, что в пространстве над земной поверхностью волны распространяются по прямой линии. В реальных условиях атмосфера Земли имеет слоистую структуру и обладает индексом рефракции, который, как правило, уменьшается с увеличением высоты. В среднем изменение индекса рефракции в зависимости от высоты происходит по экспоненциальному закону (см. Рекомендацию МСЭ-R P.453).

В атмосфере, где индекс рефракции уменьшается с увеличением высоты, радиоволны преломляются вниз, по направлению к Земле. В пределах первого километра над поверхностью Земли экспоненциальное изменение может быть приблизительно выражено как линейное уменьшение, и в этом случае, искусственно увеличивая эквивалентный радиус Земли, можно считать, что трассы распространения радиоволн проходят по прямым линиям. Такая трактовка часто применяется в диапазоне ОВЧ и выше [25], при этом типичное значение коэффициента эквивалентного радиуса Земли равно 4/3.

Для поверхностных волн на частотах ниже 10 кГц влиянием атмосферы можно пренебречь, и коэффициент стремится к единице [26]. Вблизи полосы СЧ-радиовещания для большинства типов земной поверхности коэффициент находится в диапазоне 1,20–1,25 (см. работу Ротерема [18]).

Эти результаты действительны для типичных атмосферных условий (индекс рефракции на уровне моря составляет $N_o = 315$, а приведенная высота равна 7,35 км) и используются в графическом представлении данных в Рекомендации МСЭ-R P.368. В нетипичных атмосферных условиях для моделирования преобладающих эффектов распространения радиоволн может потребоваться другой коэффициент эквивалентного радиуса Земли. Информация об атмосферных условиях может быть получена из результатов местных климатических наблюдений или из Рекомендации МСЭ-R P.453, и эти параметры могут использоваться в качестве исходных данных для компьютерной программы GRWAVE.

ЧАСТЬ 2

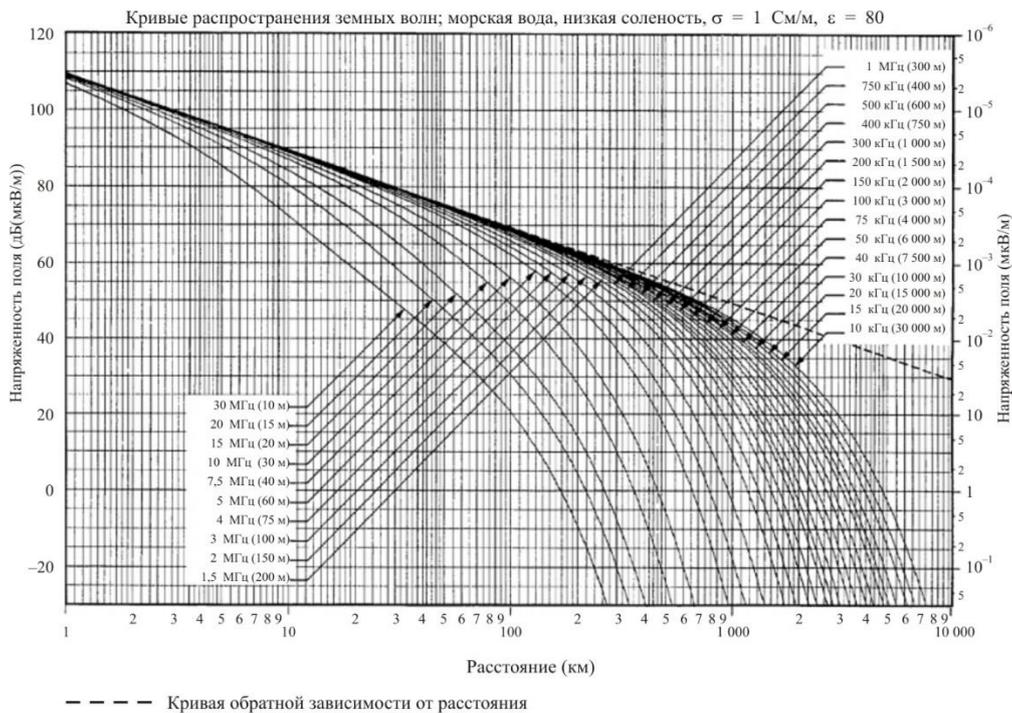
Метод прогнозирования, рекомендованный МСЭ-R

4 Рекомендация МСЭ-R P.368

Рекомендованные МСЭ-R кривые распространения для напряженности поля земной волны, основанные на описанных в разделе 3, выше, принципах и рассчитанные с помощью компьютерной программы GRWAVE, приведены в Рекомендации МСЭ-R P.368. Хотя этот метод применяется строго для гладкой Земли, удовлетворительные прогнозы можно получить и для земной поверхности с неровностями, высота которых невелика по сравнению с длиной волны, а также при отсутствии резких перепадов высоты. Изменчивость, связанная с незначительными неровностями поверхности, которая может влиять на качество обслуживания, рассматривается в настоящем Справочнике далее. В справочных документах [10], [11] приведены сравнения прогнозируемых данных с результатами измерений, показывающие, как расчеты для гладкой сферической Земли соотносятся с расчетами для неровной поверхности Земли. Эта информация может использоваться для определения того, когда вместо модели гладкой Земли необходимо использовать модель неровной поверхности Земли. По возможности желательно использовать модель гладкой Земли, поскольку даже на современных быстрых компьютерах обработка модели неровной поверхности Земли для смешанной трассы занимает слишком много времени. В этих справочных документах также рассматривается вопрос разрешения рельефа для обеспечения точности расчета распространения над неоднородным рельефом на частотах в диапазоне НЧ и СЧ.

РИСУНОК 3

Пример кривых, приведенных в Рекомендации МСЭ-R P.368



Кривые распространения для высоких частот приведены в Справочнике МСЭ-R "Кривые распространения радиоволн над поверхностью Земли", а конкретные аспекты распространения на этих высоких частотах рассматриваются в различных Рекомендациях (см. Рекомендацию МСЭ-R P.1144).

Хотя кривые распространения земных волн относятся к антеннам, установленным на уровне земли, они могут также использоваться для приподнятых антенн, когда $\epsilon_r \ll 60\sigma\lambda$ для значений высоты вплоть до $h = 1,2\sigma^{1/2}\lambda^{3/2}$.

В рассматриваемой Рекомендации приведены два набора кривых. Первый набор содержит кривые для частот между 10 кГц и 30 МГц, в нем каждый рисунок соответствует отдельному значению констант почвы (используемые константы почвы перечислены в таблице 2). Пример этих кривых представлен на рисунке 3. Для удобства во втором наборе кривых приведена также альтернативная классификация, в нем каждый рисунок соответствует одной частоте (от 30 до 3000 кГц) и определенному диапазону констант почвы.

ТАБЛИЦА 2

Кривые распространения земных волн для различных значений констант почвы, приведенные в Рекомендации МСЭ-R P.368

Номер рисунка	Описание	Проводимость (См/м)	Относительная диэлектрическая проницаемость
1	Морская вода, низкая соленость	1	80
2	Морская вода, средняя соленость	5	80
3	Пресная вода	3×10^{-3}	80
4	Суша	3×10^{-2}	40
5	Влажная почва	1×10^{-2}	30
6	Суша	3×10^{-3}	22
7	Среднесухая почва	1×10^{-3}	15
8	Сухая почва	3×10^{-4}	7
9	Очень сухая почва	1×10^{-4}	3
10	Пресноводный лед, $-1\text{ }^\circ\text{C}$	3×10^{-5}	3
11	Пресноводный лед, $-10\text{ }^\circ\text{C}$	1×10^{-5}	3

Каждый набор кривых включает также кривую обратной зависимости от расстояния, представленную в виде прямой пунктирной линии.

Для практического удобства кривые приведены для 1 кВт э.м.и.м.; то есть мощности 1 кВт, излучаемой во всех направлениях коротким вертикальным излучателем, расположенным на гладкой сферической поверхности Земли. Необходимо делать поправки на фактическую или предполагаемую мощность передачи, на потери в цепи питания антенны, на азимутальную диаграмму направленности, в случае использования системы направленных антенн, а также на длину антенных элементов (на рисунке 2 показано изменение усиления в зависимости от высоты антенны в единицах волнодвижущей силы; в Рекомендации МСЭ-R P.341 также указано усиление для некоторых эталонных антенн). Кроме того, следует делать поправки на потери энергии в наземной радиальной системе антенны. Метод измерения фактической э.м.и.м. существующей системы описан в п. 18.2.

Программа GRWAVE написана для той же мощности в 1 кВт, излучаемой во всех направлениях коротким вертикальным излучателем, расположенным на гладкой сферической поверхности Земли. Для достижения этой цели дипольный момент, используемый в расчетах, составляет $5\lambda/2\pi$.

Следует отметить, что использование понятия "потери при передаче" может привести к путанице в тех случаях, когда из-за присутствия земли излучение происходит только в полупространстве над земной поверхностью (см. Рекомендацию МСЭ-R P.341, Приложение 2).

Кривые задают общее поле на расстоянии r с погрешностью менее 1 дБ, когда k/r превышает величину, примерно равную 10, где $k = 2\pi/\lambda$. Можно учесть влияние ближнего поля, если увеличить напряженность поля (в децибелах) на величину:

$$10\log\left\{1 - \frac{1}{(kr)^2} + \frac{1}{(kr)^4}\right\}. \quad (16)$$

При этом можно получить общее поле с точностью $\pm 0,1$ дБ для моря и влажной почвы, а также с точностью ± 1 дБ для почвы с любой проводимостью, превышающей 10^{-3} См/м.

В справочном документе [27] рассматривается небезынтесный вопрос точности определения границы перехода от ближнего поля к дальнему полю в плане минимизации разницы фаз электрического поля на апертуре любой из антенн, амплитудной погрешности прогнозируемого значения напряженности поля и расстояния, необходимого для того, чтобы сделать слагаемые $1/r^2$ и $1/r^3$ электрического поля либо значительными (ближнее поле), либо пренебрежимо малыми (дальнее поле) по сравнению с полем $1/r$.

5 Поверхностное полное сопротивление

Альтернативным способом учета потерь, связанных с распространением земной волны, является рассмотрение сначала обратной квадратической зависимости от расстояния для мощности сигнала (обратной зависимости от расстояния для напряженности поля, как показано в Рекомендации МСЭ-R P.368), а затем отдельное выражение затухания вследствие потерь при распространении поверхностного сигнала.

Коэффициент затухания может быть представлен [28] как:

$$A = 1 - i\sqrt{\pi\rho} \exp(-\rho) \operatorname{erfc}(i\sqrt{\rho}), \quad (17)$$

а ρ может быть выражено как:

$$\rho = -\frac{i\pi\eta^2 r}{\lambda}, \quad (18)$$

где η – поверхностное полное сопротивление, заданное выражением:

$$\eta = \frac{(\varepsilon - i60\sigma\lambda - 1)^{1/2}}{\varepsilon - i60\sigma\lambda}. \quad (19)$$

Поверхностное полное сопротивление является удобным способом описания особенностей сложной поверхности, таких как неровности рельефа, деревья, искусственные сооружения, здания и морские волны.

6 Проводимость земной поверхности

6.1 Проводимость для суши

Приведенная в Рекомендации МСЭ-R P.368 информация для начального планирования и оценки совместимости или повторного использования частот и соответствующие процедуры в программе GRWAVE четко определены и широко применяются. Однако в расчете констант почвы, особенно проводимости, вероятно, содержится наибольшая неопределенность. Электрические характеристики

поверхности Земли рассматриваются в Рекомендации МСЭ-R P.527. Следует отметить, что, как предполагается, эти характеристики не зависят от частоты в диапазоне ВЧ и ниже (за исключением характеристик пресноводного льда в диапазонах НЧ и ОНЧ).

Однако необходимо принять к сведению ожидаемую глубину проникновения радиоволн в почву (глубину поверхностного слоя)¹. Для морской воды глубина проникновения (глубина, на которой сигналы ослабевают до $1/e$ от значения на поверхности) составляет лишь около 25 см на частоте 1 МГц. Однако для среднесухой почвы она равна примерно 25 м. Таким образом, при определении или расчете эффективной проводимости для использования при прогнозировании зон покрытия в диапазоне СЧ (и, еще больше, в диапазоне НЧ) важно надлежащим образом учитывать геологию поверхностного слоя. Дополнительную информацию о глубине проникновения электрического поля в почву (глубине поверхностного слоя почвы) и результаты измерения диэлектрических свойств почвы можно найти в справочном документе [68].

Методы определения проводимости с использованием земных зондов или других методов измерения образцов почвы вряд ли могут дать полезные результаты, поскольку в этом случае, как правило, измеряются характеристики лишь верхнего слоя почвы. Наиболее достоверные результаты измерений могут быть получены с помощью тестовых или действующих передатчиков и проведения серии измерений на различных расстояниях, см. п. 18.3.

В Рекомендации МСЭ-R P.832 приведены карты проводимости для диапазонов ОНЧ и СЧ. Карты ОНЧ относятся к континентальным зонам и распространяются почти на все сухопутные зоны мира. Карты СЧ приведены для множества отдельных стран или групп стран согласно предоставленной информации. В Мнении МСЭ-R 91-1 предлагается, чтобы администрации проверили и, в случае необходимости, пересмотрели информацию, содержащуюся в Мировом атласе, учитывая, что в некоторых случаях может потребоваться включить изменения, носящие сезонный характер; чтобы новые администрации убедились, что существующий Мировой атлас проводимости почвы охватывает их потребности, и внесли свой вклад в пересмотр имеющихся в нем данных; и чтобы для тех стран, в отношении которых в Мировом атласе не содержится данных о проводимости почвы, соответствующие администрации собрали и предоставили данные согласно информации, содержащейся в Рекомендации МСЭ-R P.832.

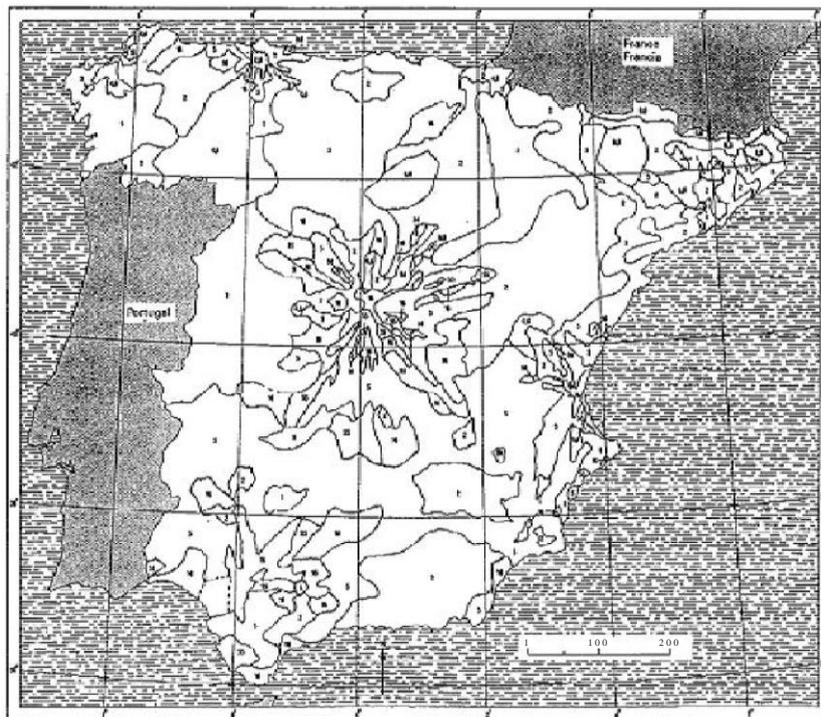
¹ Глубина поверхностного слоя в произвольном материале задается формулой:

$$\delta = \left(\frac{\sqrt{2}}{\omega \sqrt{\mu_r \mu_0 \varepsilon_r \varepsilon_0}} \right) \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_r \varepsilon_0} \right)^2} - 1 \right]^{-1/2}, \quad (20)$$

где δ – глубина поверхностного слоя, $\omega = 2\pi f$, σ – проводимость, μ_0 – проницаемость свободного пространства, μ_r – относительная проницаемость, ε_0 – удельная проводимость свободного пространства, а ε_r – относительная удельная проводимость.

РИСУНОК 4

Пример карты проводимости почвы, включенной в Рекомендацию МСЭ-R P.832



Ground Wave Prop. 04

Для случаев отсутствия подробной информации в Рекомендацию включена общемировая карта проводимости в диапазоне СЧ. Однако эта карта дает лишь общее представление о проводимости, которое подходит для глобальной или региональной оценки требований к спектру, но вряд ли пригодно для отдельных расчетов покрытия. При отсутствии прочей информации лучшим способом расчета проводимости является изучение геологических карт и сравнение условий в конкретном районе с другим районом мира с похожими геологическими и климатическими условиями.

6.2 Проводимость для моря

Для морской воды в Рекомендации МСЭ-R P.368 приведены прогнозируемые значения типичной и низкой проводимости, равные 5 и 1 См/м. Однако проводимость зависит от солености и температуры морской воды, поэтому для получения более точных прогнозов в программе GRWAVE могут использоваться предполагаемые значения проводимости.

Проводимость морской воды задается выражением:

$$\sigma = 0,18C^{0,93} (1 + 0,02 (T - 20)) \quad (\text{См/м}), \quad (21)$$

где:

C : соленость (количество граммов соли на литр);

T : температура (°C).

В холодных морях σ составляет порядка 3,5 См/м, а в теплых – около 5 См/м.

ЧАСТЬ 3

Отклонение от основной процедуры прогнозирования

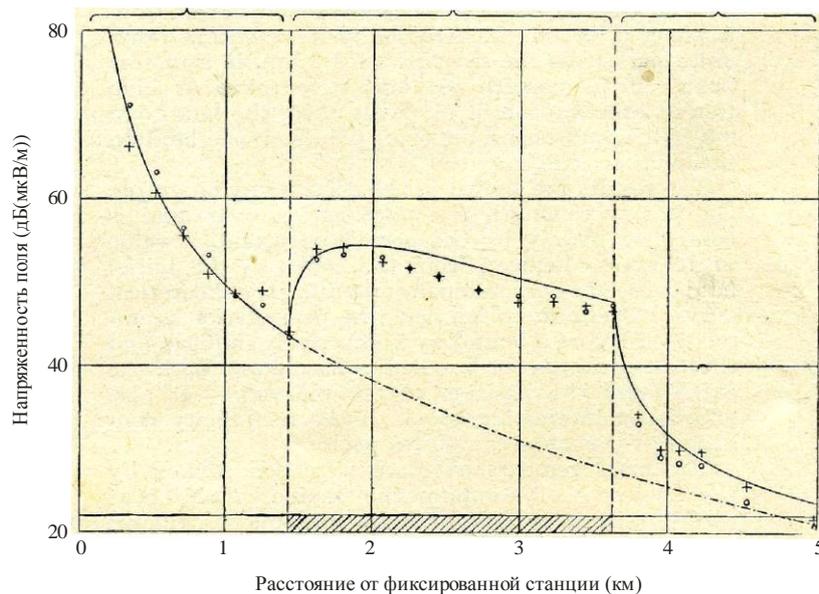
7 Гладкая поверхность Земли со смешанной проводимостью

7.1 Эффект восстановления при распространении над морем

Если характеристики земной поверхности вдоль трассы распространения меняются, то наблюдается неожиданное изменение результирующей напряженности поля с изменением расстояния. Напряженность поля для трассы, проходящей сначала над сушей, потом над морем, а затем снова над сушей, при прохождении над первым участком суши уменьшается, но при достижении береговой линии восстанавливается, быстро увеличиваясь, а затем более плавно снижаясь, и при последующем пересечении береговой линии снова резко уменьшается. Существовавшие ранее методы решения данной проблемы приводили к неверным результатам, которые не удовлетворяли требованиям обратимости. Миллингтоном [6] была определена процедура, которая смогла обеспечить обратимость и удовлетворительные результаты для умеренно гладкой Земли, аналогичные результатам, полученным при использовании более сложного метода, разработанного Хаффордом [7]. Теоретические исследования распространения радиоволн над сложной поверхностью хорошо согласуются с экспериментальными результатами [29].

РИСУНОК 5

Первоначальное проявление эффекта восстановления
земной волны над морем на частоте 77 МГц

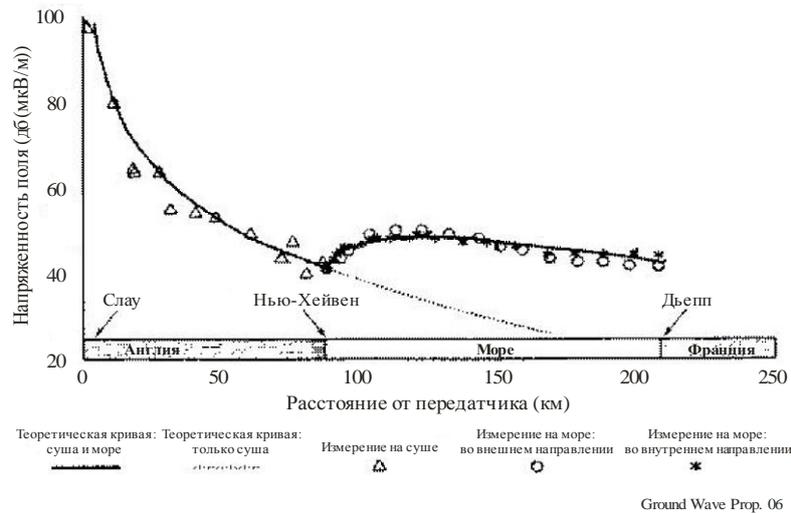


Ground Wave Prop. 05

Первые эксперименты, в ходе которых проявился этот эффект восстановления, были проведены Миллингтоном на частоте 77 МГц на небольших расстояниях [30], см. рисунок 5. В целях подтверждения данного эффекта вслед за первым экспериментом был проведен второй на большом расстоянии, через пролив Ла-Манш, на частоте 3 МГц [31], см. рисунок 6.

РИСУНОК 6

Исследование эффекта восстановления земной волны на частоте 3 МГц



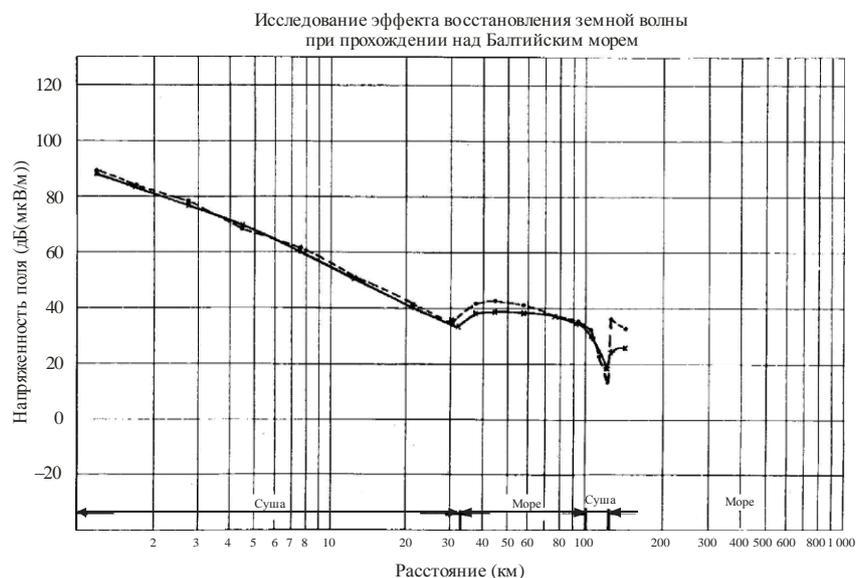
Этот эффект является столь неожиданным, что может возникнуть необходимость в его повторной демонстрации новому поколению инженеров.

Другие подтверждения эффекта восстановления приведены в справочных документах [12], [14]. В них описан эффект восстановления на трассе "суша-море" при хорошей согласованности между прогнозами распространения радиоволн и результатами измерений на частотах в диапазоне 100–2000 кГц. В справочном документе [9] показан аналогичный эффект восстановления при переходе на трассе распространения с лесистого участка на открытое поле на частоте 10 МГц. В справочном документе [32] показаны эффекты восстановления на сухопутно-водных трассах при измерении в диапазоне частот 285–325 кГц.

На рисунке 7 показан результат более сложного эксперимента на частоте 3,9 МГц на трассе "суша-море-суша-море" в Балтийском море [33].

РИСУНОК 7

Экспериментальное исследование эффекта восстановления земной волны при прохождении над Балтийским морем



7.2 Метод Миллингтона для смешанных трасс

Процедура Миллингтона, например, для трассы "суша-море-суша", заключается в следовании кривой напряженности поля земной волны для первого участка суши. На границе берега кривая напряженности поля над морем совпадает со значением напряженности поля над сушей в данной точке. Затем кривая для моря прослеживается до следующего берега и совмещается с соответствующей кривой для суши в этом диапазоне. Кривая для суши прослеживается на требуемое расстояние. Таким образом, получаем первое промежуточное значение. Затем передатчик и приемник меняются местами, и процедура повторяется для трассы в обратном направлении, в результате получаем второе промежуточное значение. Необходимое прогнозируемое значение получается путем вычисления среднего геометрического двух промежуточных значений напряженности поля (или среднего арифметического, если напряженность поля выражена в децибелах).

Данный процесс может быть реализован при помощи простой графической процедуры, если кривые построены с использованием линейной шкалы расстояния либо при помощи простой компьютерной программы.

Эта процедура описана также в Рекомендации МСЭ-R P.368, Приложение 2:

Шаг 1. Для данной частоты выбирается кривая, соответствующая участку S_1 , и далее определяется напряженность поля $E_1(d_1)$ в дБмкВ/м на расстоянии L_1 . **После этого** используется кривая для участка S_2 для определения напряженности полей $E_2(L_1)$ и $E_2(L_1 + L_2)$, и аналогичным образом по кривой для участка S_3 определяются поля $E_3(L_1 + L_2)$ и $E_3(L_1 + L_2 + L_3)$ и т. д.

Шаг 2. Затем напряженность поля принимаемого сигнала определяется как

$$E_R = E_1(L_1) - E_2(L_1) + E_2(L_1 + L_2) - E_3(L_1 + L_2) + E_3(L_1 + L_2 + L_3). \quad (22)$$

Шаг 3. Далее осуществляется обратная процедура, и, обозначив через R передатчик, а через T приемник, получим напряженность поля E_T с помощью следующего уравнения:

$$E_T = E_3(L_3) - E_2(L_3) + E_2(L_3 + L_2) - E_1(L_3 + L_2) + E_1(L_3 + L_2 + L_1). \quad (23)$$

Шаг 4. Требуемое значение напряженности поля задается следующим уравнением:

$$E_M(R) = \frac{(E_R + E_T)}{2} \quad (\text{дБмкВ/м}) \quad (24)$$

7.3 Расчет типового значения проводимости для смешанных трасс в диапазоне СЧ

Как было отмечено выше, расчет проводимости почвы, вероятно, является частью процесса прогнозирования, содержащей наибольшие погрешности, и там, где он применяется, выполнение вышеописанной процедуры прогнозирования для смешанной трассы может быть нецелесообразным для трасс над сушей, где проводимость изменяется не слишком резко. В таких случаях может использоваться метод прогнозирования, основанный на типовом значении проводимости всего сухопутного участка трассы. В справочных документах [32], [13] это допущение подтверждается для частот в полосе НЧ порядка 300 кГц. В справочных документах [12], [14] и [9] это допущение подтверждается для частот в диапазонах НЧ и СЧ. В справочном документе [1] это предположение подтверждается для диапазона ВЧ.

Взвешенная проводимость определяется как среднее значение проводимости вдоль трассы, взвешенное с учетом длины каждого участка проводимости:

$$\sigma_{\text{взвешенная}} (\text{мСм/м}) = \frac{\sum_i \sigma_i \cdot d_i}{\sum_i d_i}, \quad (25)$$

где σ_i представляет различные значения проводимости вдоль трассы, а d_i – длины участков вдоль трассы, имеющих постоянное значение проводимости.

Взвешенная проводимость – это типовое значение проводимости трассы, которое может использоваться в процедуре прогнозирования. Это обеспечивает приемлемые результаты для расчета уровней напряженности поля для всех сухопутных участков смешанных трасс. В случае смешанных трасс "суша-море-суша" взвешенная проводимость должна использоваться только для сухопутных участков, а затем должен применяться метод Миллингтона.

8 Неровность поверхности моря

Эффективная проводимость морской воды рассматривается в разделе 6 для гладкой поверхности моря. Однако морские волны, вызывающие неровность на поверхности моря, создают дополнительные потери, связанные с рассеиванием энергии в режиме распространения поверхностной волны.

Д. Е. Баррик [34], [35] разработал получившую широкое применение теорию распространения земной волны ВЧ-диапазона над неровной (неспокойной) поверхностью моря. Этот метод может быть легко объединен с методом определения напряженности поля земной волны для гладкой Земли. Барриком было установлено, что влияние, оказываемое слегка неровной поверхностью, можно смоделировать путем замены полного сопротивления для гладкой поверхности эффективным поверхностным полным сопротивлением, зависящим от неровности поверхности. Теория Баррика основана на трех допущениях:

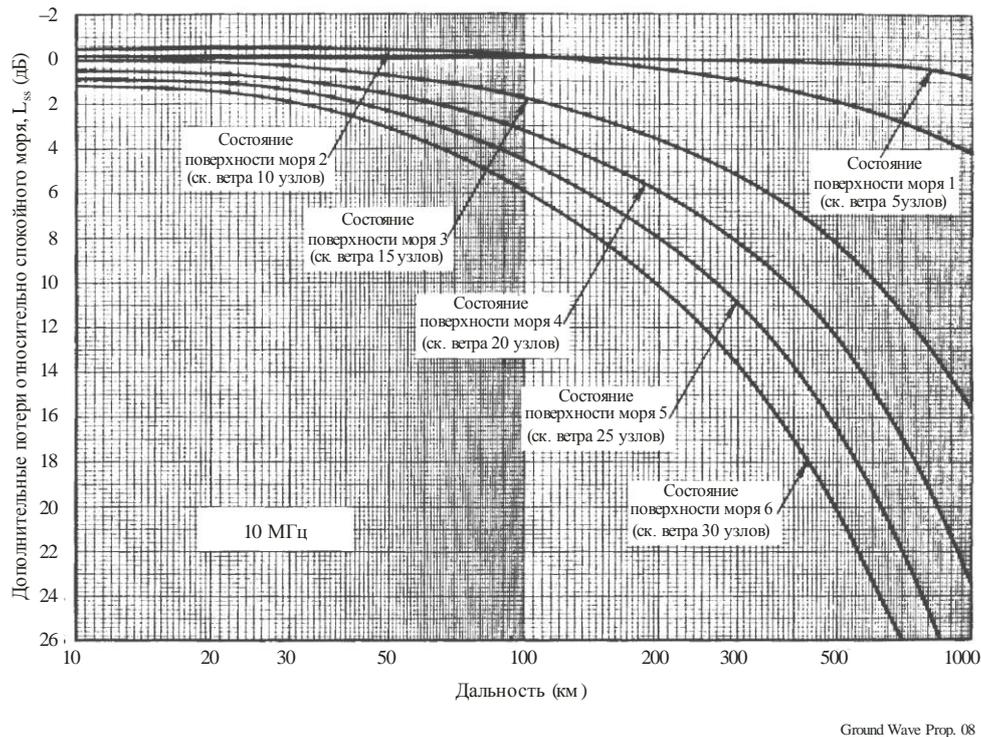
- i) высота поверхности над средней плоскостью невелика в сравнении с длиной радиоволны;
- ii) неровности поверхности имеют малую кривизну;
- iii) подповерхностная среда имеет высокую проводимость.

Эти условия удовлетворяются при распространении радиоволн ВЧ-диапазона над морем. Они нарушаются при распространении ОВЧ-радиоволн над поверхностью моря с умеренным волнением и при распространении радиоволн любой частоты над сушей.

На рисунке 8 приведены примеры потерь, связанных с состоянием поверхности моря, на частоте 10 МГц для модели спектра морской волны, разработанной Филлипсом [36]. Как правило, потери возрастают с увеличением протяженности трассы, степени волнения моря и частоты радиосигнала. На рисунке отображено характерное явление: на расстояниях до 100 км от побережья, но за пределами диапазона, в котором возникает эффект восстановления, напряженность поля над слегка беспокойной поверхностью моря выше напряженности над гладкой поверхностью моря. Это можно увидеть на рисунке 8 для состояния поверхности моря 2 [балла]. При длине волны, равной 295 м, наблюдалось увеличение в 1,5–2 раза [28].

РИСУНОК 8

Потери, связанные с состоянием поверхности моря, на частоте 10 МГц



9 Сельские условия

Средний уровень напряженности поля в сельской местности зависит от электрических свойств почвы, частоты, расстояния до передатчика и значительных изменений характеристик из-за влияния неоднородностей рельефа вблизи места расположения приемника. Все эти аспекты описываются в предыдущих главах.

На практике, в реальных условиях, даже если расстояние между местоположениями намного меньше, чем расстояние до передатчика, условия приема не будут одинаковыми из-за наличия локальных изменений рельефа, деревьев и растительности, зданий и искусственных сооружений, воздушных линий электропередачи и т. д. Во многих случаях на как будто бы открытой местности разница уровней сигнала в расположенных поблизости точках соответствует логарифмически нормальному распределению со стандартным отклонением, усредненное значение которого составляет приблизительно 2–4 дБ.

Особый случай распространения радиоволн при резких перепадах рельефа был исследован Фуруцу [37]. Пример воздействия приведен в работе Пилу [38].

10 Городские условия

10.1 Влияние городских районов с плотной застройкой, от 0,1 до 20 км

10.1.1 Введение

Имеется ряд приложений, для которых радиочастоты в СЧ-диапазоне могут использоваться на коротких расстояниях (например, организация городских и региональных сетей радиовещания, развитие коммунальных служб и т. д.). Таким образом, необходимо знать характеристики поля в СЧ-диапазоне на расстояниях от нескольких десятков метров до десятков километров. Однако распространение и затухание сигналов на средних частотах в городских районах на расстояниях, меньших, чем длина волны, пока изучено недостаточно.

Исследования характера изменений интенсивности дальнего электромагнитного поля в городском районе проводились, например, Косбруком [22] (см. п. 10.2) и Черновым [39].

В ближнем поле напряженность резко возрастает на малых расстояниях, и скорость изменения электрического и магнитного компонентов неодинакова. Компонент, который возрастает больше других, зависит от типа антенны передатчика. В частности, при приближении к электрической антенне (например, к вертикальному монополю) в пределе существует только электрический компонент, вызываемый током, протекающим в антенне.

На малых расстояниях напряженность поля снижается сначала как R^{-3} , затем как R^{-2} , а на дальнем расстоянии как R^{-1} . В условиях городской застройки эти закономерности имеют некоторые особенности.

Первоначальное предположение, подтвержденное предварительными исследованиями, заключается в том, что затухание волн в зонах городской застройки должно быть выше, чем над гладкой земной поверхностью. Если эта разница существенна, то затухание может быть выражено простой формулой.

10.1.2 Краткое изложение теории (см., например, [28], [60])

Напряженность поля, создаваемого простейшим электрическим излучателем в направлении, перпендикулярном оси излучателя, для электрического (E_{el}) и магнитного (H_{el}) компонентов поля описывается как

$$E_{el} = \left(\frac{ijk l Z_0}{4\pi} \right) \left(\frac{\exp(ikR)}{R} \right) \left(1 + \frac{1}{ikR} - \frac{1}{k^2 R^2} \right), \quad (26)$$

$$H_{el} = \left(\frac{ikJl}{4\pi} \right) \left(\frac{\exp(ikR)}{R} \right) \left(1 + \frac{1}{ikR} \right). \quad (27)$$

Аналогичным образом, для магнитного излучателя магнитный (H_m) и электрический (E_m) компоненты могут быть выражены как

$$E_m = \left(\frac{ikJl}{4\pi} \right) \left(\frac{\exp(-ikR)}{R} \right) \left(1 + \frac{1}{ikR} \right), \quad (28)$$

$$H_m = \left(\frac{1kJl}{4\pi Z_0} \right) \left(\frac{\exp(-ikR)}{R} \right) \left(1 + \frac{1}{ikR} - \left(\frac{1}{k^2 R^2} \right) \right), \quad (29)$$

где J – ток в излучателе, l – длина излучателя, Z_0 – волновое сопротивление свободного пространства (120π Ом), а $k = 2\pi/\lambda$. Индексы "el" и "m" обозначают электрический и магнитный излучатели.

В ближнем поле, где $R \approx 1/k$, $\exp(-ikR)$ может стремиться к единице, поэтому

$$E_{el} = JZ_0 / (i4\pi R^3), \quad (30)$$

$$H_{el} = J / (4\pi R^2), \quad (31)$$

$$E_m = J / (4\pi R^2). \quad (32)$$

Из этих выражений видно, что напряженность поля вблизи излучателя резко возрастает и что электрический и магнитный компоненты увеличиваются с различной скоростью. Коэффициент E_{el}/H_{el} в ближнем поле увеличивается обратно пропорционально расстоянию:

$$E_{el}/H_{el} = W / (iR). \quad (33)$$

Из уравнений (26)–(29) видно, что в зоне ближнего поля напряженность поля снижается как R^{-3} , затем как R^{-2} , а в дальней зоне – как R^{-1} . Кроме того, в ближнем поле магнитный и электрический компоненты разделены по фазе примерно на 90° , так что поле, по сути, является реактивным и излучение отсутствует, поскольку вектор Пойнтинга приблизительно равен нулю.

Во многих базовых текстах по электродинамике и антеннам (см., например, [40]) не проводится полный анализ зоны ближнего поля и не описывается, каким образом создается дальнее поле. Однако для текущих задач анализ ближнего поля является необходимым. С этой целью $\exp(-ikR)$ на малых расстояниях может быть приблизительно выражено как $(1 - ikR)$, и тогда уравнения (26) и (27) преобразуются следующим образом:

$$E_{el} = \left(\frac{iJklZ_0}{4\pi R}\right) \left(-\frac{1}{k^2 R^2} - ikR\right), \quad (34)$$

$$H_{el} = \left(\frac{iJkl}{4\pi R}\right) \left(\frac{1}{ikR} - ikR\right). \quad (35)$$

Исходя из этих выражений, модуль вектора Пойнтинга $\Pi = [H_{el}^* E_{el}]$ состоит из двух частей. Первая, мнимая, часть $\Pi_{im} \approx (kJl/4\pi)^2 Z_0 / (k^3 R^5)$; вторая, действительная, часть задается произведением действительной части магнитного компонента (где первый член внутри второй пары скобок, очевидно, имеет большее значение, чем второй) и действительной части электрического компонента. Магнитный компонент вектора уменьшается как $1/R^2$, а электрический компонент остается постоянным. Их произведение дает:

$$\Pi_{Re} \approx (kJl/4\pi)^2 Z_0 / R^2. \quad (36)$$

Таким образом, вблизи передающей антенны скорость уменьшения плотности мощности такая же, как и в дальней зоне, для которой из уравнений (26) и (27) при большом значении R получаем уравнение (36). Другими словами, действительная часть плотности мощности, излучаемой антенной, реагирующей на электрическое поле, изменяется с расстоянием в ближней, средней или дальней зонах как $1/R^2$ в соответствии с обычным законом сферического расширения. Происходит характерное увеличение соотношения мнимого и действительного компонентов вблизи излучателя:

$$\Pi_{im} / \Pi_{Re} = 1 / k^3 R^3. \quad (37)$$

На средних частотах ближняя зона ограничена расстояниями, намного меньшими, чем $1/k$. Таким образом, для длины волны от 200 до 300 м при $1/k$, равном 31–48 м, ближняя зона составляет порядка 10 м.

В дальней зоне на средних частотах на расстоянии, превышающем приблизительно 300–500 м, интенсивность поля задается формулой:

$$E = (300 P^{1/2} / R) \cdot V \quad (\text{мВ/м}) \quad (38)$$

где:

P : излучаемая мощность в кВт;

R : расстояние в км.

Функция затухания V зависит от одного параметра ρ :

$$\rho = -i(\pi R / \lambda) \cdot [(\varepsilon' - 1) / (\varepsilon')^2], \quad \varepsilon' = \varepsilon - i \cdot 60 \lambda \sigma \quad (39)$$

где:

λ : длина волны в метрах;

ε' : комплексная диэлектрическая проницаемость;

ε : действительная часть проницаемости;

σ : проводимость земной поверхности в См/м.

Для значений длины волны в диапазоне 200–300 м (1,5–1,0 МГц) и проводимости σ в диапазоне от 10^{-3} до 10^{-2} См/м:

$$\varepsilon' = \varepsilon - i \cdot 60 \cdot (200 \cdot 10^{-3} \dots 300 \cdot 10^{-2}) = \varepsilon - i \cdot (12 \dots 180).$$

Для почвы с низкой проводимостью ε' первым членом в уравнении (39) можно пренебречь, так что:

$$\rho \approx 10^5 \cdot \pi R / (6 \lambda^2 \cdot \sigma),$$

где R выражено в км, λ – в м, σ – в мСм/м.

Соответственно при $\sigma = 1$ мСм/м и $\lambda = 200$ м для $R = 1$ и 10 км $\rho = 1,31$ и 13,1.

Функция затухания приблизительно выражается как:

$$V = (2 + 0,3\rho) / (2 + \rho + 0,6\rho^2). \quad (40)$$

При больших значениях ρ уравнение (40) обладает зависимостью, близкой к $1/\rho$, а коэффициент затухания пропорционален R^{-1} .

Таким образом, при низкой проводимости почвы и на высоких рабочих частотах зависимость интенсивности поля от расстояния плавно меняется от $1/R$ (26) до $1/R^2$ на расстояниях приблизительно более 1 км. На таких расстояниях, учитывая уравнения (38) и (40), получаем:

$$E = 300 P^{1/2} \cdot 6\lambda^2 \sigma / (10^5 \pi R^2) = 5730 \cdot P^{1/2} \lambda^2 \sigma / R^2 \quad (\text{мкВ/м}), \quad (41)$$

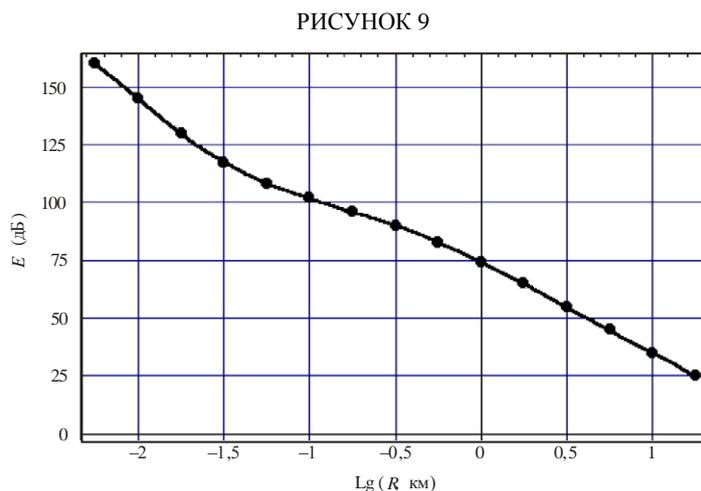
где P выражено в кВт, R – в км, λ – в м, σ – в мСм/м.

Необходимо отметить, что $1/R^2$, как указано в работе [41], теоретически представляет собой наибольшую скорость уменьшения интенсивности поля с расстоянием от передатчика в однородных городских условиях на расстояниях, при которых земная поверхность может считаться плоской. Это выражение определяет ограничивающую зависимость, так что в рамках вышеуказанных допущений более резкое уменьшение с расстоянием можно считать невозможным в любых условиях. Используя данный метод, Ю. А. Чернов [41] получил общее решение, подходящее для всех расстояний, начиная с десятков метров:

$$E(R) = 74,72 - 33,36R - 10,47R^2 - 1,25R^3 + 367R^4 + 077R^5 \quad (\text{дБ(мкВ/м)}), \quad (42)$$

где $R = \lg(R, \text{ км})$.

Эта зависимость показана на рисунке 9.



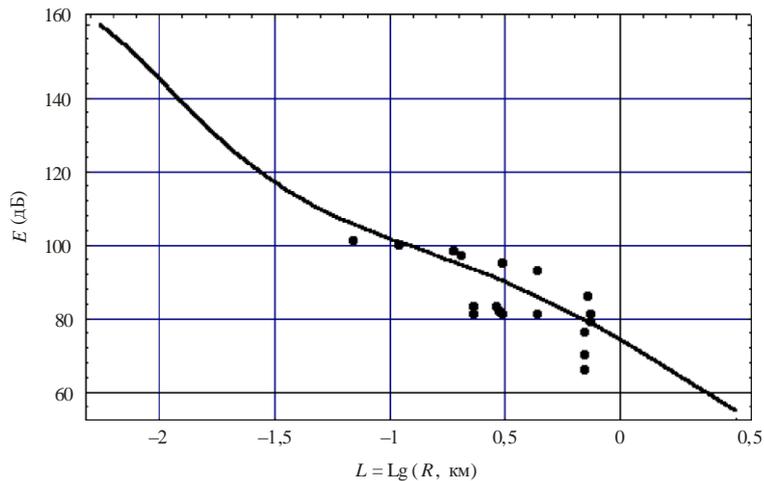
Ground Wave Prop. 09

10.1.3 Результаты измерений

Для оценки погрешности кривой (приведенной на рисунке 9) и для расчета затухания сигналов на СЧ на небольшом удалении от передатчика были проведены измерения, с использованием измерителя напряженности поля с экранированной рамочной антенной, в различных городских условиях на расстоянии до 1000 м от передатчика [41], [61], [63].

Данные измерений интенсивности поля и теоретическая зависимость [41] приведены на рисунке 10.

РИСУНОК 10

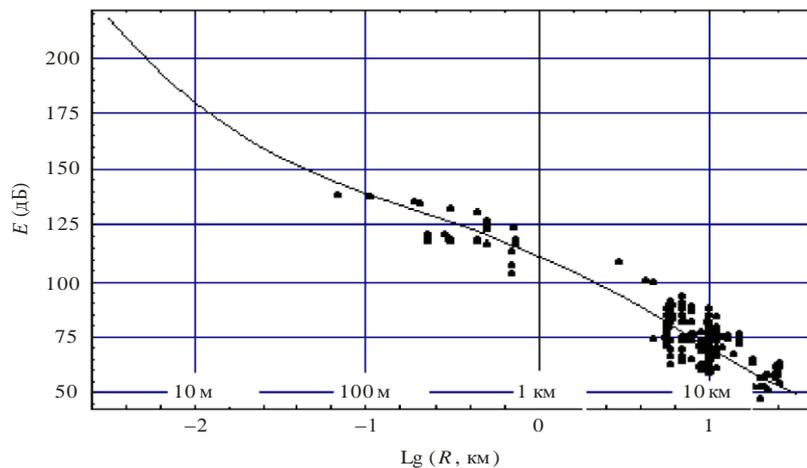


Ground Wave Prop. 10

Из рисунка видно, что данные измерений нормальным образом согласуются с расчетной кривой. Необходимо отметить, что экспериментальные данные тесно сгруппированы и не выходят за пределы даже в тех случаях, когда измерения проводились внутри зданий. Исключения составляют результаты измерений, проведенных в лифтах, где дополнительное затухание, создаваемое металлическими стенками, достигало 40 дБ.

Эти данные, а также результаты измерений, полученные ранее в городских условиях на расстоянии от 0,5 до 30 км с мощностью излучения, равной 5 кВт [41], приведены на рисунке 11.

РИСУНОК 11



Ground Wave Prop. 11

Эти исследования показали, что на расстояниях больше 500 м влияние потерь, характерных для городских условий, становится существенным, и распространение сигналов на НЧ в районах городской застройки аналогично распространению над земной поверхностью со слабой проводимостью ($\sigma = 1 \text{ мСм/м}$).

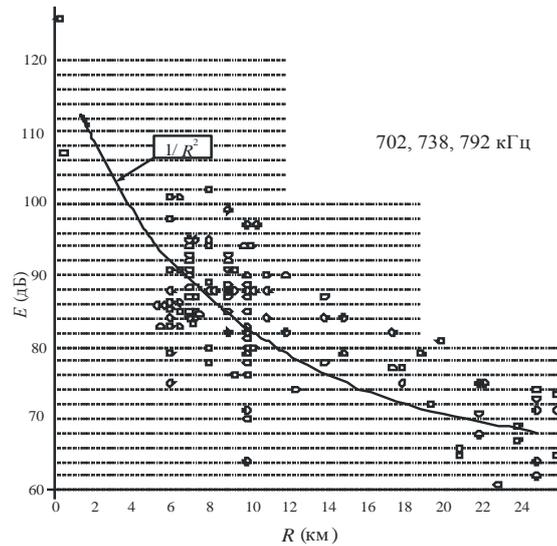
Были проведены также серии измерений, при которых передатчики располагались в городе, а длина трассы составляла 0,5–26 км, на частотах в диапазоне 702–1539 кГц. Ниже приведены два примера распределения уровней напряженности поля вдоль линий.

Что касается увеличения количества данных, на рисунке 12 сгруппированы результаты измерений напряженности поля трех передатчиков, работавших на частотах, прилегающих к нижней части полосы СЧ-радиовещания, а на рисунке 13 – результаты измерений четырех передатчиков, работавших на частотах, прилегающих к верхней части полосы. Номинальная мощность каждого передатчика составляла 5 кВт.

На этих рисунках показана кривая обратно квадратичной зависимости, которая довольно точно согласуется с результатами измерений.

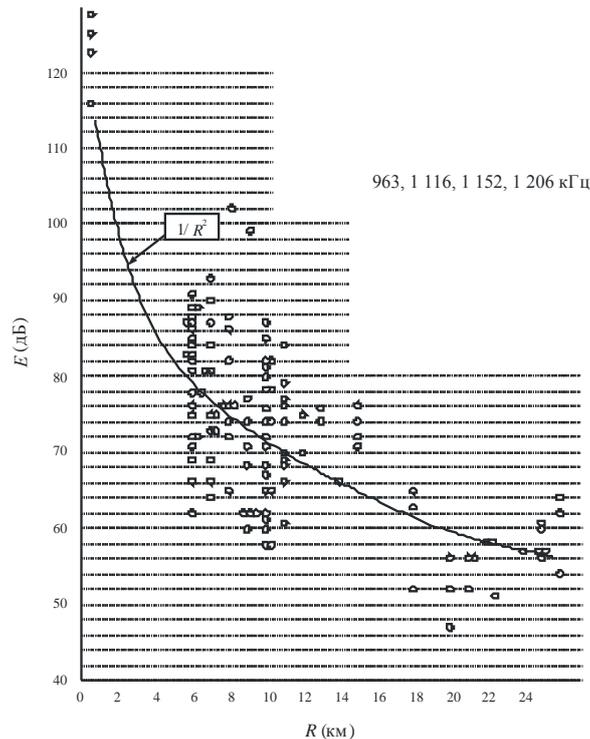
Помимо эксперимента с передатчиками, расположенными в пределах города, результаты которого приведены выше, было также проведено четырехдневное исследование в пригородных зонах с использованием передатчиков, расстояние до которых составляло от 10–12 км до нескольких десятков километров. Измерения напряженности поля проводились с движущегося измерительного автомобиля в городе Москве и прилегающей территории. Однако выбор точек для анализа был ограничен трассами, проходящими через центр города (рисунок 14).

РИСУНОК 12



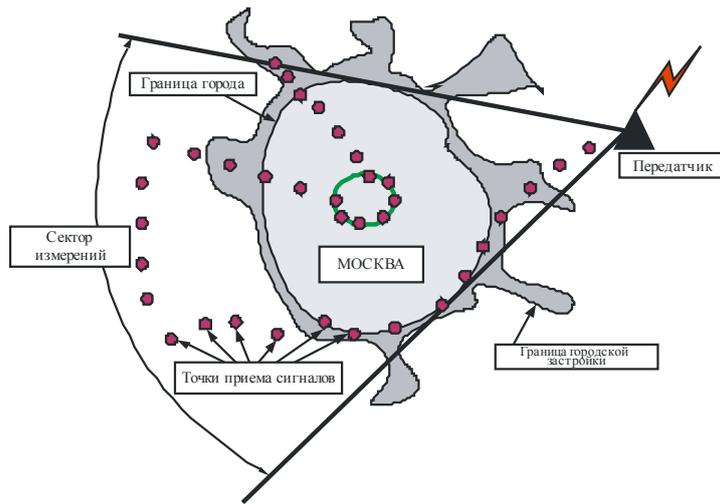
Ground Wave Prop. 12

РИСУНОК 13



Ground Wave Prop. 13

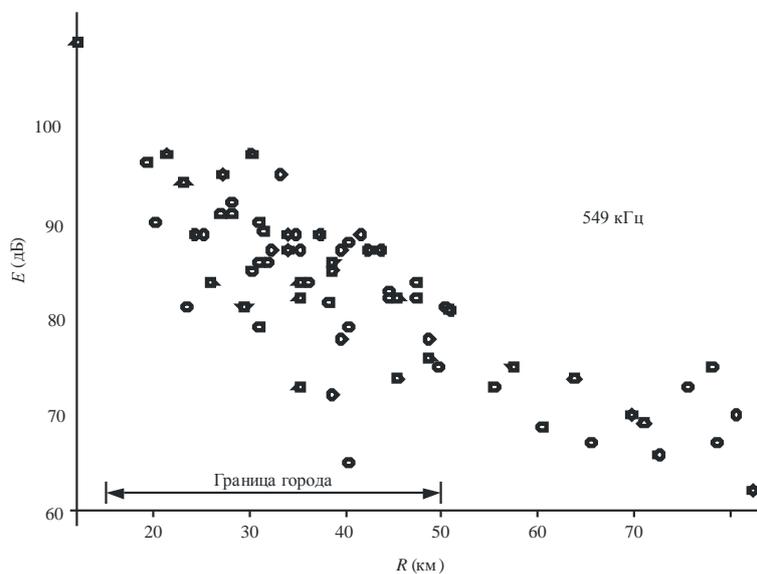
РИСУНОК 14



Ground Wave Prop. 14

На рисунках 15 и 16 приведены примеры результатов измерений для одного из пригородных передатчиков на двух различных частотах.

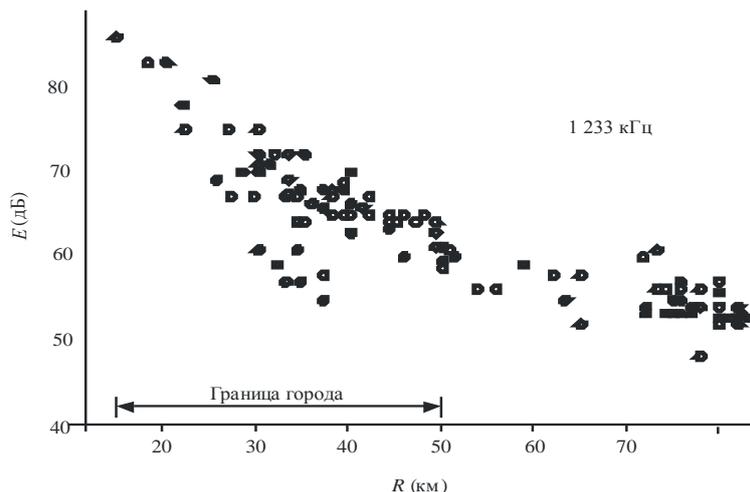
РИСУНОК 15



Ground Wave Prop. 15

Помимо результатов, полученных на средних частотах, следует отметить похожую работу [42], посвященную аналогичным исследованиям в полосе высоких частот. Эти исследования показали, что на расстояниях до 100–700 м от передатчика напряженность поля практически пропорциональна $1/R$, тогда как на расстояниях 0,7–10 км зависимость приближается к $1/R^2$. Дополнительные данные измерений, проведенных в Московском регионе, представлены в [39].

РИСУНОК 16



Ground Wave Prop. 16

10.2 Расстояния свыше 25 км

Вслед за появлением в 20-х годах XX века СЧ-радиовещания были проведены исследования изменений принимаемого сигнала. Были приняты во внимание такие факторы, как влияние проводимости почвы, высоты и неровностей рельефа, экранирование зданиями и т. д., влияние ионосферных пространственных волн (в то время еще неизвестных) в ночное время и, особенно, повышенная скорость затухания с расстоянием в городских районах [43], [44], [45], [46]. Как только были установлены основные принципы распространения земной волны в СЧ-диапазоне, оказалось, что общие прогнозы зон покрытия, основанные на распространении волн над гладкой Землей для соответствующих значений проводимости, в большинстве случаев вполне пригодны для передач с высокой мощностью в смешанных зонах, охватывающих сельские и городские районы. Однако по мере возобновления интереса к местному радиовещанию, нацеленному прежде всего на малые и крупные города и их пригороды, выяснилось, что подобные методы не могут использоваться в городских районах. Этот вопрос приобретает еще большую важность для цифрового радиовещания, где существует более критическая граница между удовлетворительным приемом и прерыванием связи при низких отношениях сигнал/шум.

Влияние зданий и прочих сооружений, содержащих проводящие вертикальные элементы, а также деревьев, было определено Боуном и др. [44], которые объяснили этот эффект с точки зрения колебательных контуров в вертикальных сооружениях. Позже Косбрук [47] провел исследования на территории Лондона и дал объяснение эффектам, наблюдаемым в зонах плотной застройки. Измерения проводились на трех частотах, с двумя азимутами, проходящими через Лондон; см. рисунок 17.

РИСУНОК 17

Трассы измерения на территории Лондона

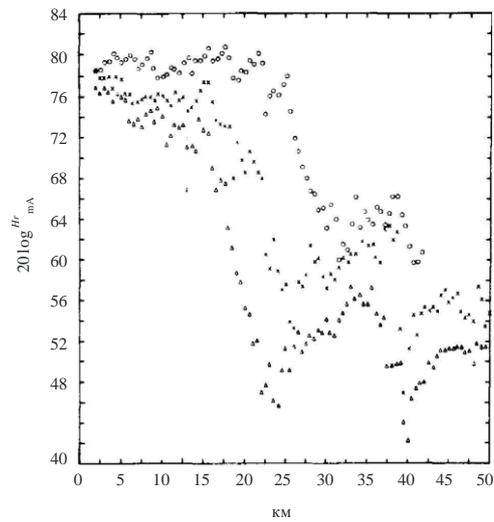


Ground Wave Prop. 17

На рисунке 18 представлены результаты измерений, проведенных Косбруком на территории Лондона с азимутом 169° . На всех трех частотах напряженность поля вблизи передатчика не уменьшается ожидаемым образом, но затем происходит резкое снижение до минимума, за которым следует восстановление. Косбрук принял в расчет изменение полного поверхностного сопротивления, обусловленное структурой типа платы с "токопроводящими штырьками". Им была исследована комплексная плоскость функции ρ (см. уравнение (18)) и составлен график затухания A (см. уравнение (17)) и фазы, как показано на рисунке 19.

РИСУНОК 18

Измерения на трех частотах на территории Лондона



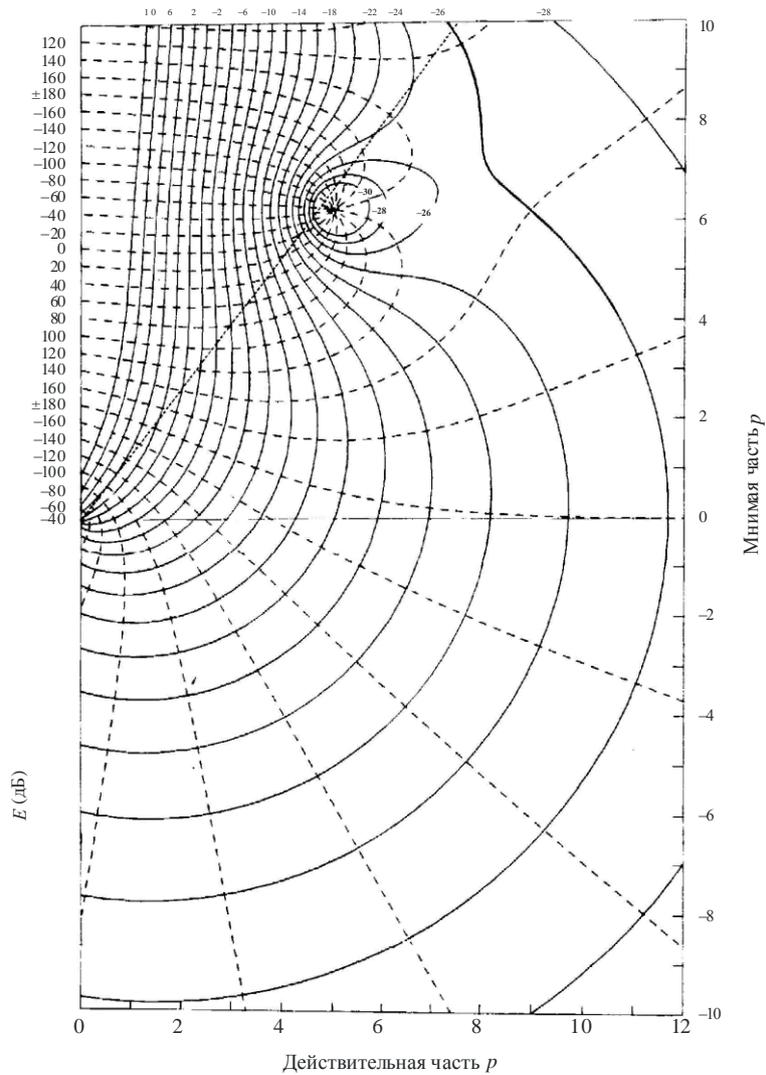
Ground Wave Prop. 18

Он показал, что для гладкой Земли и для большинства сельских районов распространение волн представлено в нижней половине рисунка 11, где контуры имеют обычную форму. Однако результаты измерений в условиях плотной городской застройки отображены в верхней половине рисунка, где наблюдается нетипичное изменение затухания, включая нулевую отметку.

Был предложен метод расчета, в котором трасса делится на сегменты с различной проводимостью и свойствами поверхности, включая параметры для высоты искусственных сооружений и для части зоны застройки. Этот метод на данный момент окончательно не проработан и широко не испытывался в качестве инструмента прогнозирования.

Еще один метод решения данной проблемы был представлен Луо [48]. Этот метод определяет ряд компонентов потерь для длины трассы, отражения, дифракции и рефракции вокруг зданий и т. д.

РИСУНОК 19
Комплексная плоскость p



11 Сезонные изменения в распространении поверхностных волн

В некоторых случаях могут возникать сезонные изменения в распространении поверхностных волн. Они могут быть связаны с изменением индекса рефракции тропосферы (см. п. 3.3) или состоянием растительного покрова, с изменением уровня грунтовых вод, с замерзанием воды или с толщиной снежного покрова и т. д., когда эти параметры могут вызывать изменения эффективной проводимости почвы. Все указанные изменения могут повлиять на интенсивность поля поверхностной волны. В частности, такие сезонные изменения могут привести к уменьшению напряженности поля в летний период.

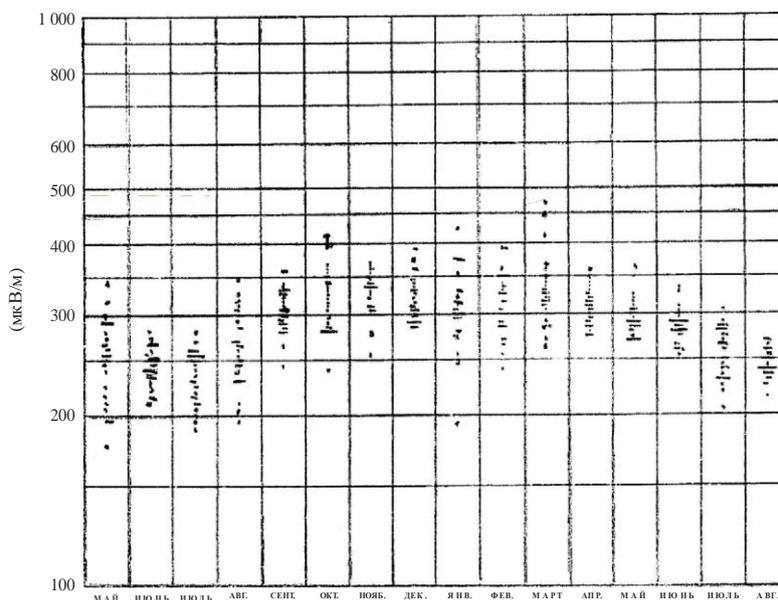
11.1 История исследований

Впервые измерения уровня сигнала СЧ-станции, расположенной вблизи Филадельфии, США [49], в дневное время были проведены в 20-х годах XX века на расстояниях до нескольких сотен километров. Измерения показали, что получасовые медианные значения не остаются постоянными изо дня в день, а изменяются с амплитудой до нескольких децибел. Средний уровень сигнала также изменялся от месяца к месяцу, при этом наибольшее сезонное изменение его уровня наблюдалось в зимние месяцы.

Среднемесячные значения сезонных изменений уровня сигнала достигали 4–5 дБ. Были предприняты попытки определить причины таких изменений сигнала. Была установлена корреляционная связь изменения уровня сигнала с наружной температурой, влажностью, давлением и другими параметрами атмосферы. Наибольшая негативная корреляция, как выяснилось, существует между изменениями уровня сигнала и температурой. Физические причины этого явления выяснить не удалось. Пример изменения уровня сигнала в течение года приведен на рисунке 20.

РИСУНОК 20

Пример сезонных изменений, зарегистрированных в США



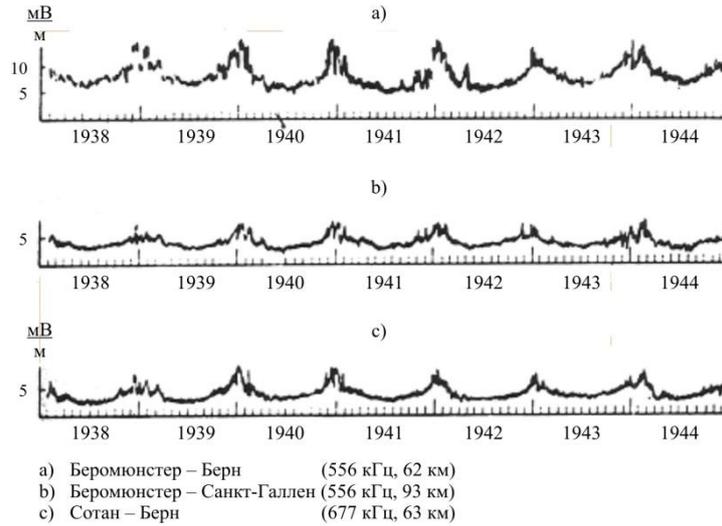
Ежедневно 13: 30 P.M., EST, значения интенсивности поля Филадельфия, Пенсильвания(WCAU) — Балтимор, Мэриленд, изм. расстояние 1 170 км, 76 миль, май 1939 года — август 1940 года

Ground Wave Prop. 20

Аналогичные измерения на средних частотах на расстоянии до 100 км были проведены в Швейцарии в период 1938–1944 годов. Результаты измерений были опубликованы в 1945 году [50]. Среднеевропейский климат обладает более широким диапазоном температур и большей амплитудой сезонных изменений, достигающей 8 дБ. Результаты, полученные в Швейцарии в дневное время, показаны на рисунке 21.

РИСУНОК 21

Пример сезонных изменений, зарегистрированных в Швейцарии



Ground Wave Prop. 21

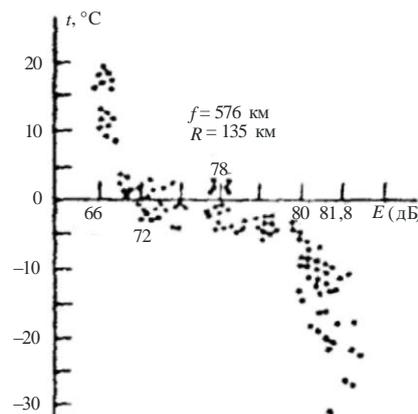
В конце XX века в окрестностях Москвы и в Сибирском регионе были проведены измерения на нескольких частотах в диапазонах НЧ и СЧ в разное время суток на трассах различной протяженности (от 11 до 2500 км).

Результаты первых измерений, проведенных в Московском регионе, представлены в [51]. В рамках более сложных и длительных программ измерений значения сезонных колебаний на средних частотах для различных трасс в окрестностях Москвы составили в среднем 10–15 дБ.

В районе Сибири, где наблюдается наибольшая разница температур между зимним и летним периодами, изменения составляют примерно 15 дБ и более [52]. Пример изменений интенсивности поля вблизи Томска приведен на рисунке 22. На трассах, находящихся в средних широтах, где значительная часть территории покрыта лесами, отмечаются наибольшие сезонные изменения уровня сигнала, составляющие 5–15 дБ и более [53], [54]. В таблице 3 показаны средние значения изменения Н (дБ) между зимними и летними месяцами [61].

РИСУНОК 22

Сезонные изменения напряженности поля на частоте 576 кГц в зависимости от температуры для трассы длиной 155 км вблизи Томска



Ground Wave Prop. 22

ТАБЛИЦА 3

Сезонные изменения уровня сигнала

Средняя температура января (°C)	4	0	-10	-16
Типовое изменение, Н (дБ)	4	8	13	15

Приведенные выше результаты отражены в Рекомендациях МСЭ-R P.368-9 и P.1321-3.

11.2 Ежедневные изменения в распространении поверхностных волн

На всех трассах распространения на СЧ в Московском регионе [39] и на большинстве трасс на НЧ также наблюдались ежедневные изменения. Примеры приведены на рисунке 23. Рабочие частоты и длина трасс указаны в условных обозначениях к этому рисунку. На НЧ среднее квадратическое отклонение уровня сигнала варьируется в диапазоне от долей децибела на коротких трассах на нижней границе полосы частот, в среднем 0,8 дБ, до примерно 10 дБ в верхней части полосы частот для трасс протяженностью до 1000 км и выше. На СЧ изменение уровней сигнала для трасс, длина которых составляет десятки километров, намного выше, чем на НЧ, обычно 2–4 дБ, в ряде случаев достигая 5–6 дБ, см. рисунок 24.

Замирание на трассах распространения земных волн сильно зависит от частоты и протяженности трассы. В диапазоне СЧ даже на трассах длиной 20–100 км наблюдаются среднее квадратические отклонения (rms), имеющие ощутимую зависимость от времени года и частоты, как показано на рисунках 25 и 26.

РИСУНОК 23



РИСУНОК 25

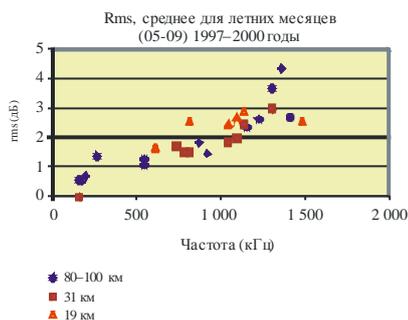


РИСУНОК 24

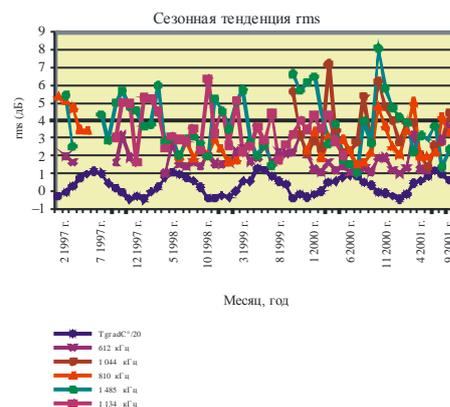
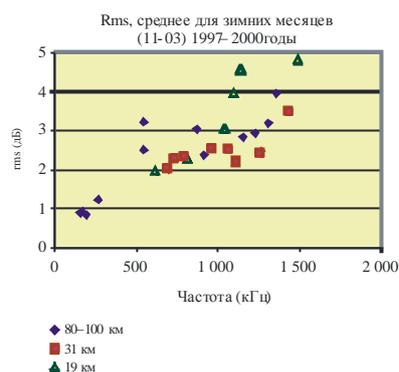


РИСУНОК 26



ЧАСТЬ 4

12 Приемные антенны

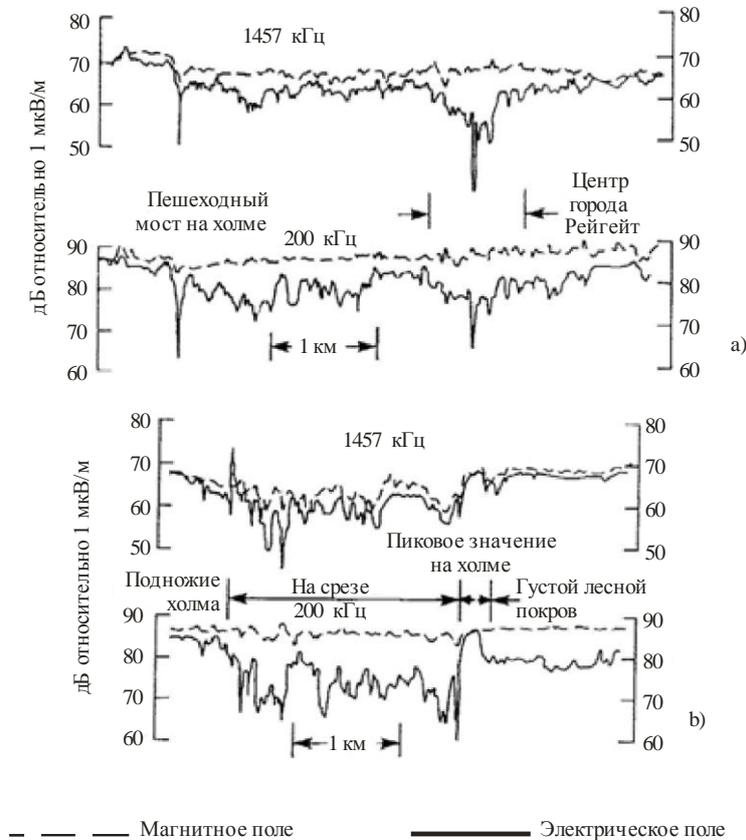
Как уже обсуждалось в п. 3.2.1.2, на открытой местности вертикальная напряженность электрического поля и горизонтальная напряженность магнитного поля связаны уравнением (12). Для измерений и приема сигналов различных служб могут применяться стержневые или проволочные антенны, реагирующие на электрическое поле (такие, как некоторые антенны автомобильных радиоприемников), либо рамочные ферритовые антенны, реагирующие на магнитное поле (например, антенны бытовых радиоприемников).

В условиях наличия препятствий пространственная изменчивость электрического поля часто оказывается существенно выше, чем у магнитных антенн. В большинстве портативных приемников, предназначенных для измерения напряженности поля, применяются рамочные антенны, откалиброванные для электрического поля при помощи уравнения (12).

На рисунке 27 показаны изменения как для электрических, так и для магнитных антенн на двух примерных трассах [55].

РИСУНОК 27

Результаты измерений на двух трассах с использованием магнитных и электрических антенн



13 Определение характеристик пространственной изменчивости напряженности поля

Выше было приведено описание общего поведения поверхностной волны, распространяющейся над территорией с различными значениями проводимости, а также над морем и крупными городскими районами. В связи с местными эффектами, топографическими изменениями или наличием отдельных сооружений или групп сооружений и т. д. напряженность поля принимаемого сигнала изменяется в пределах расстояний, составляющих несколько метров.

Изменчивость напряженности поля может быть выражена в виде комбинации двух составляющих. Каждая из них представляет компонент сигнала различного характера, изменения которого обусловлены разнообразными причинами [56]:

- Крупномасштабная пространственная изменчивость $m(x)$: вызывается крупномасштабными изменениями на трассе между передатчиком и приемником. В случае распространения земной волны такая изменчивость связана с изменением характеристик трассы "передатчик–приемник" или условий приема в городской среде, а также влиянием электрических характеристик местности и неровностей рельефа.
- Маломасштабная пространственная изменчивость $r_0(x)$: представляет локальные изменения уровня сигнала, наложенные на медианный уровень крупномасштабной изменчивости и обусловленные главным образом влиянием местных условий приема, например изменениями, вызванными различными элементами, такими как мосты, линии электропередачи и т. д.

Отношение между ними по линейной шкале равно:

$$r(x) = m(x) \cdot r_0(x). \quad (43)$$

Долговременный компонент $m(x)$, или крупномасштабная изменчивость сигнала, получают путем усреднения компонента $r(x)$ сигнала с целью устранения влияния локальных условий в месте размещения приемника. Компонент $m(x)$ сигнала соответствует ряду локальных средних значений компонента $r(x)$ сигнала для мобильного приема.

Кратковременный компонент $r_0(x)$, или быстрое колебание сигнала вокруг среднего значения $m(x)$, представляет локальные изменения $r(x)$ сигнала. Таким образом, для расчета кратковременного компонента необходимо предварительно вычислить долговременный компонент путем усреднения выборок сигнала, расположенных в пределах интервала вокруг каждой точки, а затем удаления этого компонента из огибающей сигнала.

Надлежащее разграничение компонентов $m(x)$ и $r_0(x)$ сигнала дает возможность проведения более точного анализа пространственной изменчивости сигнала и правильного определения источников, которые вызывают среднее ослабление напряженности поля в расширенной зоне, и локальных изменений напряженности поля, связанных с местными условиями приема.

Обобщенный метод Ли (см. Приложение 1) является эталонным методом расчета локальных средних значений долговременного сигнала на трассе. На рисунке 28 приведен пример мгновенного и долговременного пространственного изменения сигнала, зарегистрированного при движении в городских условиях. Кратковременное изменение – это быстрое изменение относительно локальных средних значений.

РИСУНОК 28

**Долговременное пространственное изменение напряженности поля
в городских условиях приема**



Ground Wave Prop. 28

14 Неровности рельефа

Хотя электрические свойства почвы являются главным фактором, определяющим затухание поверхностной волны, неровности рельефа ведут к возникновению дополнительных потерь на трассе в диапазоне СЧ [8], [57], [58]. Эти потери напряженности поля являются значительными лишь при наличии препятствий на трассе "передатчик-приемник", создаваемых неровностями, имеющими большую высоту (в сравнении с длиной волны), вблизи места расположения приемника. Ощутимое влияние на общие потери на трассе оказывают все значительные неровности рельефа по всей длине трассы, хотя воздействие неровностей вблизи приемника может быть преобладающим, особенно в случае если наклон дальней стороны неровности является достаточно крутым [11]. На приемных станциях, расположенных позади таких препятствий, уровень напряженности поля снижается. Изменение уровня сигнала зависит от протяженности препятствия, создаваемого неровностями рельефа вдоль профиля трассы, и может быть рассчитано как дополнительный коэффициент затухания, который следует добавить к среднему значению потерь на трассе передачи сигнала.

РИСУНОК 29

Изменение напряженности поля как функция расстояния до передатчика, зарегистрированное в процессе измерений. Показаны значения высоты рельефа, зарегистрированные GPS-приемником



Ground Wave Prop. 29

На рисунке 29 приведен пример изменения напряженности поля при перемещении приемника по маршруту и при наличии создаваемых неровностями рельефа препятствий на трассе "передатчик-приемник". Этот маршрут проходит практически радиально от передатчика и пересекает горный хребет Сомосьерра (Испания). На рисунке показаны значения, полученные на маршруте измерений за 12 км до вершины Сомосьерры и через 28 км от нее, а также соответствующие профили высоты горного хребта. Через горный хребет вблизи вершины проходит туннель, вызывающий глубокое замирание напряженности поля сигнала. Значительное ослабление напряженности поля можно наблюдать на "теневого" стороне горы (более 10 дБ с учетом медианных значений).

На теневой стороне препятствия по мере удаления приемника от передатчика значения напряженности поля имеют тенденцию к возрастанию. Такой характер изменения напряженности поля вблизи неровностей рельефа в зависимости от расстояния до передатчика описывается Оттом [44], а ранее был предсказан Уэйтом [59] как усиливающаяся интерференция прямого дифрагированного луча и дифрагированного луча, проходящего вдоль поверхности.

После проведения анализа примера было измерено следующее падение напряженности поля на расстоянии 109,5 км под влиянием второго препятствия, высота которого не слишком велика ($\lambda/4$, где $\lambda = 221$ м), но которое находилось весьма близко от места размещения приемника. Небольшое расстояние от препятствия до места расположения приемника оказалось определяющим параметром. Наклон дальней стороны неровности (в направлении приемника) является одним из основных факторов потерь на трассе, возникновение которых наиболее вероятно на небольшом расстоянии от неровности до приемника.

Ослабление напряженности поля, вызываемое значительным препятствием, зависит в основном от двух параметров [67]:

- расстояния d между препятствием и местом расположения приемника;
- высоты препятствия h над линией прямой видимости между передатчиком и приемником.

Для определенного местоположения приемника при наличии препятствий напряженность поля снижается с увеличением высоты препятствия из-за неровностей рельефа и уменьшением расстояния между препятствием и местом расположения приемника. В этой связи наблюдались высокие значения ослабления при высоте препятствий более $\lambda/2$. Если препятствие находится недалеко от приемника, препятствия, имеющие высоту менее $\lambda/2$, также способны вызвать значительное снижение напряженности поля.

Дополнительные потери напряженности поля в диапазоне СЧ, связанные с неровностями рельефа, имеют положительную логарифмическую зависимость от высоты препятствия h и отрицательную логарифмическую зависимость от расстояния d согласно приведенному ниже уравнению.

$$L_{irr}(\text{дБ}) = (-17,2 \cdot \log_{10}(d) + 25,1) \cdot (\log_{10}(2,84 \cdot h)), \quad (44)$$

где:

L_{irr} : потери, связанные с неровностями рельефа (дБ);

d : расстояние между препятствием и приемником (км);

h : высота препятствия над линией прямой видимости между передатчиком и приемником (в длинах волны).

Потери, связанные с неровностями рельефа (L_{irr}), необходимо вычесть из значения напряженности поля, полученного с использованием методов, описанных в предыдущих разделах. Значения меньше 1 не следует учитывать в аргументе логарифмов. Для значений d более 25 км и значений высоты препятствий h менее 2λ величиной L_{irr} можно пренебречь.

Если профиль трассы содержит несколько типичных неровностей (сопоставимых с длиной волны), следует учитывать только максимальное значение ослабления, вызванное наиболее значительным препятствием. Этот подход аналогичен подходу, используемому в методах расчета дифракционных потерь на нескольких клиновидных препятствиях, таких как методы Эпштейна-Петерсона, Дейгута, Буллингтона и Джованелли.

15 Локальные воздействия в зонах застройки

Когда поверхностная волна проникает в зону застройки, ее характеристики распространения изменяются из-за наличия массивных сооружений, которые частично являются электропроводящими или представляют помеху для нормального распространения. Такие сооружения, относительно небольшие по сравнению с длиной волны, вызывают снижение напряженности поля со значительной амплитудой на прилегающих территориях. При планировании необходимо иметь в виду, что возникновение локальных изменений влияет на качество обслуживания и, таким образом, может препятствовать получению приемлемой зоны покрытия с хорошим качеством принимаемого сигнала, особенно для услуг цифрового вещания, для которых характерен резкий переход от качественного сигнала к его полному отсутствию. Следовательно, определение характеристик таких локальных изменений является важным аспектом для специалистов по системному планированию, позволяющим учитывать увеличение мощности передачи, необходимое для устранения различных ухудшений качества приема.

Измерения, проведенные на открытых местах, территориях и широких улицах крупных городов, показали, что при значительном снижении среднего уровня сигнала (по сравнению с сельским районом на одинаковом расстоянии от передатчика), приблизительно на 5 дБ, увеличивается стандартное отклонение напряженности поля. Стандартные отклонения в разных районах города неодинаковы – разброс составляет от 1,7 до 5 дБ, в среднем $\sigma = 3,5$ дБ.

15.1 Измерение сигналов, поступающих в зоны плотной застройки

Измерения сигналов, поступающих от расположенных в сельской местности передатчиков в зоны плотной городской застройки, которые были проведены во внутренних дворах высотных зданий, выявили резкое снижение уровня сигнала на 15–20 дБ; однако подобных случаев измерений слишком мало для того, чтобы сделать статистически значимые выводы. Можно лишь предположить, что стандартное отклонение составляет не менее 6–8 дБ.

На рисунках 30–33 показана изменчивость напряженности поля в зонах застройки для четырех частот. Измерения проводились на маршруте, проходившем через Москву и ее пригороды. Во всех случаях уровень сигнала в городских районах изменяется хаотично. На нижних частотах стандартное отклонение разброса уровня сигнала составляет 3–4 дБ. В верхней части СЧ-диапазона (см. рисунки 32 и 33, где разброс результатов измерений в зонах застройки обозначен пунктирной линией) стандартное отклонение составляет 7–10 дБ.

На рисунке 34 показаны аналогичные результаты, полученные в Сан-Паулу [60].

Процентная доля расстояния, где наблюдается указанное локальное снижение уровня сигнала при мобильном приеме, сильно зависит от условий приема, главным образом в городских районах. В городских условиях приема эта доля варьируется от 10% (Мадрид, Испания) до 18% (Дели, Индия). Процентная доля для мобильного приема в сельской местности может составлять 3% или менее.

Определение характеристик распространения радиоволн в городских районах требует идентификации и количественной оценки причин долговременных и кратковременных пространственных изменений напряженности поля. Для этой цели необходимо исключить из анализа влияние расстояния до передатчика и свойства профиля ландшафта.

На основе данных, собранных в ходе четырех измерительных кампаний, был проведен широкий анализ, направленный на оценку системы DRM (Всемирное цифровое радио) с мобильным приемом [61]. Измерениями в рамках этих кампаний был охвачен весь диапазон средних частот (666, 810, 1060 и 1260 кГц). Измерения проводились в различных городских условиях приема: Мехико (Мексика), Нью-Дели (Индия) и Мадрид (Испания). Эти города имеют свои отличные друг от друга особенности и являются типичными представителями различных заслуживающих упоминания видов городской среды. Для выполнения полного репрезентативного анализа влияния городских условий были проведены измерения на 96 произвольно выбранных маршрутах общей протяженностью более 500 км с последующим анализом результатов.

РИСУНОК 30

Изменчивость напряженности поля в зонах застройки на частоте 171 кГц

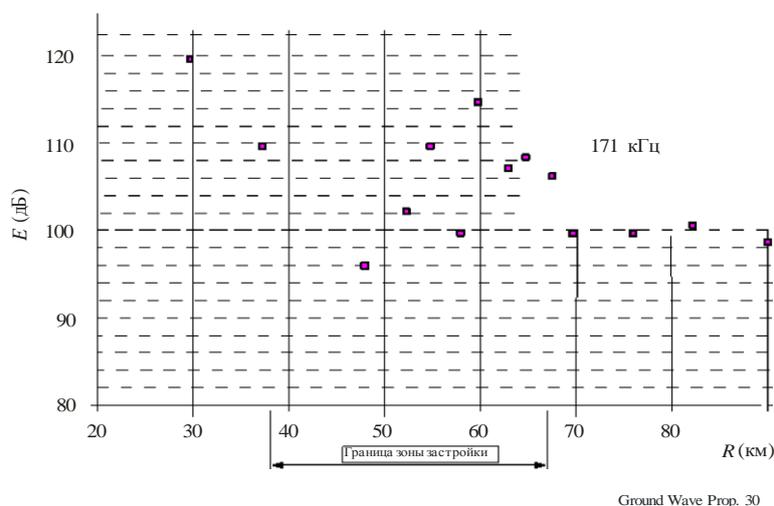


РИСУНОК 31

Изменчивость напряженности поля в зонах застройки на частоте 549 кГц

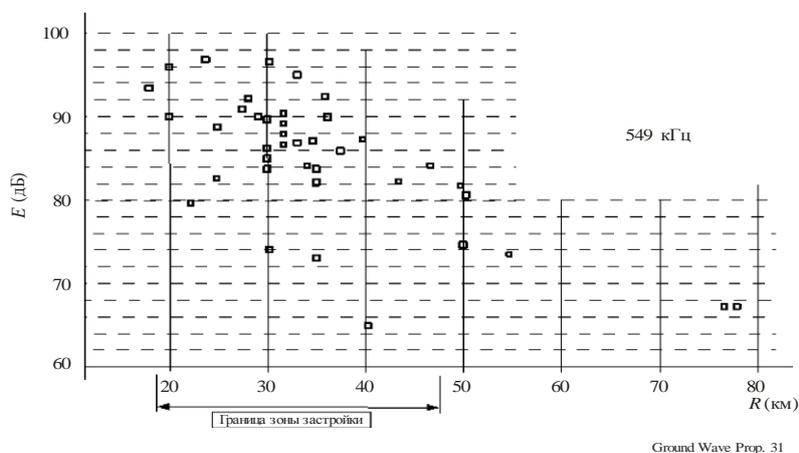
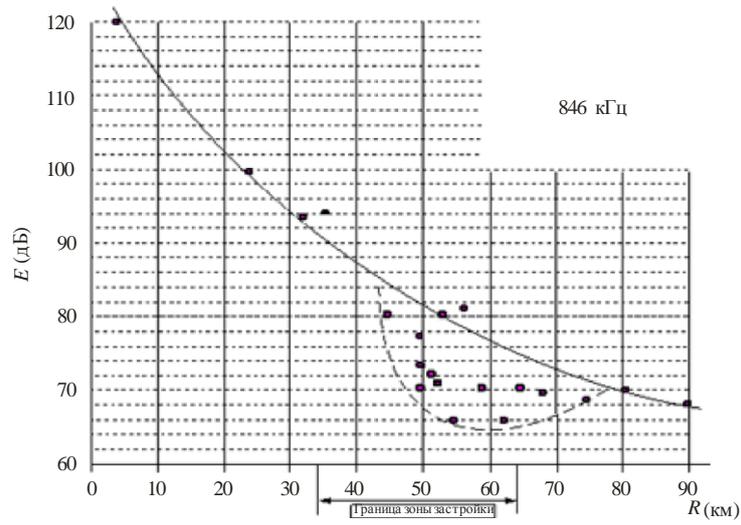


РИСУНОК 32

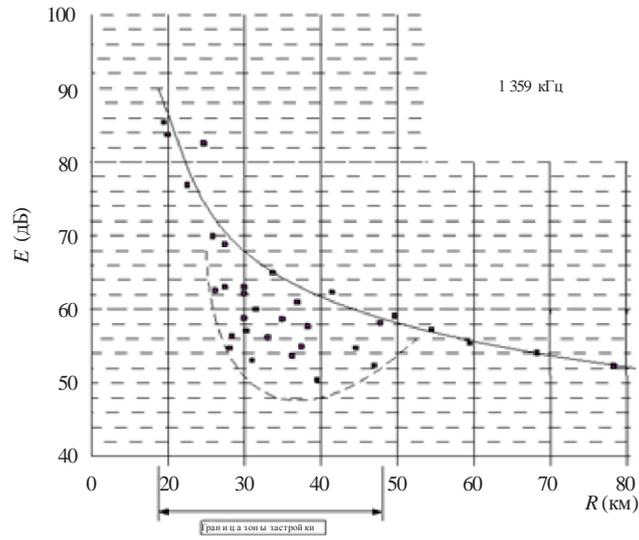
Изменчивость напряженности поля в зонах застройки на частоте 846 кГц



Ground Wave Prop. 32

РИСУНОК 33

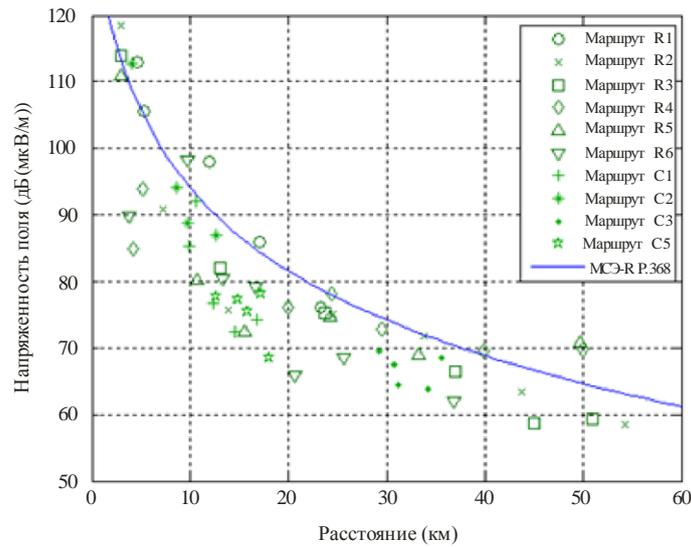
Изменчивость напряженности поля в зонах застройки на частоте 1359 кГц



Ground Wave Prop. 33

РИСУНОК 34

Результаты измерений на частоте 1210 кГц для 11 маршрутов в Сан-Паулу в сравнении с прогнозируемыми значениями из Рекомендации МСЭ-R P.368



Ground Wave Prop. 34

Измерения также были проведены на ВЧ [42], рисунки 35–38. В верхней части каждого из этих рисунков показано изменение напряженности поля в зависимости от расстояния, а в нижней – стандартное отклонение результатов измерений. К сожалению, в большинстве случаев характеристики направленности антенны не были точно известны, и корректировка усиления производилась по секторам.

На коротких расстояниях в пределах от 100 до 700 м зависимость от расстояния близка к обратно линейной, однако на расстояниях от 700 м до 10 км она приближается к обратно квадратичной зависимости; по мере приближения к границам города (10–24 км от передатчика) зависимость вновь становится линейной.

РИСУНОК 35

Изменение напряженности поля в зависимости от расстояния по мере приближения к городу, 14 МГц

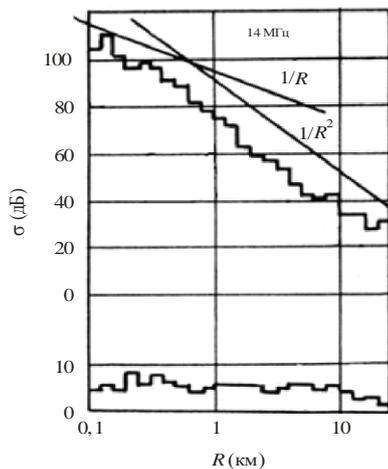
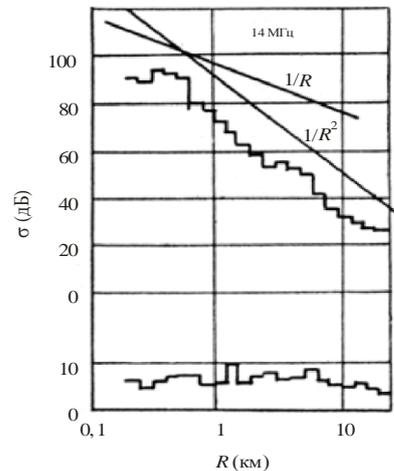


РИСУНОК 36

Изменение напряженности поля в зависимости от расстояния по мере приближения к городу, 14 МГц



Ground Wave Prop. 35

РИСУНОК 37

Изменение напряженности поля в зависимости от расстояния по мере приближения к городу, 7 МГц

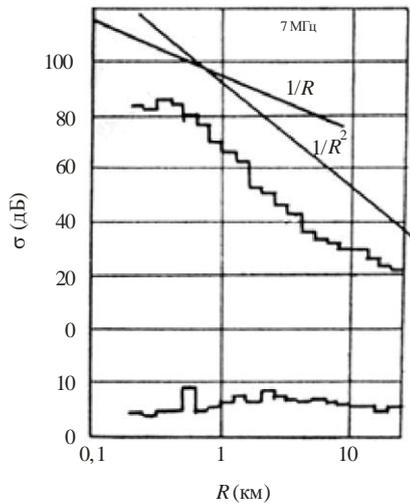
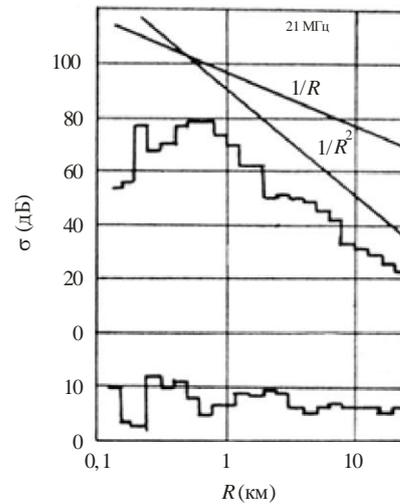


РИСУНОК 38

Изменение напряженности поля в зависимости от расстояния по мере приближения к городу, 21 МГц



Ground Wave Prop. 37

15.2 Влияние частоты передачи в городских условиях

Хотя важная роль частоты передачи сигнала в изменении напряженности поля для радиовещательных услуг в городских условиях была четко обозначена [62], эмпирическое изучение характеристик по данному вопросу не проводилось. На рисунках 28 и 30–33 показана разница средних значений напряженности поля в децибелах, зарегистрированных в одних и тех же условиях передачи и приема. Если взять в качестве примера две различные частоты передачи (810 кГц и 1260 кГц), то во всех случаях значения напряженности поля на частоте 810 кГц оказываются выше значений, зарегистрированных на частоте 1260 кГц в каждой точке приема.

Подсчитано, что разница составляет от 6 до 28 дБ, в большинстве случаев – 6–16 дБ, в зависимости от конкретных особенностей городской среды в зонах проведения измерений. В тех случаях, когда разница превышает 20 дБ, значения соответствуют местам с наиболее высокими зданиями.

15.3 Крупномасштабное изменение напряженности поля

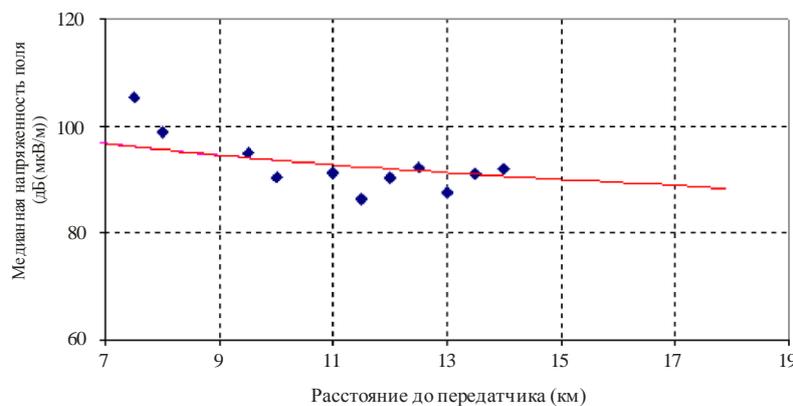
Причиной изменений пространственного долговременного компонента являются факторы городской среды, имеющие масштабы того же порядка, что и оптимальное значение окна усреднения $2L$, определенное с помощью обобщенного метода Ли. Согласно результатам, описанным в предыдущем разделе, длина окна усреднения для городских условий приема соответствует длине волны, которая в полосе СЧ-радиовещания варьируется в диапазоне от 221 м (1359 кГц) до 370 м (810 кГц).

Основной причиной крупномасштабного изменения, как было установлено, служит изменение ширины улиц в процессе приема сигнала [63], [64]. Для количественного определения потерь напряженности поля вследствие приема в городских условиях был разработан трехступенчатый процесс. Во-первых, результаты полевых испытаний были классифицированы в соответствии с шириной улиц и вычислены средние локальные значения. Во-вторых, средние значения для наиболее широких улиц были сопоставлены с кривыми распространения, приведенными в Рекомендации МСЭ-R P.368. И наконец, были рассчитаны дополнительные потери, связанные с приемом сигналов на узких улицах.

В качестве эталона для количественного определения случаев долговременных изменений были выбраны широкие улицы, имеющие более восьми полос движения. На рисунке 39 приведены локальные медианные значения, рассчитанные на основе результатов измерений, полученных в ходе полевых испытаний в Мадриде на частоте 1260 кГц. Как можно заметить, значения напряженности поля, полученные в данном сценарии, близки к расчетным значениям согласно кривым распространения из Рекомендации МСЭ-R P.368.

РИСУНОК 39

Локальные средние значения напряженности поля на широких улицах в сравнении с кривыми распространения из Рекомендации МСЭ-R P.368



Ground Wave Prop. 39

Были рассчитаны дополнительные потери в долговременном компоненте вследствие приема на узких улицах. В таблице 4 показаны средние различия между эталонными сценариями приема сигналов (широкие улицы, имеющие более восьми полос движения) и более узкими улицами.

Значения дополнительных потерь зависят от степени неоднородности городской среды, с одной стороны, и от частоты передаваемого сигнала — с другой. Как видно из рисунка, в Мадриде, обладающем наиболее неоднородной средой, наблюдались наивысшие значения потерь, а на частоте 1260 кГц влияние было почти вдвое выше, чем на частоте 810 кГц.

ТАБЛИЦА 4

Пространственное изменение для различных сценариев приема относительно кривых из Рекомендации МСЭ-R P.368

Город – частота (кГц)	Улицы средней величины MED ± STD DEV (дБ)	Узкие улицы MED ± STD DEV (дБ)
Дели – 666	4 ± 1	Н/Д
Мадрид – 810	6 ± 4	12 ± 6
Мехико – 1 060	3 ± 3	9 ± 5
Мадрид – 1 260	11 ± 6	19 ± 8
Мадрид – 1 359	Н/Д	Н/Д

16 Мелкомасштабное пространственное изменение напряженности поля

Наличие линий электропередачи, крупных строений или металлических конструкций может привести к увеличению напряженности поля по сравнению со значениями этого параметра на открытой местности на 10 дБ или, в редких случаях, к ее снижению на 15–20 дБ; такую неоднозначность можно объяснить различными вариантами взаимного расположения передатчика, металлических конструкций и места проведения измерений в полевых условиях.

В таблице 5 приведены эмпирические медианные значения глубины периодического замирания, связанного с массивными сооружениями, расположенными вблизи приемника. Измерения проводились с использованием вертикальной электрической антенны. Расстояние, на котором наблюдаются изменения напряженности поля, представляет собой пространственное замирание, то есть расстояние, на котором мобильный прием испытывает воздействие, воспринимаемое в движущемся автомобиле как временное замирание.

ТАБЛИЦА 5

Глубина и длина замирания при изменениях напряженности поля

Сооружение	Ширина (м)	Глубина замирания (дБ)
Шоссе или путепровод	18–24	23,1
	14–16	12,6
	10–12	9,8
	6–9	8,3
	Все	9,1 (среднее значение)
Пешеходный переход	2–3	6,5
Ферма над дорогой для подвешивания дорожных знаков	–	5,1

17 Распространение радиоволн внутри помещений

Ослабление радиосигналов при их проникновении в здания и распространении внутри зданий оказывает значительное влияние на характеристики систем радиосвязи. Нередко для расчета дополнительного ослабления уровней поступающего извне сигнала используется моделирование потерь, связанных с прохождением радиоволн внутри здания. Кроме того, для проведения количественной оценки колебаний сигнала вокруг его медианного уровня необходимо определить характеристики пространственной изменчивости сигнала внутри помещений.

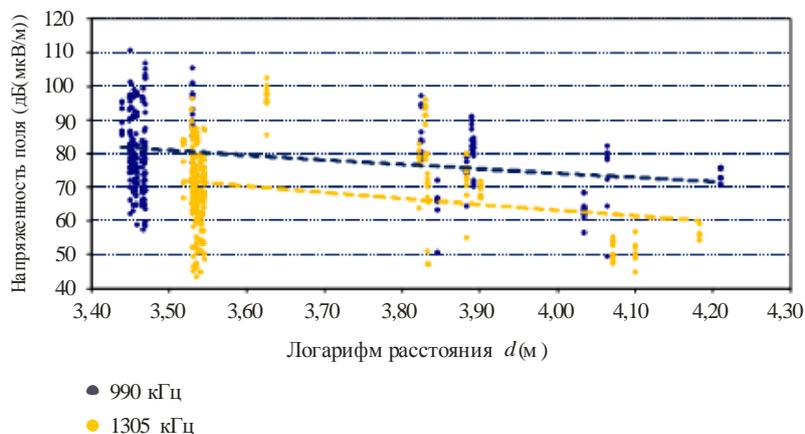
В крупных городах Северной Испании на основе обширной базы данных точек внутренних измерений были определены характеристики приема радиосигнала в дневное время внутри помещений в диапазоне СЧ на шести различных частотах (612, 639, 990, 1197, 1305 и 1602 кГц) [65]. Внутренние измерения были проведены в 21 здании, а общее количество точек измерения составило 360. Для количественного определения потерь при прохождении радиоволн внутри здания было выполнено 110 наружных измерений по периметру двух зданий на каждом этаже.

Испытания в полевых условиях проводились на основе измерений существующих коммерческих передач с амплитудной модуляцией (АМ). Тем не менее результаты должны быть напрямую применимы к цифровым системам, поскольку для распространения поверхностной волны на СЧ в дневное время без разброса времени и частоты использовались каналы аддитивного белого гауссовского шума (AWGN), так что частотные характеристики канала предположительно должны быть равномерными.

Как и в ходе многих других программ измерений, проводимых внутри помещений в полосах более высоких частот, даже в точках измерения, расположенных внутри помещений на расстоянии нескольких метров, наблюдался высокий уровень пространственной изменчивости. На рисунке 40 в качестве показательного примера приведены медианные уровни напряженности поля, полученные во многих точках, расположенных внутри различных зданий, как функция расстояния на частотах 990 и 1305 кГц.

РИСУНОК 40

Медианные уровни напряженности поля во внутренних помещениях на частотах 990 и 1305 кГц



Ground Wave Prop. 40

Из рисунка видно, что пространственная изменчивость весьма велика при разнице между точками с минимальной и максимальной напряженностью поля в пределах одного здания, достигающей 50 дБ. Фактически, как показали наблюдения, медианный уровень напряженности поля внутри помещений на СЧ следует логнормальному распределению с высоким стандартным отклонением $\sigma = 11,8$ дБ.

Наблюдения также показали, что уровень напряженности поля внутри помещений снижается в зависимости от расстояния до передатчика и частоты передачи. Однако изменчивостью во времени можно пренебречь, поскольку стандартные отклонения временного интервала составляют менее 1 дБ.

Для количественного определения потерь при прохождении радиоволн внутри здания на СЧ была рассчитана разница между медианным значением напряженности поля в точках измерения по наружному периметру здания и медианным значением напряженности поля во всех точках внутри здания, находящихся на той же высоте, для каждого этажа в двух зданиях в Северной Испании.

Измерения проводились также и в Москве, внутри зданий, у входных дверей и в лифтах. Эти измерения выявили дополнительное уменьшение уровня сигнала до 8 и 20 дБ, а в металлических кабинах лифтов – до 40 дБ [67].

В связи с высокой пространственной изменчивостью сигналов как вне, так и внутри помещений, были получены большие различия в значениях потерь при прохождении радиоволн внутри здания для разных этажей и частот, при этом не было выявлено четко выраженной тенденции. Для зданий в Мадриде, которые подвергались анализу, путем усреднения расчетных значений потерь при прохождении радиоволн через здания (для каждого этажа и на всех частотах) получены значения 5,9 и 7,5 дБ соответственно, поэтому для количественного определения потерь при прохождении радиоволн внутри здания на СЧ было предложено среднее значение, равное 6,7 дБ.

Уровни сигнала внутри помещений можно было прогнозировать путем вычитания потерь при прохождении радиоволн внутри здания из прогнозируемых значений напряженности поля вне помещений. Однако в настоящее время предлагается использовать альтернативную модель прогнозирования, позволяющую принять в качестве эталонных уровни напряженности поля, приведенные в Рекомендации МСЭ-R P.368, для распространения земной волны при отсутствии препятствий.

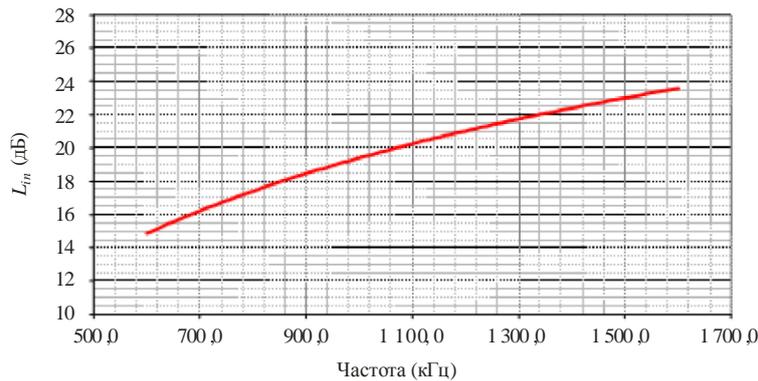
В каждой точке в дополнение к потерям, которые заданы кривыми распространения земной волны, приведенными в Рекомендации МСЭ-R P.368, были рассчитаны потери внутри помещений, а для прогнозирования внутренних потерь (L_{indoor}) как функции частоты в диапазоне СЧ была применена линейная регрессия [66]:

$$L_{indoor} \text{ (дБ)} = -42,1 + 20,5 \cdot \log (f \text{ (кГц)}). \quad (45)$$

Потери L_{indoor} относительно кривых распространения земной волны из Рекомендации МСЭ-R P.368 колеблются в пределах от примерно 15 дБ на частоте 600 кГц до 24 дБ на частоте 1600 кГц, вычисляются на основе приведенной выше формулы прогнозирования и в графическом виде изображены на рисунке 41.

РИСУНОК 41

Потери внутри помещений относительно кривых распространения земной волны, приведенных в Рекомендации МСЭ-R P.368



Ground Wave Prop. 41

В целях подтверждения его правильности уравнение для прогнозирования L_{in} было применено к некоторым результатам измерений сигнала DRM внутри помещений в семи зданиях Мадрида, и была получена относительно небольшая средняя погрешность прогноза, равная 1,2 дБ.

Следовательно, для получения прогнозируемого медианного значения напряженности поля внутри помещений, превышаемого в 50% мест измерения, рекомендуется вычесть соответствующее значение L_{in} из напряженности поля, указанной в Рекомендации МСЭ-R P.368, следующим образом:

$$E_{indoor} \text{ (дБмкВ/м)} = E_{МСЭ-R P.368} \text{ (дБмкВ/м)} + 42,1 - 20,5 \cdot \log (f \text{ (кГц)}) \quad (46)$$

Для расчета медианных уровней напряженности поля внутри помещений, превышаемых в других процентах мест, следует применять логнормальное распределение со стандартным отклонением $\sigma = 11,8$ дБ.

ЧАСТЬ 5

18 Методы измерения

18.1 Измеритель напряженности поля

Методы измерения напряженности поля рассматриваются в Рекомендации МСЭ-R SM.378. Более подробно данный вопрос обсуждается в Справочнике МСЭ по радиоконтролю. В вышеупомянутой Рекомендации указано, что результаты отдельного измерения содержат некоторую погрешность, при этом точность измерения составляет ± 2 дБ.

Поскольку измерения напряженности магнитного поля меньше подвержены искажениям в неидеальных условиях, предпочтительнее проводить измерения с использованием рамочной антенны (см. раздел 12). Серийные измерительные приборы в этой связи обычно проходят калибровку для преобразования напряженности магнитного поля в напряженность электрического поля.

Исключение составляют случаи, когда измерения проводятся для оценки характеристик приемных систем, использующих электрические антенны, таких как автомобильные радиоприемники, в условиях большого количества препятствий.

Следует позаботиться о выборе наилучшей точки для проведения измерения, при этом окружающая среда должна быть по возможности свободна от деревьев, вертикальных проводящих конструкций и зданий и воздушных проводных линий. При мелкомасштабной изменчивости напряженности поля можно провести несколько измерений этого параметра в близко расположенных точках и выбрать медианное значение.

При использовании портативного измерительного прибора, оснащенного рамочной антенной, наилучшего эффекта можно добиться, вращая рамку до нахождения нулевой точки, а затем поворачивая антенну на 90° для получения максимального показания. Следует стремиться к тому, чтобы отношение пикового значения к минимальному составляло не менее 20 дБ, а более низкие значения, вероятно, будут указывать на наличие определенной проблемы в данной точке измерения. В точках с хорошим уровнем приема сигнала иногда можно добиться отношения, равного 40 дБ.

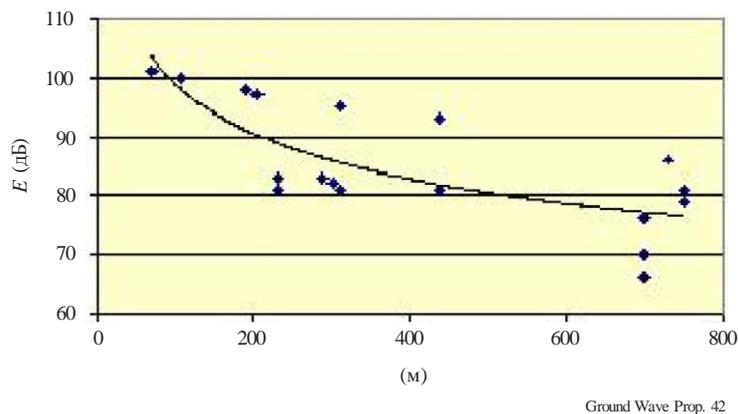
18.2 Измерение излучаемой мощности

Напряженность поля может измеряться на расстоянии, несколько превышающем расстояние, в пределах которого может иметь значение влияние ближнего поля, составляющем около 1 км от передающей антенны. В связи с тем что найти хорошие точки измерения в зонах застройки довольно трудно, необходимо провести несколько измерений и определить медианное значение. Если эти точки находятся на разных расстояниях от передатчика, результаты измерений должны быть скорректированы в соответствии с обратной зависимостью напряженности поля от расстояния. Затем медианное значение необходимо сравнить со значением 109,5 дБ (1 мкВ/м) на расстоянии 1 км (то есть 300 мВ/м на расстоянии 1 км), которое представляет собой значение, приведенное к 1 кВт э.м.и.м.

В зонах плотной застройки влияние затенения от близко расположенных зданий довольно велико. На рисунке 42 приведен пример таких измерений на частоте 1200 кГц, где передающая антенна расположена между двумя высокими зданиями. Стандартное отклонение результатов измерений составляет 6,6 дБ [67].

РИСУНОК 42

Пример измерений вблизи передатчика в зонах плотной застройки



18.3 Измерение эффективной проводимости почвы

18.3.1 Метод ослабления сигнала

Определив излучаемую мощность, можно провести измерения с увеличением расстояния от передатчика. Затем результаты измерений следует привести к 1 кВт э.м.и.м. и, сравнив тенденцию изменения результатов с кривыми, приведенными в Рекомендации МСЭ-R P.368 (или полученными из программы GRWAVE), найти эффективную проводимость. В случае наличия явных разрывов кривой можно применить метод Миллингтона.

Поскольку измерения подвержены локальным вариациям, а распространение волн зависит от геологии поверхностного слоя, применение метода с целью определения мелкомасштабных изменений эффективной проводимости может быть затруднительно.

Деминко (и др.) [68] описывает метод использования данных измерения распространения поверхностных волн Нортон между двумя монополярными антеннами для определения констант почвы в месте проведения измерений. В отчете представлены упрощенные уравнения для поверхностной волны Нортон. Антенны представляют собой монополи, установленные на наземной площадке, при этом полностью собранные антенны расположены непосредственно на земной поверхности, в результате чего излучается только поверхностная волна. С целью определения диэлектрической проницаемости и проводимости на тестовой площадке были проведены измерения по всей полосе частот от 30 до 915 МГц.

18.3.2 Метод коэффициента отражения

В следующем отчете Деминко [69] описывает метод использования измеренного коэффициента отражения и многоуровневого анализа для определения констант почвы с учетом многослойности Земли. В обоих отчетах содержатся данные измерений. В этих отчетах также приведены уравнения и графики для определения глубины проникновения электрического поля в почву и его влияния на распространение поверхностных волн.

Кроме того, в последнем отчете рассматривается чувствительность потерь при распространении волн к проводимости почвы и диэлектрической постоянной. В рамках процесса анализа было проведено исследование с использованием модели невозмущенного поля (ITS) [27], целью которого было определение чувствительности потерь при распространении волн к изменениям проводимости и относительной диэлектрической проницаемости. Высота антенн передатчика и приемника была установлена равной нулю. Анализ и измерения проводились для расстояний от 2 до 250 метров и диапазона частот 30–915 МГц. На таких коротких расстояниях в данном диапазоне частот даже на частоте 915 МГц возникает значительная поверхностная волна. Было установлено, что при низких значениях проводимости величина потерь сильно зависит от значения относительной диэлектрической проницаемости, а при более высоком значении проводимости наблюдается меньшая зависимость потерь от относительной диэлектрической проницаемости, особенно на частотах ниже 150 МГц. Кроме

того, выяснилось, что на частотах ниже 150 МГц потери зависят от проводимости. На частотах выше 150 МГц зависимостью потерь при распространении от проводимости можно пренебречь, однако зависимость от относительной диэлектрической проницаемости все еще достаточно высока.

18.3.3 Метод наклона волны

Метод измерения наклона волны, который трудно применять на практике, заключается в измерении, с использованием установленной особым образом штыревой антенны, угла наклона вперед, α , большой оси вектора электрического поля и отношения малой оси эллипса к большой, a . Данный метод описан Итоном [70], который указывает, что для применения этого метода требуются точные измерения и очень ровный однородный рельеф.

19 Фаза поверхностной волны [71]

19.1 Введение

Стабильность фазы поверхностной волны является важным фактором для некоторых радионавигационных систем.

Фазу земной волны, Φ , удобно определять как сумму первичной фазы и вторичной фазы, Φ_s . На расстоянии d от передатчика фаза земной волны может быть выражена как:

$$\Phi = nkd + \Phi_s,$$

где n – поверхностное значение индекса рефракции атмосферы, а $k = 2\pi/\lambda$, где λ – длина волны в свободном пространстве. В данном уравнении вторичная фаза Φ_s измеряется в радианах.

Однако в большинстве приложений она выражается как время задержки фазы в микросекундах в соответствии с отношением

$$t_s = \frac{\Phi_s \lambda}{2\pi \cdot 300} = \frac{\Phi_s \cdot 10^6}{2\pi f_{\text{Гц}}},$$

где:

t_s : время задержки вторичной фазы (мкс);

Φ_s : вторичная фаза (рад);

λ : длина волны (м);

$f_{\text{Гц}}$: частота (Гц).

19.2 Гладкая однородная Земля

Отправной точкой для расчета вторичной фазы является теория распространения земных волн над гладкой однородной Землей [72], использующая методы, идентичные применяемым для расчета амплитуды земной волны. Для того чтобы этот базовый метод мог применяться в более общих случаях, полезно сформулировать расчеты в терминах общего поверхностного полного сопротивления [73].

19.3 Возмущения вторичной фазы

На частотах ниже примерно 3 МГц теория гладкой однородной Земли может использоваться для расчета фазы земной волны над морскими трассами, в том числе при наличии больших волн, с уровнем точности, требуемым для навигационных систем. Однако на сухопутных трассах вторичная фаза изменяется под влиянием изменения электрических характеристик вдоль трассы распространения, неровностей рельефа и свойств подповерхностных слоев [74]. Разработаны различные методы прогнозирования возмущений вторичной фазы, обусловленных указанными факторами [75].

19.4 Неоднородные трассы

При изменении электрических характеристик или поверхностного полного сопротивления на трассе (например, на границе "суша-море") возникает соответствующее внезапное изменение как амплитуды,

так и фазы земной волны. В данном случае фаза может быть рассчитана методом Миллингтона-Прессея [76]. Данный метод абсолютно аналогичен методу Миллингтона для расчета амплитуды поверхностной волны, проходящей по неоднородным трассам. Фаза сигнала, распространяющегося посредством земной волны по трассе, состоящей из двух участков, может быть рассчитана при помощи метода Миллингтона, если в формулах заменить значения амплитуды соответствующими значениями фаз для однородной Земли.

Если электрические характеристики Земли в разных направлениях неодинаковы, фронт волны наклонен в сторону области с наименьшей проводимостью. Это может создавать проблемы для радиопеленгационных систем.

19.5 Неровности рельефа

При наличии значительных неровностей рельефа для расчета фазы земной волны более целесообразно использовать метод интегрального уравнения, позволяющий обеспечить точность, требуемую для прикладных задач навигации.

На рисунке 43 приведено сравнение результатов расчетных методов и экспериментальных измерений [59]. Трасса, показанная на рисунке, пересекает Долину Смерти (Калифорния) на высоте 100 м ниже уровня моря и горный хребет Сьерра-Невада. Точки измерения обозначены символом (I). Сплошная линия рассчитана при помощи метода интегральных уравнений. Пунктирная линия рассчитана методом Миллингтона-Прессея с использованием модели эффективного полного сопротивления двухслойной гладкой Земли.

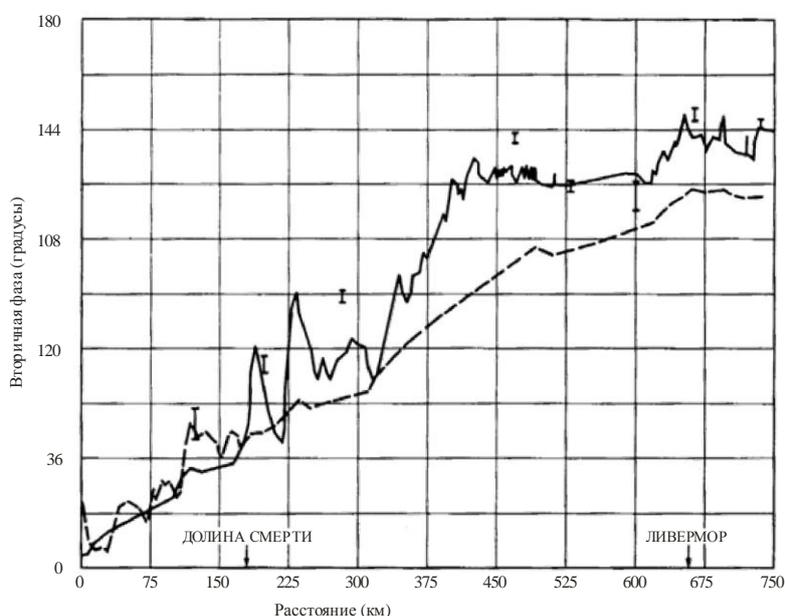
На частоте 100 кГц вторичная фаза 36° соответствует 1 мкс (см. п. 19.1, выше).

19.6 Влияние метеорологических условий

При проведении ряда исследований стабильности сигналов системы Logan-C были обнаружены изменения фазы, соответствующие изменениям времени прихода сигнала величиной $\pm 0,5$ мкс [77], [78]. Эти изменения имели как суточные, так и долговременные характеристики и были связаны с изменениями градиента учитывающей сухой воздух составляющей индекса атмосферной рефракции. Долговременные изменения связаны с прохождением атмосферного фронта вдоль трассы измерения.

РИСУНОК 43

Сравнение измеренного и расчетного значений фазы для системы Logan-C на западном побережье США



ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Обобщенный метод Ли

Метод Ли [79], [80] является эталонным методом определения локальных средних значений долговременного компонента изменчивости сигнала. Описание этого метода содержится в Рекомендации МСЭ-R SM.1708, а также в Отчете СЕПТ [81].

Локальные средние значения рассчитываются путем применения скользящего среднего к серии мгновенных измерений напряженности поля, $r(x)$. Для этого необходимо определить соответствующие значения трех следующих различных параметров:

- окно усреднения $2L$ или расстояние, которое должно учитываться вокруг точки x (точки, в которой рассчитывается среднее значение напряженности поля);
- минимальное количество независимых выборок N в каждом интервале $2L$, которые необходимы для расчета локального среднего значения с определенной степенью достоверности;
- минимальное расстояние d между последовательными выборками, обеспечивающее некоррелированность выборок.

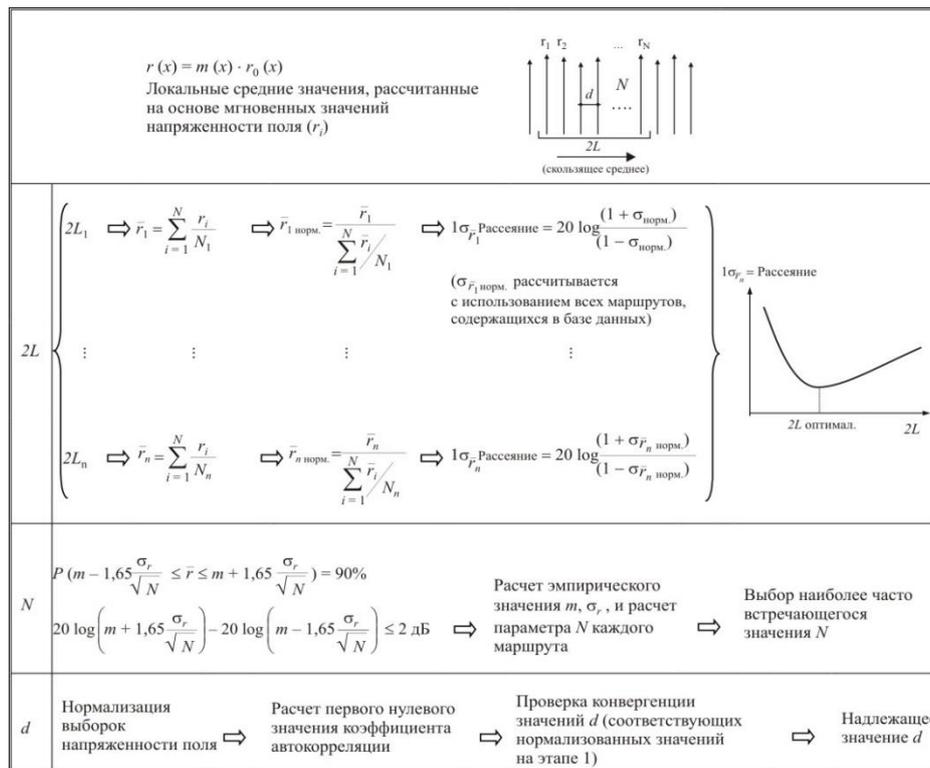
Локальные средние значения определяются путем усреднения как минимум N некоррелированных выборок в пределах окна усреднения $2L$ при расстоянии между последовательными выборками.

Ли [79], [80], [82], а позднее Парсонс [83] произвели теоретический расчет надлежащих значений этих параметров для конкретного случая – рэлеевского канала распространения и полосы частот УВЧ (с упоминанием некоторых конкретных значений для полосы ОВЧ [80]). Однако ни полученные значения, ни метод их расчета не могут быть обобщены для других условий приема.

Обобщенный метод Ли был разработан [84] для определения значений таких параметров в любых условиях приема (полоса частот, окружающая среда и факторы, влияющие на распространение). Краткий обзор этого метода приведен на рисунке А1.

РИСУНОК А1

Краткий обзор обобщенного метода Ли



20 Справочные документы

- [1] Sommerfeld, A.: "The propagation of waves in wireless telegraphy", *Ann. Phys.*, 1909, 28, p. 665.
- [2] Norton, K.A.: "The propagation of radio waves over the surface of the Earth and in the upper atmosphere. Part 1", *Proc. Inst. Radio. Eng.*, 1936, 24, pp. 1367-1387.
- [3] Norton, K.A.: "The propagation of radio waves over the surface of the Earth and in the upper atmosphere. Part 2", *Proc. Inst. Radio. Eng.*, 1937, 25, pp. 1203-1236.
- [4] Van Der Pol, B., and Bremmer, H.: "The diffraction of electromagnetic waves from an electrical point source round a finitely conducting sphere", *Philos. Mag. Ser. 7*, 1937, 24, pp. 141-176 and pp. 825-864; 1938, 25, pp. 817-834; and 1939, 26, pp. 261-275.
- [5] Norton, K. A.: "The calculation of ground-wave field intensity over a finitely conducting spherical Earth", *Proc. Inst. Radio Eng.*, 1941, 29, pp. 623-639.
- [6] Millington, G., 1949, "Ground-wave propagation over an inhomogeneous smooth earth", *Proc. IEE*, 96, 53.
- [7] Hufford, G.A., 1952, "An integral equation approach to the problem of wave propagation over an irregular surface", *Quart. Appl. Math.*, 9, 391.
- [8] Ott, R.H., and L.A. Berry, 1970, "An alternative integral equation for propagation over irregular terrain", *Radio Sci.*, Part 1, 5(5), pp. 767-771.
- [9] Hill, D.A.: "Ground-wave propagation over Forested and Built-up Terrain" NTIA Report 82-114, Dec 1982.
- [10] DeMinco, N.: "Automated Performance Analysis for Ground-Wave Communication Systems", NTIA-Report 86-209, Dec. 1986.
- [11] DeMinco, N: "Ground-Wave Analysis Model for MF Broadcast Systems," NTIA-Report 86-203, Sept. 1986.
- [12] Kissick, W.A., *et al.*, "Measurements of LF and MF Radio Propagation over Irregular, Inhomogeneous Terrain", NTIA-Report 78-12, Nov. 1978.
- [13] Hoffman, J. R., *et al.*, "DGPS Field Strength Measurements at a GWEN Site," NTIA-Report 98-346, April 1998.
- [14] Ott, R. H., *et al.*, "Ground Wave Propagation Over Irregular, Inhomogeneous Terrain: Comparisons of Calculations and Measurements," NTIA Report 79-20, May 1979.
- [15] Adams, J. E., *et al.*, "Measurements and Predictions of HF Ground Wave Propagation over Irregular, Inhomogeneous Terrain, "NTIA-Report 84-151, July 1984.
- [16] DeMinco, N.: "Medium Frequency Propagation Prediction Techniques and Antenna Modeling for Intelligent Transportation Systems (ITS) Broadcast Applications", NTIA-Report 99-368, Aug. 1999.
- [17] DeMinco, N.: "Propagation Prediction Techniques and Antenna Modeling (150 to 1705 kHz) for Intelligent Transportation Systems (ITS)", *IEEE AP Magazine*, AP Vol. 42, No. 4, Aug. 2000, pp. 9-34.
- [18] Rotheram, A.S.: "Ground-wave propagation. Part 1 Theory for short distances", *IEE Proc, F*, 1981, 128, pp. 275-284.
- [19] Rotheram, A.S.: "Ground-wave propagation. Part 2 Theory for medium and long distances and reference propagation curves", *IEE Proc. F*, 1918, 128, pp. 285-295.
- [20] Rotheram, A.S.: "Ground-wave propagation", *Marconi Rev.*, 1982, 45, (1), pp. 18-48.
- [21] Causebrook, J.H., 1977, "Groundwave propagation at medium frequency in built-up areas". BBC Engineering Research Department Report RD 1977/25.
- [22] Causebrook, J.H., 1978, "Medium-wave propagation in built-up areas", *Proc. IEE*, Vol. 125, 9, pp. 804-808.
- [23] Bremmer, H.: "Terrestrial Radio Waves" Elsevier, 1949.
- [24] Picquenard, A.: "Radio Wave Propagation", New York: John Wiley and Sons, 1974, p. 80.

- [25] Craig, K.H.: "Clear Air Characteristics of the Troposphere", in "Propagation of radio waves" 2nd ed, ed Barclay L W, 2003 ISBN 0 85296 102 2, Chapter 7.
- [26] "Ground wave propagation in an exponential atmosphere", CCIR Report 714-2, 1990.
- [27] DeMinco, N.: "Propagation Loss Prediction Considerations for Close-In Distances and Low Antenna Height Applications", NTIA-Report TR-07-449, July 2007.
- [28] Кашпровский В.Е., Кузубов Ф.А., "Распространение средних радиоволн земным лучом" (Kashprovsky V.E., Kuzubov F.A., "Propagation of medium waves by terrestrial ray"), "Svyaz", 1971, 220 pages.
- [29] Feinberg, E.L.: "Propagation of radiowaves along a terrestrial surface" Iss AS USSR M 1961, p. 546.
- [30] Millington, G., 1949, Nature 163 p. 128.
- [31] Millington, G. and Isted G.A., 1950, "Ground-wave propagation over an inhomogeneous Earth, Part 2 Experimental evidence and practical implications", Proc. IEE, 97, 209.
- [32] Hoffman, J.R., *et al.*, "Field Strength Measurements of DGPS and FAA Beacons in the 285 to 315 kHz Band," NTIA-Report 97-337, June 1997.
- [33] Damboldt, Th., 1981, "HF ground-wave field strength measurements on mixed land-sea paths", IEE 2nd Int Conf Antennas and Propagation, Heslington, York, UK; IEE Conf Proc No. 195.
- [34] Barrick, D.E., (1971a), "Theory of HF and VHF propagation across the rough sea, 1, The Effective Surface Impedance For A Slightly Rough Highly Conducting Medium At Grazing Incidence", Rad. Sci, V6, pp. 517-526.
- [35] Barrick, D.E., (1971b), "2. Application to HF and VHF propagation over the sea", Rad. Sci., V6 pp. 527-533.
- [36] Phillips, O.M. (1957): "On the generation of surface waves by turbulent wind", J. Fluid Mech., Vol.2, pp. 417-445.
- [37] Furutsu, K. Radio Science vol 17 pp 1037-1050, 1982.
- [38] J.M. Pielou, J.D., Milsom and R N Herring "HF ground wave propagation from a cliff top site" IEE Conf ICAP87, p. 103, 1987.
- [39] Chernov Yu. A., Zhiltsov A.U., "The Statistical characteristics of a terrestrial wave in a range LF-MF", "Radiotekhnika", 1997, № 2, pp. 41-45.
- [40] Stratton, G.A., "The Theory of electromagnetism", "Gostekhizdat", 1948.
- [41] Chernov, Yu. A.: "Distribution of average radiowaves in urban environment", Trudy NIIR, 2004, pp. 131-136.
- [42] Buchatskaja, G.B.: "An experimental research of distribution of a field HF-waves in city for a transmitter, located within the limits of this city", Trudy NIIR, 1989, № 4, pp. 14-19.
- [43] Bown, R. Martin, D.K. and Potter, R.K. "Some Studies in Radio Broadcast Transmission" 1924, Proc. IRE V12 pp. 57-131.
- [44] Bown, R. and Gillett, G.D., "Distribution of radio Waves From Broadcasting Stations Over City Districts" 1924, Proc IRE V12 pp. 395-409.
- [45] Barfield, R.H. and Munro, G.H. "The Attenuation of Wireless waves Over Towns", 1929, Proc. IEE, V67, pp. 253-270.
- [45] Naismith, R.: "Field Strength Measurements on Daventry 5XX", 1931, Proc. IEE V69 pp. 881-890.
- [47] Causebrook, J.H.: "Medium-wave propagation in built-up areas", 1978, Proc. IEE, V125, pp. 804-808.
- [48] Luo Lichen, "A New MF and HF Ground-wave Model for Urban Areas", 2000, IEEE Antennas and Prop. Mag, V42, pp. 21-32.
- [49] Gracely, F.R.: " Temperature Variations of Ground-Wave Signal Intensity at Standard Broadcast Frequencies ", Proc. I.R.E., April, 1949, pp. 360-363.

- [50] Gerber W. and A. Werthmüller, Ueber die vegetabile Absorption der Bodenwelle, Techn. Mitt.T.G., Sw., 1945, №1, 12-19.
- [51] Chernov Yu. A.: "Seasonal changes of a field intensity of a ground wave in day time in LF and MF bands" Trudy NIIR, 2005, pp. 109-115.
- [52] Захаренко В.Н., "Влияние вариаций электропроводности подстилающей поверхности на амплитуду напряженности земной волны диапазонов СВ и ДВ", Электросвязь, 1992, № 1, стр. 34–35. (V.N. Zakharenko, "Influence of variations in electroconductivity of a ground surface on amplitude of intensity of a ground wave signal in the MF and LF bands", Elektrosvyaz, 1992, №1, pp. 34-35).
- [53] Recommendation ITU-R P.1321-3.
- [54] Чернов, Ю.А, Цифровое радиовещание до 30 МГц: иллюзии и реальность. Часть 2. Длинные и средние волны. Темное время суток, Электросвязь, 2012, № 2. (Yu. Chernov, Digital broadcasting up to 30 MHz: illusions and reality. Part 2. LW and MW. Dark time of day, Electrosvyaz, 2012, № 2.).
- [55] Causebrook J H and Tait B, 1979, "Ground Wave propagation in a realistic terrain" BBC Research Dept. Report RD 1979/19.
- [56] ERC Recommendation (00)08, 2000, "Field Strength Measurements along a Route with Geographical Coordinate Registrations", <http://www.erodocdb.dk/docs/doc98/Official/Pdf/Rec0008.pdf>.
- [57] Ott, R.H., 1971, "An alternative integral equation for propagation over irregular terrain", Radio Sci., Part 2, 6(4), pp. 429-435.
- [58] de la Vega, D *et al.*, "Analysis of the Attenuation Caused by Orography Influence in the Medium Wave Band", 2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference – VTC2007.
- [59] Wait, J. R., 1962, "Electromagnetic Waves in Stratified Media," Oxford, Pergamon.
- [60] Almeida, M.P.C.; David, R.P.; Souza, R.S.L.; Castellanos, P.V.G. ; Cal Braz, J.A.; Lima, M.V.; Lima, F.F.; Silva Mello, L.A.R.; "Medium wave DRM field trials in Brazil – some daytime and night-time results in urban environment", Measurement (London. Print), v. 45, pp. 1-9, 2012.
- [61] Report ITU-R BS.2144. "Planning parameters and coverage for Digital Radio Mondiale (DRM) broadcasting at frequencies below 30 MHz", May 2009.
- [62] Causebrook, J.H., 1977, "Ground Wave Propagation at Medium Frequency in Built-up Areas" BBC Research Dept Report 1977/25.
- [63] Gil, U., *et al.*, 2009, "Medium Wave Field Strength Spatial Variability in Urban Environments", 3rd European Conference on Antenas and Propagation 2009.
- [64] Gil, U., *et al.*, 2010, "Empirical Analysis of Medium Wave Field Strength Prediction in Urban Environments", IEEE Int. Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. Shanghai 2010.
- [65] Fernandez, I., *et al.*, 2011, "Carrier and Noise Measurements in the Medium Wave Band for Urban Indoor Reception of Digital Radio" IEEE Trans Broadcasting.
- [66] Fernandez, I., *et al.*, 2011, "Carrier and Noise Measurements in the Medium Wave Band for Urban Indoor Reception of Digital Radio" IEEE Trans Broadcasting.
- [67] Chernov, Yu., "Distribution of terrestrial wave signal levels in a service zone at medium frequencies" Trans NIIR, 2006, pp. 81-90.
- [68] DeMinco, N., *et al.*, "Free-Field Measurements of the Electrical Properties of Soil Using the Surface Wave Propagation Between Two Monopole Antennas," NTIA-Report TR-12-484, January 2012.
- [69] DeMinco, N., *et al.*, "Free-Field Measurements of the Electrical Properties of Soil Using the Measured Reflection Coefficient at Normal Incidence and Multilayer Analysis," NTIA-Report TR-13-494, February 2013.
- [70] Eaton, J. L., 1976, "The wave tilt method of measuring electrical ground constants in the lf and mf bands" BBC Research Report RD 1976/15, www.bbc.co.uk/rd/pubs/reports/1976-15.pdf.
- [71] CCIR Report 716-3, 1990.

- [72] Johler, J.R., Kellar, W.J. and Walters, L. C. 1956, "Phase of the low radio-frequency ground wave". NBS Circular 573, <http://tf.boulder.nist.gov/general/pdf/2302.pdf>.
- [73] Hill, D.A. and Wait, J. R., 1980, "Ground-wave attenuation function for a spherical earth with arbitrary surface impedance". *Radio Sci.* Vol. 15, 3.
- [74] Johler, J.R. and Horowitz, S. 1974 "Propagation of a Loran pulse over irregular, inhomogeneous ground". Paper 28, AGARD Conf. Proc. No. 144 on Electromagnetic wave propagation involving irregular surfaces and inhomogeneous media, ed A. N. Ince. NTIS Accession Number AD A008583, National Technical Information Service, Springfield, Va. 22161, USA.
- [75] Samaddar, S.N., 1979, "The theory of Loran-C ground-wave propagation – A review". *Navigation*, Vol. 26, 3.
- [76] Pressey, B.G., Ashwell, G.E. and Fowler, C.S. 1953, "The measurements of the phase velocity of ground-wave propagation at low frequencies over a land path". *Proc. IEE*, 100, Pt. III.
- [77] Doherty, R.H. and Johler, J. R., 1975, " Meteorological influences on Loran-C ground-wave propagation". *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 37, pp. 1117-1124.
- [78] Samaddar, S. N., 1980, "Weather effects on Loran-C propagation", *Navigation*, Vol. 27, 1.
- [79] Lee, W. C. Y., 1986, "Mobile Communications Design Fundamentals", Howard W. Sams and Co.
- [80] Lee, W. C. Y., 1985, "Estimate of Local Average Power of a Mobile Radio Signal", *IEEE Trans Vehicular Technology*, Vol. VT-34, N° 1.
- [81] "ERC Recommendation (00)08, 2000, "Field Strength Measurements along a Route with Geographical Coordinate Registrations", <http://www.ero-docdb.dk/docs/doc98/Official/Pdf/Rec0008.pdf>.
- [82] Lee, W. C. Y., 1982, "Mobile Communications Engineering", Ed McGraw-Hill Book Company.
- [83] J. D. Parsons, 2000, "The Mobile Radio Propagation Channel", 2nd. Ed, John Wiley & Sons Ltd, 2000, ISBN 0 471 98857 X.
- [84] de la Vega, D., *et al.*, 2009 "Generalization of the Lee Method for the Analysis of Signal Variability", *IEEE Trans Vehicular Technology*, Vol. 58, N° 2, pp. 506-516.
- [85] Gil, U., *et al.* 2008, "DRM Field Trials for Urban Coverage in Spain", *EBU Technical Review 2008-Q2*.
- [86] Gil, U., *et al.* 2008, "DRM 20 kHz Simulcast Field Trials in the Medium Wave Band in Mexico D.F." *IEEE Trans Broadcasting*, Vol. 54, N° 1, pp. 58-61.
- [87] de la Vega, D., *et al.*, 2008, "Evaluation of the Lee Method for the Analysis of the Long-Term and Short-Term Variations in the Digital Broadcasting Services in the MW Band", *IEEE Int. Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*, Las Vegas, USA, March 2008.
- [88] de la Vega, D., *et al.*, 2008, "Empirical Analysis of the Sample Correlation for the Planning of Field Trials in the Digital Broadcasting Services at MF Band," *Proc. IEEE Int. Instrumentation and Measurement Technology Conference – I2MTC 2008*, pp. 2201-2204, Victoria BC, Canada, May 2008.
- [89] Gil, U., *et al.*, 2010, "Statistical Characterization of the Medium Wave Field Strength Spatial Variability in Urban Environments Using the Generalized Lee Method" *Proc. 4th European Conf. on Antennas and Propagation*, Barcelona, Spain, April 2010.
-

Международный союз электросвязи
Отдел продаж и маркетинг
Place des Nations
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Факс: +41 22 730 5194
Тел.: +41 22 730 6141
Эл. почта: sales@itu.int
Веб-сайт: www.itu.int/publications

ISBN 978-92-61-14644-3 SAP id
3 8 9 8 5



9 789261 146443

Отпечатано в Швейцарии
Женева, 2014 г.

Фотографии предоставлены: Shutterstock