

Лекции 3-4. Особенности распространения УКВ радиоволн в городе

4. Обзор экспериментальных статистических данных по распространению УКВ в городе

В городской среде напряженность поля случайным образом зависит от высот антенн на подвижном объекте и на центральной станции, от частоты сигнала, расстояния от передатчика, а также ширины и ориентации улиц и других локальных условий. Средняя напряженность поля в квазигладком городском районе практически непрерывно изменяется с частотой, высотой антенны и расстоянием, тогда как влияние других факторов более сложно.

4.1 Флуктуации уровня сигнала

По той причине, что поле УКВ при мобильной связи имеет сложную многолучевую структуру, обусловленную условиями распространения в городе, реальные значения напряженности поля будут иметь значительный разброс. Эти отклонения (флуктуации) имеют как временной, так и пространственный характер. Уже первые экспериментальные исследования пространственных и временных вариаций уровня сигнала в условиях города привели к выводу, что городской канал распространения радиоволн является локально стационарным, а пространственные замирания уровня сигнала имеют двойную природу.

Быстрые замирания являются результатом сложения полей отдельных волн многолучевого поля. Их характерный масштаб колеблется от половины длины волны до двух – трех длин волн. Медленные замирания отражают картину теневых зон, создаваемую городскими зданиями.

Если проследить картину пространственных изменений уровня напряженности поля УКВ, перемещаясь, например, по территории, равноудаленной от передающей станции (см. сплошную линию на рис. 4.1), то нетрудно обнаружить наличие «быстрых» флуктуаций, обусловленных интерференцией поля, проявление которых можно обнаружить на незначительных размерах обследуемой территории (десятки метров). Их можно назвать микрофлуктуациями. Эти флуктуации можно рассматривать относительно средних значений, которые будем называть медианными E_M (штриховая линия на рис. 4.1).

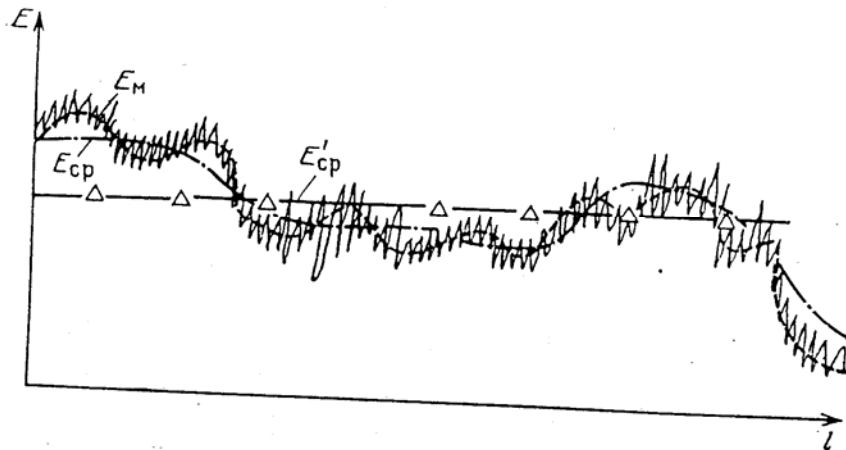


Рис. 4.1

На более протяженных трассах, например на протяженности длины улицы, медианная величина также подвержена флуктуациям, которые могут рассматриваться как «промежуточные» флуктуации со средним значением E_{CP} (штрихпунктирная линия на рис. 4.1). Масштаб этих флуктуаций определяется плотностью застройки, размерами зданий, шириной улиц и т. д. И наконец, возможны макрофлуктуации. Они обусловлены рельефностью местности и различной интенсивностью застройки отдельных районов города и могут рассматриваться как флуктуации E_{CP} относительно глобального среднего уровня E'_{CP}

Таким образом, пространственную структуру уровней электромагнитного поля УКВ в городе можно рассматривать в виде трех составляющих: микроструктуры, промежуточной структуры и макроструктуры [1].

Для математического описания локальной микроструктуры пространственных замираний чаще всего используется упрощенная модель, в которой временные флуктуации сигнала на выходе антенны подвижного пункта, а следовательно, и пространственные замирания вдоль пути движения рассматриваются как стационарные. В условиях многолучевого распространения волн в городе естественным также является предположение о статистической независимости переотраженных волн и равномерности распределения их случайных фаз. Напряженность, создаваемая каждой волной в точке наблюдения, зависит от множества случайных факторов: формы и электрических свойств отражающих поверхностей зданий, их расположения и ориентации в пространстве. Это позволяет рассматривать напряженность поля как комплексную случайную величину, распределение которой близко к нормальному. Подтверждением сделанного предположения являются экспериментальные исследования, которые показали, что в подавляющем числе случаев распределения амплитуд соответствуют рэлеевскому закону распределения. Экспериментальная проверка законов распределения амплитуд сигналов в условиях города выполнена авторами монографии [2]. Результаты сравнения экспериментальной гистограммы на

закрытых трассах (прямоугольники) с рэлеевским распределением приведены на рис.4.2.

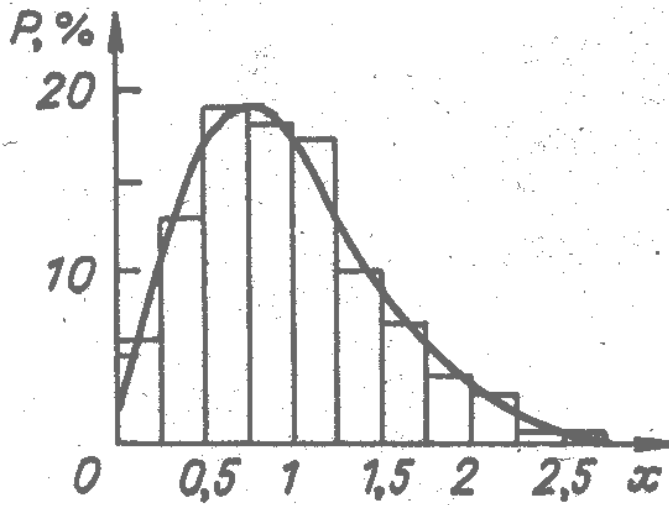


Рис. 4.2

На открытых трассах, в каждой точке которых поле является суперпозицией первичной (пришедшей от источника) и вторичных (отраженных от зданий) волн, должен выполняться обобщенный рэлеевский закон распределения амплитуд поля (закон Райса). Соответствующее этому случаю сопоставление экспериментальных данных с теорией приведено на рис. 4.3.

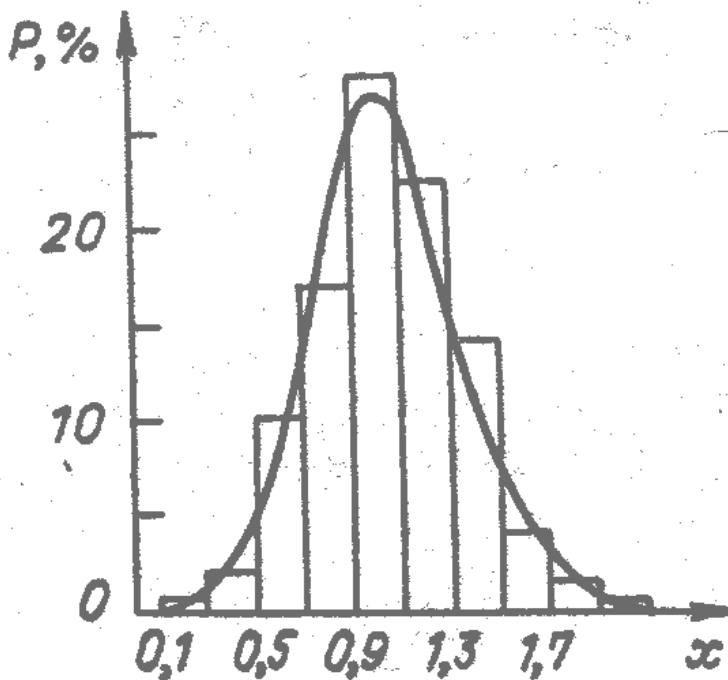


Рис. 4.3

Медленные пространственные замирания и усредненные по участкам протяженностью 20-30 м значения амплитуд хорошо описываются логарифмически нормальным распределением со стандартным отклонением,

зависящим от рельефа местности и типа городской застройки. Стандартное отклонение медленных замираний не превышает 4,5 дБ для центральных районов города и 0,5-1 дБ для пригорода. Для городов с пересеченным рельефом местности стандартное отклонение больше, чем для городов с равнинной местностью, и может достигать 10 дБ.

В условиях города пространственное распределение напряженности поля практически однозначно определяет свойства временных флуктуаций сигнала, принимаемого движущимся пунктом, так что масштабы временной и пространственной корреляции связаны через скорость движения. Чисто временные флуктуации амплитуды поля достигают 20-25 дБ при нахождении подвижного «возмущающего объекта» (транспорт, люди) в ближней зоне приемной антенны и не превышают 3 дБ в случае интенсивных транспортных потоков, находящихся в дальней зоне приемной антенны, для метрового и дециметрового диапазонов длин волн. С увеличением частоты (сантиметровый диапазон) глубина временных флуктуаций возрастает и в зависимости от метеорологических условий может достигать 10-13 дБ.

4.2 Зависимость средней мощности сигнала от расстояния

Одна из фундаментальных проблем в изучении распространения радиоволн состоит в описании процесса ослабления мощности сигнала при удалении приемной станции от передатчика.

Практически наиболее важным является случай, когда антенна базовой станции поднята достаточно высоко над городом, а подвижный объект, с которым осуществляется связь, расположен вблизи поверхности земли. К настоящему времени накоплен обширный экспериментальный материал для этого случая. Пространственное распределение напряженности поля в городских условиях у поверхности земли отличается крайней нерегулярностью. Сигналы, передаваемые между центральной станцией и подвижным пунктом, подвержены глубоким замираниям, причем соседние максимумы расположены на расстояниях порядка длины несущей волны. Обширные затенения, создаваемые строениями, практически исключают возможность прямого прохождения сигнала, поэтому его затухание значительно больше, чем в свободном пространстве.

На рис. 4.4 [3] приведены примеры зависимости средней мощности

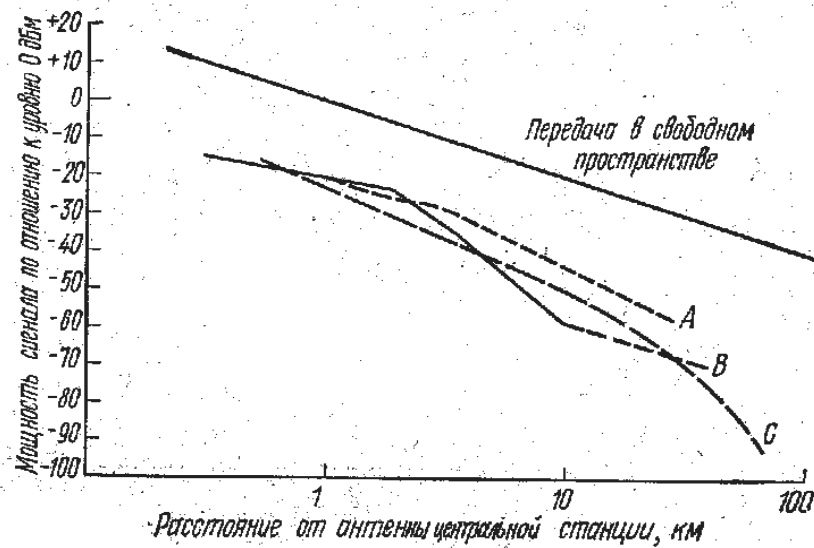


Рис. 4.4

сигнала от расстояния для частот, близких к 900 МГц, измеренной независимо в Филадельфии (кривая А), Нью-Йорке (кривая В) и Токио (кривая С) при высотах антенн базовой станции, близких к $h_b=140$ м, и мобильных станциях на высоте $h_m=3$ м. Для сравнения там же приведена зависимость мощности при распространении в свободном пространстве. Измерения показали следующие особенности: резкое падение медианного значения мощности сигнала с увеличением расстояния и большое затухание сигнала по сравнению с соответствующим затуханием в свободном пространстве. Измерения позволяют считать, что мощность сигнала примерно одинаково изменяется в различных городах.

Скорость уменьшения уровня сигнала с расстоянием не изменяется существенно с увеличением высоты антенны центральной станции. Однако подъем антенны приводит к заметному уменьшению затухания на всех расстояниях. Наиболее полные и систематизированные экспериментальные данные получены Окамурой в Токио [4].

4.3 Особенности приема сигналов внутри помещений

Прием сигналов от удаленного внешнего источника внутри здания можно прогнозировать только в самых общих чертах. Помимо условий распространения радиоволн от передатчика к приемнику, определяемых высотой расположения пунктов, плотностью и характером застройки, на уровень сигнала существенным образом влияет конструкция здания и материал, а также положение приемника внутри здания. Учет всех этих обстоятельств практически не возможен, так как внутри одного и того же помещения возможны такие расположения приемной аппаратуры, при которых прием может быть как хорошим, так и плохим, а иногда и совсем отсутствовать. Сложный интерференционный характер поля внутри

помещения порождает резкие перепады в уровне принимаемого сигнала, превышающие зачастую 20 дБ, даже при небольшом перемещении приемника. Изменение частоты сигнала приводит к перераспределению полей, так что приемлемое ранее расположение аппаратуры может оказаться совершенно неудачным. Результаты измерений, приведенные в различных работах, трудно сопоставимы и могут казаться противоречивыми, если не учитывать крайнюю чувствительность пространственной интерференционной картины поля внутри помещения к изменению каких-либо условий передачи или приема сигнала.

Ослабление сигнала при прохождении внутрь зданий (сравнение уровня сигнала внутри здания с уровнем сигнала вне его на той же высоте) определялось Райсом на частотах 35 и 150 МГц. По оценкам "потери проникновения" составляют в среднем 22-24 дБ при среднеквадратическом отклонении 12-14 дБ. Отмечается также, что изменения, превышающие 20 дБ, иной раз наблюдаются при разнесении точек всего на несколько шагов. В целом же пространственные флуктуации сигнала в пределах одного этажа подчиняются логарифмически нормальному распределению. Наибольшее ослабление сигнала наблюдалось на первом этаже.

5. Статистические модели, основанные на непосредственном обобщении опытных данных

В настоящее время существует целый ряд математических моделей, дающих возможность рассчитать усредненное значение принимаемой в городских условиях мощности в зависимости от различных параметров, характеризующих конкретные условия мобильной связи. Большинство из них являются почти полностью эмпирическими.

5.1 Эмпирические графики Окамуры

Исторически одними из первых явились эмпирические графики полученные Окамурой и позволяющие определить медианное значение сигнала в условиях статистически однородного, а также в какой-то степени учесть те или иные особенности данного города или отдельных городских районов [5]. В этой модели для вычисления медианного значения мощности сигнала, принимаемого антенной подвижного объекта в городских условиях, предлагается использовать следующее уравнение, в котором все величины приведены в децибеллах [3]:

$$P_p = P_0 - A_m(f, d) + H_b(h_b, d) + H_m(h_m, f), \quad (5.1)$$

где P_p - вычисленное значение искомой мощности принимаемого сигнала; P_0 - его мощность при передаче в свободном пространстве; $A_m(f, d)$ - фактор изменения медианного значения мощности в городе относительно затухания в свободном пространстве при эффективной высоте антенны центральной станции $h_b=200$ м и высоте антенны на подвижном объекте

$h_m=3$ м. Эти значения зависят от расстояния, частоты и могут быть получены из кривых, представленных на Рис. 5.1; $H_b(h_b, d)$ - фактор «высота – усиление» в децибелах для центральной станции с $h_b=200$ м, расположенной в городе (этот фактор является функцией расстояния, которая представлена на Рис.5.2);

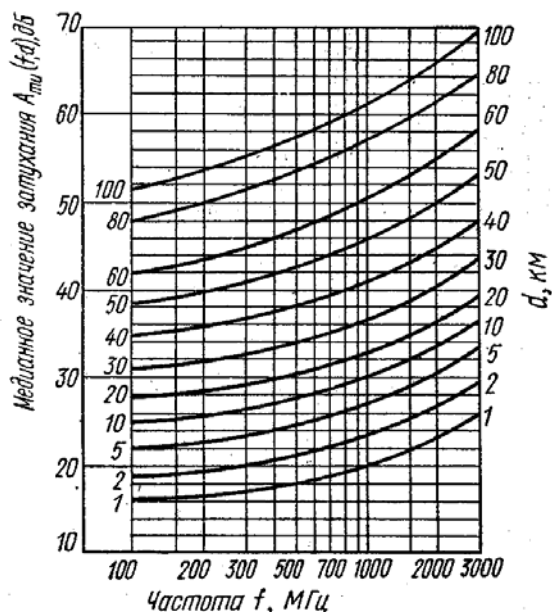


Рис. 5.1

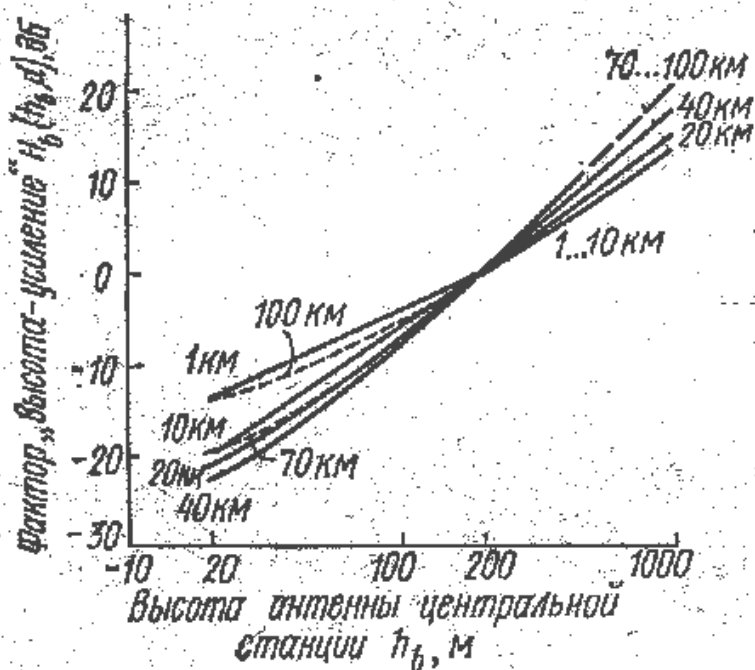


Рис 5.2

$H_m(h_m, f)$ - фактор «высота – усиление» в децибелах для станции на подвижном объекте с $h_m=3$ м, расположенном в городе (этот фактор зависит от частоты и представлен соответствующей кривой на Рис .5.3)

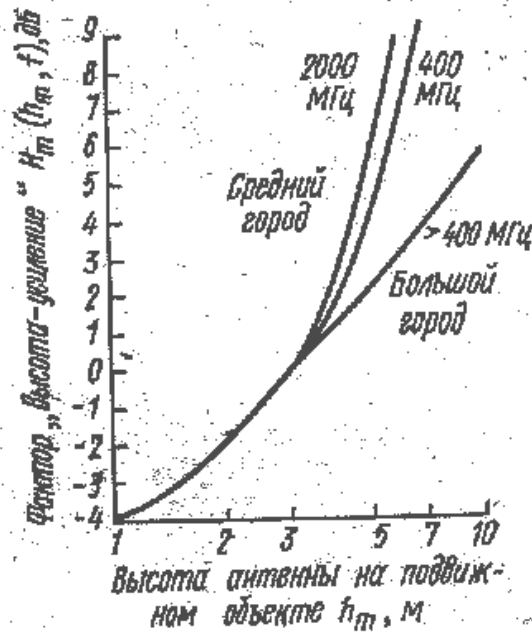


Рис. 5.3

Если какой-либо путь распространения радиоволн проходит в различных средах или над территорией, которая не является «квазигладкой», то исходную формулу (5.1) можно видоизменить для учета указанных факторов путем аддитивного добавления одного или нескольких поправочных коэффициентов, получаемых из дополнительных графиков, описанных в [3].

5.2 Эмпирические формулы Хаты

Наиболее удачной и подробной является аналитическая модель, полученная М. Хатой [6] как результат прямой аппроксимации кривых Окамуры. Модель Хаты не охватывает всех результатов, полученных Окамурой, и справедлива для квазиплоского города при следующих ограничениях

$$f = 150 \dots 1500 \text{ МГц}, \quad h_b = 30 \dots 200 \text{ м}, \\ R = 1 \dots 20 \text{ км}, \quad h_m = 1 \dots 10 \text{ м}.$$

В соответствии с этой моделью средние потери передачи выражаются формулой

$$L = 69,55 + 26,15 \lg f - 13,82 \lg h_b - \alpha(h_m) + (44,9 - 6,55 \lg h_b) \lg r, \quad (5.10)$$

где $\alpha(h_m)$ -поправочный коэффициент, используемый при высоте мобильной антенны h_m , отличной от эталонной, равной 1,5 м (в экспериментах Окамуры $h_m=3\text{м}$).

Выражения для $\alpha(h_m)$ получаются различными для крупных и средних городов. Для города средних размеров

$$\alpha(h_m) = (1,1 \cdot \lg f - 0,7)h_m - (1,56 \lg f - 0,8), \quad (5.11)$$

для крупного города

$$\alpha(h_m) = 3,2(\lg 11,75h_m)^2 h_m - 4,97. \quad (5.12)$$

Для потерь передачи в пригороде

$$L_s = L\{\text{город}\} - 2\left(\lg(f/28)^2\right) - 5,4. \quad (5.13)$$

Эти усредненные эмпирические формулы позволяют определить затухание с точностью до 7...17дБ [6].

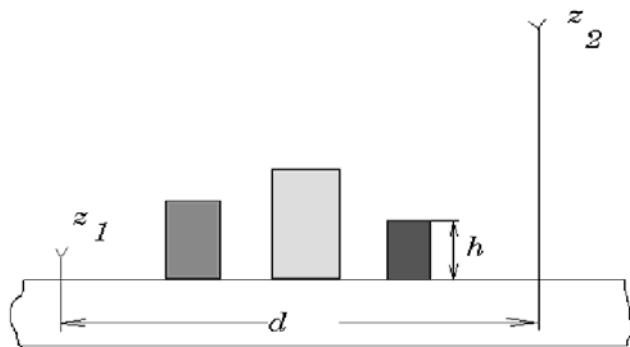
6. Статистическая модель Г.А. Пономарева, А.Н. Куликова, Е.Д. Тельпуховского

Кроме чисто эмпирических, имеются статистические модели, вывод которых базируется на аналитическом подходе. Наиболее последовательный из таких подходов предложен в работах Г.А. Пономарева, А.Н. Куликова и Е.Д. Тельпуховского [2]. Суть его заключается в использовании для приближенного расчета интенсивности поля формулы Кирхгофа с геометрическим определением «освещенных» отражающих площадок и последующим усреднением по входящим в формулу параметрам городской застройки.

6.1 Статистическая модель городской застройки.

Современные города с точки зрения распространения радиоволн представляют собой столь сложную среду, что ее математическое описание невысказимо без упрощений, определяемых целями конкретной задачи. Необходимо выделить главные факторы, оказывающие решающее влияние на результат расчета.

Для УКВ большинство крупных городских строений практически непрозрачны, их размеры во много раз превышают длину волны. Это приводит к образованию в городе обширных теневых зон, что в значительной



степени определяет свойства формирующегося поля.

В качестве модели городской застройки примем множество крупных непрозрачных объектов, случайно расположенных на плоской поверхности – поверхности земли (Рис. 6.1). Построим декартову прямоугольную систему координат (x, y, z) , совместив с поверхностью земли

Рис 6.1

координатную плоскость $z=0$ (поверхность S_1). Рельеф городской застройки в принятой модели будем описывать резко пересеченной случайной поверхностью, состоящей из поверхностей зданий различной высоты h с вертикальными стенами и плоскими крышами (поверхность S_2). В дальнейшем поверхность S_1 будем считать идеально отражающей, а коэффициент отражения от вертикальных стен предполагать случайной комплексной величиной, фаза которой с равной вероятностью может принимать любые значения на интервале $(0, 2\pi)$.

6.2. Вероятность прямой видимости

Как отмечено выше, определяющую роль при распространении УКВ в городе играют затенения, создаваемые зданиями. Поэтому важнейшей величиной является вероятность прямой видимости между приемной и передающей антеннами. Для ее расчета в лучевом приближении сначала рассмотрим пересечения прямых линий, выходящих параллельно поверхности земли из источника, расположенного ниже крыш зданий, со стенами домов. Считая застройку данного района города статистически однородной и изотропной, предположим, что среднее число пересечений на единице длины γ_0 не зависит от координат x, y и направления линии. Тогда среднее число пересечений на длине l равно $\gamma_0 l$. В [2] выдвигается гипотеза о том, что случайные события, состоящие в пересечении прямой линии от источника со стенами зданий, распределены по закону Пуассона. Тогда вероятность m пересечений на отрезке l может быть вычислена по формуле [7]

$$P_l(m) = \frac{(\bar{m}_l)^m}{m!} e^{-\bar{m}_l} \quad (6.1),$$

где

$$\bar{m}_l = \gamma_0 l. \text{ — среднее число пересечений на этом отрезке.}$$

Для проверки применимости сделанных предположений к описанию реальной городской застройки была проведена статистическая обработка топографических планов нескольких однотипных по характеру застройки современных городских районов [2]. В итоге можно сделать вывод, что предположение о пуассоновском характере распределения $P_l(m)$ можно считать приемлемым для интервалов, превышающих 0,2 км.

Наиболее важной для последующих расчетов величиной является вероятность прямой видимости между двумя точками, разнесенными на расстояние l . Она совпадает с вероятностью отсутствия пересечений этого отрезка стенами зданий $P_l(0)$. В рассматриваемом случае статистически однородной и изотропной застройки она равна

$$P_l(0) = e^{-\gamma_0 l}. \quad (6.2)$$

Независимо от описанных испытаний была проведена обработка топографических планов с целью получения значений $P_l(0)$ и по (6.2) для значений l как меньших, так и больших 0.2 км.

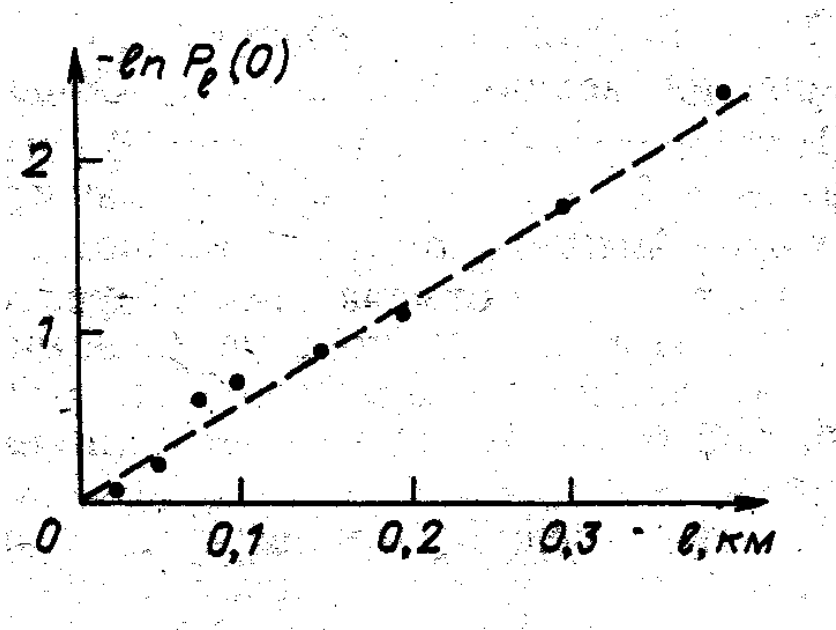


Рис. 6.2

Результаты показаны на Рис. 6.2 в виде отмеченных точками значений величины $-\ln P_l(0)$. Штриховая линия – расчетная. Видно, что в целом результаты испытаний хорошо согласуются с расчетом. Заметные отклонения наблюдаются при $l < 100$ м, что согласуется с предположительной оценкой масштаба корреляции рельефа городской застройки, при превышении которого хорошо работает модель Пуассона.

Из (6.2) можно вывести

$$\bar{\rho} = \gamma_0^{-1} \quad (6.3)$$

среднее расстояние между пересечениями, т.е. средняя горизонтальная дальность прямой видимости в слое городской застройки. Обозначая через \bar{l} масштаб корреляции городского рельефа, можно записать следующее условие, при котором последовательно наблюдаемые пересечения с передними стенами зданий будут практически независимыми: $\bar{l} \ll \bar{\rho}$. Для выбранных городских районов по результатам статистических испытаний значение $\bar{\rho}$ равно примерно 170 м.

Формула (6.2) позволяет рассчитать в принятом приближении вероятность прямой видимости между двумя точками в слое городской застройки, если задана плотность пересечений γ_0 . Однако, для точного расчета γ_0 необходимо детальное описание модели городской застройки, которое бы включало в себя сведения о форме проекций зданий на плоскость $z=0$ и их взаимном расположении. Если же использовать проверенное выше предположение о статистической независимости двух последовательных

пересечений, то можно пренебречь существованием минимального разделяющего интервала. При этом множество случайно расположенных на плоскости $z=0$ объектов можно заменить при расчете статистических характеристик пересечений множеством плоских отражающих экранов, ортогональных к поверхности земли и расположенных на ней статистически независимо.

Будем считать, что любая ориентация проекций объектов на плоскость $z=0$ равновероятна, а средние точки проекций образуют множество со средней плотностью ν . Задача расчета γ_0 при этом сводится к задаче расчета среднего числа пересечений отрезка единичной длины, принадлежащего плоскости $z=0$, со случайно расположенными отрезками – проекциями экранов на эту плоскость.

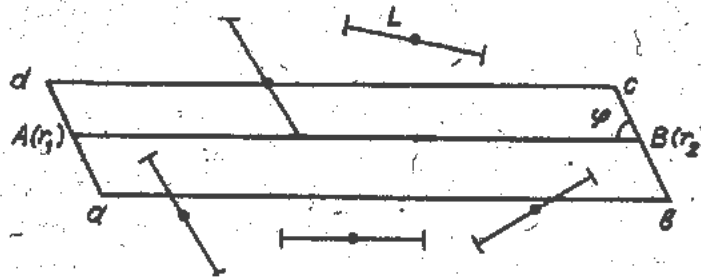


Рис. 6.3

Найдем среднее число пересечений отрезка AB длиной r_{12} (Рис. 6.3) с множеством случайно расположенных отрезков – проекций, длины которых также будем считать случайными, независимыми и одинаково распределенными с плотностью $w(L)$. Среднее число произвольно ориентированных экранов с длиной в интервале $[L, L + dL]$ на единичной площади равно

$$\nu w(L) dL .$$

Среднее число экранов в этом интервале длин на единичной площади, ориентированных в интервале углов от ϕ до $\phi + d\phi$ при равномерном распределении по ϕ выражается так

$$\frac{\nu w(L) dL}{2\pi} d\phi .$$

Площадь параллелограмма, в который должен попасть центр выбранного экрана, чтобы с ним было пересечение, равна

$$r_{12} L |\sin \phi| .$$

Тогда среднее число пересечений отрезка AB с экранами в выбранном интервале длин и углов ориентации имеет вид

$$\frac{\nu L}{2\pi} w(L) r_{12} |\sin \phi| dL d\phi .$$

Окончательно, среднее число пересечений этого отрезка с экранами любой длины и ориентации получается интегрированием и выглядит так

$$\frac{\nu r_{12}}{\pi} \int_0^{\infty} L w(L) dL \int_0^{\pi} \sin \varphi d\varphi = \frac{2\nu \langle L \rangle}{\pi} r_{12},$$

где $\langle L \rangle$ - средняя длина экранов. После этого по определению γ_0 можно записать

$$\gamma_0 = \frac{2\nu \langle L \rangle}{\pi}. \quad (6.4)$$

Отметим, что средняя горизонтальная дальность прямой видимости в слое городской застройки \bar{r} , рассчитанная по (6.3), (6.4) при $\nu=90 \text{ км}^{-2}$ и $\langle L \rangle=0.105 \text{ км}$, оказывается равной 166 м, что согласуется со значением \bar{r} , полученным по результатам статистических испытаний для реальных городских районов.

Таким образом, из (6.2) следует, что если оба пункта расположены ниже крыш зданий, вероятность прямой видимости между ними равна

$$P(\bar{r}_1, \bar{r}_2) = \exp\left(-\gamma_0 \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}\right). \quad (6.5)$$

Эту формулу нетрудно обобщить на случай, когда один из пунктов расположен выше крыш. Считая для простоты, что все дома имеют одинаковую высоту h , запишем проекцию на плоскость земли той части линии, соединяющей пункты, что проходит ниже крыш

$$\frac{h - z_1}{z_2 - z_1} \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2},$$

где $0 < z_1 < h$ и $z_2 > h$. Тогда вероятность прямой видимости между этими пунктами будет иметь вид

$$P(\bar{r}_1, \bar{r}_2) = \exp\left(-\gamma_0 \frac{h - z_1}{z_2 - z_1} \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}\right).$$

(6.6)

Отсюда следует, что средняя дальность \bar{r}_{12} прямой видимости, равная

$$\bar{r}_{12} = \left(\gamma_0 \frac{h - z_1}{z_2 - z_1}\right)^{-1}, \quad (6.7)$$

значительно увеличивается при подъеме второго пункта над крышами зданий.

6.3 Модифицированный метод Кирхгофа, учитывающий затенение поверхностей городских зданий.

В соответствии с принятой в 6.1 моделью городской застройки нам предстоит рассчитать рассеяние поля излучения базовой станции на сложной поверхности. Опираясь на тот факт, что размеры всех зданий значительно превосходят длину волны излучения, будем использовать известный метод Кирхгофа.

Исходным является известное интегральное представление для поля излучения [8]:

$$u(\vec{r}_0) = u_I(\vec{r}_0) + \frac{1}{4\pi} \iint_S \left[[u(\vec{r}) - u_I(\vec{r})] \frac{\partial}{\partial n} \frac{e^{ik|\vec{r}-\vec{r}_0|}}{|\vec{r}-\vec{r}_0|} - \frac{e^{ik|\vec{r}-\vec{r}_0|}}{|\vec{r}-\vec{r}_0|} \frac{\partial [u(\vec{r}) - u_I(\vec{r})]}{\partial n} \right] ds. \quad (6.8)$$

Первое слагаемое в этой формуле имеет смысл падающего на замкнутую поверхность поля $u_I(\vec{r}_0)$.

Выберем замкнутую поверхность S так, чтобы она включала в среднем плоскую случайную поверхность городской застройки S_0 , дополненную частью плоскости S' , и полусферу $C_{R'}$. (Рис. 6.4).

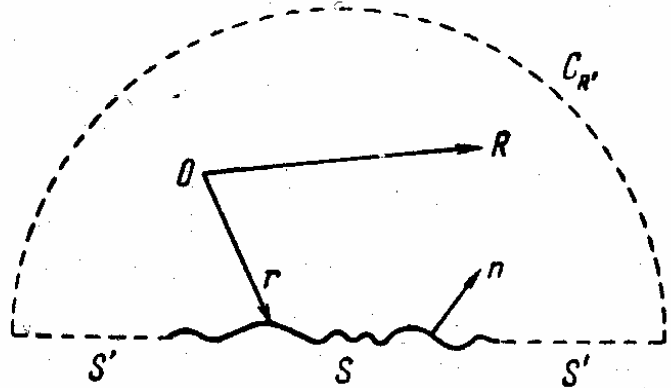


Рис.6.4

В приближении Кирхгофа [8] поле $u(\vec{r})$ на поверхности S' можно считать совпадающим с падающим невозмущенным полем $u_I(\vec{r})$. При этом в (6.8) интеграл по поверхности S' равен нулю. Что же касается интеграла по полусфере $C_{R'}$, то при достаточно большом радиусе полусферы этим интегралом можно пренебречь, если принять во внимание условие излучения, которое обеспечивается хотя бы малым поглощением в среде. Таким образом, в (6.8) остается только интеграл по поверхности городской застройки S_0 .

Если излучатель базовой или мобильной станции можно рассматривать как точечный источник, расположенный в точке \vec{r}_1 ($J(\vec{r}) = \delta(\vec{r} - \vec{r}_1)$), то

$$u_I(\vec{r}) = - \frac{1}{4\pi} \frac{e^{ik|\vec{r}-\vec{r}_1|}}{|\vec{r}-\vec{r}_1|}.$$

Случайная поверхность городской застройки S_0 состоит из плоской ($z=0$) хорошо проводящей поверхности земли S_1 и поверхностей зданий S_2 . Отражение падающей и рассеянных на городских зданиях волн от плоскости $z=0$ может быть учтено введением вместо поля точечного источника

$$- \frac{1}{4\pi} \frac{e^{ik|\vec{r}-\vec{r}_1|}}{|\vec{r}-\vec{r}_1|} \text{ функции Грина для полупространства [2,9]}$$

$$G(\vec{r}, \vec{r}_1) = -\frac{1}{4\pi} \left\{ \frac{e^{ik|\vec{r} - \vec{r}_1|}}{|\vec{r} - \vec{r}_1|} - \frac{e^{ik|\vec{r} - \vec{r}'_1|}}{|\vec{r} - \vec{r}'_1|} \right\}, \quad (6.9)$$

где \vec{r}'_1 - радиус-вектор точки, зеркальной с \vec{r}_1 относительно поверхности $z=0$. Такое предположение эквивалентно допущению о полном отражении с изменением фазы волны на π (потеря полволны), что с хорошей точностью имеет место при углах падения, близких к скользким, для любой поляризации поля в случае хорошей проводимости земли. После этого из (6.8) получаем для точки наблюдения \vec{r}_2 следующее выражение [2]

$$u(\vec{r}_2) = G(\vec{r}_2, \vec{r}_1) + \iint_{S_2} \left\{ u_R(\vec{r}_s) \frac{\partial}{\partial n_s} G(\vec{r}_2, \vec{r}_s) - G(\vec{r}_2, \vec{r}_s) \frac{\partial u_R(\vec{r}_s)}{\partial n_s} \right\} ds, \quad (6.10)$$

где $u_R(\vec{r}_s) = u(\vec{r}_s) - u_I(\vec{r}_s)$ - отраженное поле, \vec{r}_s - точка на поверхности одного из зданий.

В приближении Кирхгофа значение $u_R(\vec{r}_s)$ определим как произведение коэффициента отражения $R(\varphi_s, \vec{r}_s)$ на граничное значение падающего излучения $u_I(\vec{r}_s)$ и на функцию затенения $Z(\vec{r}_2, \vec{r}_s, \vec{r}_1)$, которая равна единице, если точка отражения \vec{r}_s видна из точек приема \vec{r}_2 и излучения \vec{r}_1 одновременно, и нулю во всех остальных случаях. При этом имеется в виду, что коэффициент отражения имеет то же значение, что при падении плоской волны на плоскость, касательную к случайной поверхности в данном месте [2]. Тогда можно записать [8]

$$u_R = ZR u_I, \quad \frac{\partial u_R}{\partial n_s} = -ZR \frac{\partial u_I}{\partial n_s}. \quad (6.11)$$

Кроме того, необходимо учесть возможность затенения точки наблюдения непосредственно от источника. После этого уточнения выражение (6.10) принимает вид [8]

$$u(\vec{r}_2) = Z(\vec{r}_2, \vec{r}_1) G(\vec{r}_2, \vec{r}_1) + \iint_{S_2} Z(\vec{r}_2, \vec{r}_s, \vec{r}_1) R(\varphi_s, \vec{r}_s) \frac{\partial}{\partial n_s} \{G(\vec{r}_2, \vec{r}_s) u_I(\vec{r}_s)\} ds \quad (6.12)$$

В нашем случае точечного источника в приближении однократного отражения

$$u_I(\vec{r}_s) = G(\vec{r}_s, \vec{r}_1). \quad (6.13)$$

Практически интересен случай, когда излучатель и приемник удалены от точки отражения на много длин волн. При этом в (6.12) в процессе дифференцирования достаточно брать производные только от экспоненциальных функций. Тогда с учетом того, что $\frac{\partial}{\partial n_s} = (\vec{n}_s \vec{\nabla}_s)$ получаем

$$\frac{\partial}{\partial n_s} G(\vec{r}_2, \vec{r}_s) \approx -ik \left(\vec{n}_s \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_s}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_s|} \right) G(\vec{r}_2, \vec{r}_s) = -ik \sin \psi_s G(\vec{r}_2, \vec{r}_s),$$

$$\frac{\partial}{\partial n_s} G(\vec{r}_s, \vec{r}_1) \approx ik \left(\vec{n}_s \frac{\vec{r}_s - \vec{r}_1}{|\vec{r}_s - \vec{r}_1|} \right) G(\vec{r}_s, \vec{r}_1) = -ik \sin \varphi_s G(\vec{r}_s, \vec{r}_1),$$

где углы обозначены на Рис. 6.5

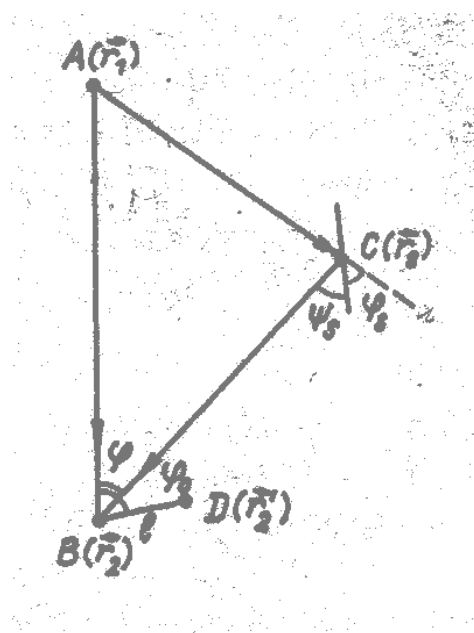


Рис. 6.5

В итоге в приближении однократного отражения имеем

$$u(\vec{r}_2) = Z(\vec{r}_2, \vec{r}_1)G(\vec{r}_2, \vec{r}_1) - ik \iint_{S_2} Z(\vec{r}_2, \vec{r}_s, \vec{r}_1)R(\varphi_s, \vec{r}_s)(\sin \psi_s + \sin \varphi_s)G(\vec{r}_2, \vec{r}_s)G(\vec{r}_s, \vec{r}_1)ds. \quad (6.14)$$

6.4 Среднее значение поля в точке приема.

В соответствии с (6.14) поле в точке наблюдения в приближении однократного отражения случайным образом зависит от отражающих свойств зданий, их расположения и ориентации. Для оценки надежности связи важно в первую очередь найти усредненные по ансамблю вариантов городской застройки характеристики. Простейшей статистической характеристикой является среднее значение поля. При усреднении (6.14) необходимо иметь в виду, что в принятой модели случайный коэффициент отражения статистически не зависит от расположения и ориентации зданий, и, как упомянуто выше, является комплексной величиной, фаза которой с равной вероятностью может принимать любые значения на интервале $(0, 2\pi)$. Поэтому его среднее значение $\langle R(\varphi_s, \vec{r}_s) \rangle = 0$. Поскольку однократно отраженное поле, определяемое поверхностным интегралом в (6.14), линейно зависит от коэффициента отражения, и оно при статистическом усреднении зануляется. Первое слагаемое в (6.14) описывает прямую волну, распространяющуюся от передающей к приемной станции и случайным образом экранированную (затененную) городской. Поскольку функция затенения $Z(\vec{r}_2, \vec{r}_1)$ принимает только два значения 0 или 1, ее среднее значение совпадает с вероятностью прямой видимости между излучателем и приемником, определяемой (7.7). В итоге получаем [2]

$$\langle u(\vec{r}_2) \rangle = \langle Z(\vec{r}_2, \vec{r}_1) \rangle G(\vec{r}_2, \vec{r}_1) = P_{21}G(\vec{r}_2, \vec{r}_1). \quad (6.15)$$

Таким образом, среднее значение поля в точке приема при распространении радиоволн в условиях города будет в основном определяться вероятностью приема сигнала непосредственно от источника излучения.

Полученное выражение с помощью (6.6) позволяет легко найти интенсивность когерентной составляющей принимаемого излучения [2]

$$\langle I_K(\vec{r}_2) \rangle = \left[\frac{\sin(kz_2 z_1 / d)}{2\pi d} \right]^2 \exp\left(-2\gamma_0 d \frac{h - z_1}{z_2 - z_1}\right). \quad (6.16)$$

где $d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$ - среднее горизонтальное расстояние между приемником и передатчиком. При выводе (6.16) учтено, что наибольшее практическое значение имеет случай, когда и антенна приемника, и антенна передатчика подняты на высоту, значительно меньшую горизонтального расстояния между ними. Тогда функция Грина (6.9) записывается приближенно по формуле Введенского.

6.5 Функция корреляции поля УКВ в городе

Следующей важнейшей усредненной статистической характеристикой принимаемого излучения является пространственная функция корреляции $K(\vec{r}_2, \vec{r}_2') = \langle [u(\vec{r}_2) - \langle u(\vec{r}_2) \rangle][u^*(\vec{r}_2') - \langle u^*(\vec{r}_2') \rangle] \rangle$. Из (6.14) следует

$$K(\vec{r}_2, \vec{r}_2') = k^2 \left\langle \iint_{S_2} ds \iint_{S_2} Z(\vec{r}_2, \vec{r}_S, \vec{r}_1) Z(\vec{r}_2', \vec{r}_S', \vec{r}_1) R(\varphi_S, \vec{r}_S) R^*(\varphi_S', \vec{r}_S') (\sin \psi_S + \sin \varphi_S) (\sin \psi_S' + \sin \varphi_S') G(\vec{r}_2, \vec{r}_S) G(\vec{r}_S, \vec{r}_1) G^*(\vec{r}_2', \vec{r}_S') G^*(\vec{r}_S', \vec{r}_1) ds' \right\rangle. \quad (6.17)$$

В последней формуле усреднение необходимо выполнить по положению отражающих поверхностей объектов городской застройки, их числу и отражающим свойствам. Проведем эту процедуру поэтапно. Вначале произведем усреднение по значениям коэффициента отражения на поверхности объекта, обозначая результат символом K_R . Для сокращения записи опустим часть аргументов подынтегрального выражения, их индексы при символах функций.

$$K_R(\vec{r}_2, \vec{r}_2') = k^2 \iint_{S_2} ds \iint_{S_2} Z_{2S1} Z_{2'S1} \langle R_S(\varphi_S) R^*(\varphi_S') \rangle (\sin \psi_S + \sin \varphi_S)^2 G_{2S} G_{S1} G^*_{2'S'} G^*_{S'1} ds'. \quad (6.18)$$

При записи (6.18) предполагается, что функция корреляции коэффициента отражения отлична от нуля только тогда, когда точки \vec{r}_S и \vec{r}_S' находятся на поверхности одного и того же экрана. Кроме того, используется тот факт, что масштабы корреляции коэффициента отражения малы по сравнению с размерами зданий и средней дальностью прямой видимости. Это позволяет учитывать различие между точками отражения только в показателях экспонент функций Грина и в самой корреляционной функции коэффициента отражения. Введем, вместо \vec{r}_S' , новую переменную интегрирования $\vec{\xi} = \vec{r}_S' - \vec{r}_S$. Предположим, что случайное распределение коэффициента отражения по стенам зданий обладает статистической однородностью, и определим функцию корреляции коэффициента отражения в виде

$$\langle R_S(\varphi_S) R_{S'}^*(\varphi'_S) \rangle = \Gamma(\varphi_S) \exp\left(-\frac{|\xi_{\perp}|}{l_{\Gamma}} - \frac{|\xi_Z|}{l_B}\right), \quad (6.19)$$

где ξ_{\perp} - горизонтальная проекция вектора ξ , а l_{Γ} , l_B - горизонтальный и вертикальный масштабы корреляции коэффициента отражения. Относительная малость этих масштабов корреляции позволяет упростить выражения для функций Грина в (6.18).

$$G_{S1} G_{S'1}^* \approx |G_{S1}|^2 \exp[-ik \xi_Z \sin \vartheta_1 - ik \xi_{\perp} \cos \varphi_S],$$

$$G_{2S} G_{2S'}^* \approx |G_{2S}|^2 \exp\left[ik \xi_Z \sin \vartheta_2 + ik \xi_{\perp} \cos \varphi_S + ik \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_S}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_S|} (\vec{r}'_2 - \vec{r}_2)\right], \quad (6.20)$$

где $\sin \vartheta_1 = \frac{(z_S - z_1)}{|\vec{r}_S - \vec{r}_1|}$, $\sin \vartheta_2 = \frac{(z_2 - z_S)}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_S|}$. Приближенные выражения (6.20) справедливы при выполнении условий

$$\frac{l_{\Gamma}^2}{\lambda \bar{\rho}} \ll 1, \quad \frac{l_B^2}{\lambda \bar{\rho}} \ll 1.$$

Подставляя (6.19) и (6.20) в (6.18), получаем

$$K_R(\vec{r}_2, \vec{r}'_2) = k^2 \iint_{S_2} Z_{2S1} Z_{2'S1} \Gamma(\varphi_S) (\sin \vartheta_S + \sin \varphi_S)^2 |G_{S1}|^2 |G_{S2}|^2 \exp\left[ik \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_S}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_S|} (\vec{r}'_2 - \vec{r}_2)\right] ds \times$$

$$\times \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{|\xi_{\perp}|}{l_{\Gamma}} + ik \xi_{\perp} (\cos \vartheta_S - \cos \varphi_S)\right) d\xi_{\perp} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi_Z}{l_B} + ik \xi_Z (\sin \vartheta_2 - \sin \vartheta_1)\right) d\xi_Z \quad (6.21)$$

Вычисляя интегралы по переменным ξ_{\perp} и ξ_Z , приходим к формуле

$$K_R(\vec{r}_2, \vec{r}'_2) = \iint_{S_2} Z_{2S1} Z_{2'S1} \Gamma(\varphi_S) (\sin \vartheta_S + \sin \varphi_S)^2 |G_{S1}|^2 |G_{S2}|^2 \exp(ikl \cos(\varphi_0 - \varphi)) \times$$

$$\times \frac{2kl_{\Gamma}}{1 + (kl_{\Gamma})^2 (\cos \vartheta_S - \cos \varphi_S)^2} \frac{2kl_B}{1 + (kl_B)^2 (\sin \vartheta_2 - \sin \vartheta_1)^2} ds, \quad (6.22)$$

где $l = |\vec{r}'_2 - \vec{r}_2|$ - расстояние между точками наблюдения,

$$\cos \varphi = \left(\frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|} \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_S}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_S|}\right), \quad \cos \varphi_0 = \left(\frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|} \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}'_2}{|\vec{r}_2 - \vec{r}'_2|}\right).$$

На следующем этапе нужно выполнить усреднение по случайному расположению и ориентации вертикальных экранов, моделирующих стены зданий. При этом учтем, что вероятность того, что на расстоянии не больше, чем dn от выбранной точки рассеяния C окажется плоский экран длины L , ориентированный под углом к $(\vec{r}_S - \vec{r}_1)$ в интервале от φ_S до $\varphi_S + d\varphi_S$, равна произведению вероятности $dnL \nu$ попадания центра экрана в прямоугольник dnL и вероятности ориентации экрана в интервале $d\varphi_S$, равной $\frac{d\varphi_S}{2\pi}$. Таким образом, отмеченное выше усреднение производится умножением (6.22) на

$$\nu L dn \frac{d\varphi_S}{2\pi}$$

и интегрированием по переменным n и φ_s . Причем $(dsdn) = d^3\vec{r}$ - трехмерный элемент объема слоя городской застройки. Интеграл по φ_s имеет вид

$$I = \frac{1}{2\pi} \int (\sin(\alpha - \varphi_s) + \sin(\varphi_s))^2 \Gamma(\varphi_s) \frac{2kl_\Gamma}{1 + (kl_\Gamma)^2 (\cos(\alpha - \varphi_s) - \cos \varphi_s)^2} d\varphi_s, \quad (6.23)$$

где α - угол между векторами $(\vec{r}_s - \vec{r}_1)$ и $(\vec{r}_2 - \vec{r}_s)$.

Поскольку в практических условиях УКВ связи

$$kl_\Gamma, kl_B \gg 1 \quad (6.24)$$

последняя функция под интегралом в (6.23) имеет острый максимум при $\varphi_s = \frac{\alpha}{2}$. В связи с этим удобно перейти к новой переменной $\varphi_s = \frac{\alpha}{2} + \theta$. После

этого получаем

$$I = \frac{1}{2\pi} \int \left(\sin\left(\frac{\alpha}{2} - \theta\right) + \sin\left(\frac{\alpha}{2} + \theta\right) \right)^2 \Gamma\left(\frac{\alpha}{2} + \theta\right) \frac{2kl_\Gamma}{1 + 4(kl_\Gamma)^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \sin^2 \theta} d\theta. \quad (6.25)$$

Поскольку при выполнении (6.24) и не слишком малых углах α подинтегральное выражение заметно отличается от нуля только при $\theta \ll 1$, можно приближенно записать

$$I \approx \frac{4}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\sin \frac{\alpha}{2} \right)^2 \Gamma\left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{2kl_\Gamma}{1 + 4(kl_\Gamma)^2 (\sin \frac{\alpha}{2})^2 \theta^2} d\theta. \quad (6.26)$$

Этот интеграл легко вычисляется

$$I = 2 \left(\sin \frac{\alpha}{2} \right) \Gamma\left(\frac{\alpha}{2}\right). \quad (6.27)$$

Кроме того, необходимо еще усреднить входящие в (6.22) функции затенения

$$\langle Z_{2S1} Z_{2'S'1} \rangle = P(\vec{r}_1, \vec{r}_S) P_{BD}. \quad (6.28)$$

Здесь $P(\vec{r}_1, \vec{r}_S)$ - вероятность незатенения точки отражения относительно излучателя (6.6), а P_{BD} - вероятность того, что рассеянная в \vec{r}_S волна, пришедшая в точку наблюдения \vec{r}_2 под углом φ , будет освещать горизонтальный отрезок l , ориентированный под углом φ_0 к $(\vec{r}_2 - \vec{r}_1)$.

В итоге после всех усреднений получаем [2]

$$K(\vec{r}_2, \vec{r}'_2) = 16\pi \iiint_V P(\vec{r}_1, \vec{r}) \langle \sigma(\vec{r}_2, \vec{r}, \vec{r}_1) \rangle |G(\vec{r}, \vec{r}_1)|^2 |G(\vec{r}_2, \vec{r})|^2 P_{BD} \exp(ikl \cos(\varphi_0 - \varphi)) d^3\vec{r} \quad (6.29)$$

где интегрирование ведется по объему V слоя городской застройки высоты h . В (6.29) введен некий аналог дифференциального сечения рассеяния зданий

$$\langle \sigma(\vec{r}_2, \vec{r}, \vec{r}_1) \rangle = \frac{\gamma_0 \Gamma(\alpha/2)}{8} \left(\sin \frac{\alpha}{2} \right) \frac{kl_B}{1 + (kl_B)^2 (\sin \vartheta_2 - \sin \vartheta_1)^2}. \quad (6.30)$$

Таким образом, формулы (6.29), (6.30) полностью определяют функцию корреляции поля УКВ в городе в приближении однократного рассеяния. Они являются основой для дальнейшего анализа, направленного на исследование энергетических и корреляционных характеристик поля УКВ в городских условиях.

6.6 Средняя интенсивность поля над квазиплоским статистически однородным районом города (однократное рассеяние)

Вычислим среднюю интенсивность однократно отраженного поля, принимаемого на высоко поднятой базовой станции, когда мобильный передатчик расположен ниже крыш домов. Для этого в (6.29) нужно положить $l = 0$

$$I(\vec{r}_2) = 16\pi \iiint_V P(\vec{r}_1, \vec{r}) < \sigma(\vec{r}_2, \vec{r}, \vec{r}_1) > |G(\vec{r}, \vec{r}_1)|^2 |G(\vec{r}_2, \vec{r})|^2 P(\vec{r}, \vec{r}_2) d^3\vec{r}. \quad (6.31)$$

В рамках простейшего варианта модели статистически однородного городского района со зданиями одинаковой высоты h вероятность прямой видимости $P(\vec{r}_1, \vec{r})$ определяется формулой (6.5), а вероятность $P(\vec{r}, \vec{r}_2)$ вычисляется по формуле (6.6). При этом среднюю интенсивность рассеянного поля можно записать в виде

$$\begin{aligned} < I(\vec{r}_2) > = 2\pi\gamma_0 \iiint_V \exp\left(-\gamma_0\left(r + \tilde{r} \frac{h-z}{z_2-z}\right)\right) \Gamma\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin\frac{\alpha}{2} \times \\ \times \frac{kl_B}{1 + (kl_B)^2 (\sin\vartheta_2 - \sin\vartheta_1)^2} |G(\vec{r}, \vec{r}_1)|^2 |G(\vec{r}_2, \vec{r})|^2 dx dy dz \end{aligned} \quad (6.32)$$

где $r = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2}$, $\tilde{r} = \sqrt{(x_2-x)^2 + (y_2-y)^2}$, а интегрирование ведется по объему слоя городской застройки $x, y \in (-\infty, \infty)$, $z \in (0, h)$.

Перейдем в цилиндрическую систему координат (r, φ', z) :

$$x - x_1 = r \cos\varphi', \quad y - y_1 = r \sin\varphi'.$$

Практически наиболее актуальным является расчет для зоны неуверенного приема, где $\gamma_0 d \gg 1$ (d – горизонтальное расстояние между приемником и передатчиком). При этом основной вклад в интеграл дает область слоя над излучателем

$$r \leq \bar{\rho} \quad (h-z) < (z_2-h)/\gamma_0 \tilde{r},$$

для которой $\tilde{r} \approx |\vec{r}_2 - \vec{r}_1|$, $\gamma_0 \tilde{r} \gg 1$ и $\alpha \approx \varphi'$. За пределами этой области значение подынтегральной функции экспоненциально мало. Это означает, что влиянием границы $z = 0$ на функцию Грина $G(\vec{r}_2, \vec{r})$ можно в данном случае пренебречь (при $\frac{h}{z_2} d \gg \bar{\rho}$ поверхность земли практически затенена от приемника), и, учитывая условие $|\vec{r}_2 - \vec{r}_1| \gg \bar{\rho}, z_2, h$, считать

$$|G(\vec{r}_2, \vec{r})|^2 \approx \frac{1}{(4\pi)^2} \frac{1}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|^2}. \quad (6.33)$$

Для функции $|G(\vec{r}, \vec{r}_1)|^2$ можно, как и в (6.16), воспользоваться приближенным выражением Введенского

$$|G(\vec{r}, \vec{r}_1)|^2 \approx \frac{1}{(2\pi)^2 |\vec{r} - \vec{r}_1|^2} \sin^2 \frac{kzz_1}{|\vec{r} - \vec{r}_1|}. \quad (6.34)$$

Интегрирование по φ' приближенно (при почти фиксированном значении \tilde{r}) сводится к вычислению интеграла

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \Gamma\left(\frac{\varphi'}{2}\right) \sin \frac{\varphi'}{2} d\varphi',$$

который, если не определять конкретный вид функции $\Gamma(\varphi')$, можно рассматривать как некоторое среднее значение Γ .

В интеграле по переменной r определяющую роль играет функция $r \exp(-\gamma_0 r)$, имеющая довольно острый максимум при $r = \frac{1}{\gamma_0} = \bar{\rho}$. Большинство остальных функций под интегралом в выражении для $\langle I(\bar{r}_2) \rangle$ меняются гораздо медленнее. Что же касается выражения (6.34), то его в нашем случае можно приближенно представить в виде

$$|G(\bar{r}, \bar{r}_1)|^2 \approx \frac{1}{(2\pi)^2 |\bar{r} - \bar{r}_1|^2} \frac{1}{2} \left(1 - \cos\left(\frac{2kz z_1}{\sqrt{r^2 + h^2}}\right) \right). \quad (6.35)$$

Мы уже отмечали, что основной вклад дает область, где $z \approx h$. Поэтому при условии, что

$$2kz_1 h \gamma_0 \gg 1, \quad (6.36)$$

косинус в существенной области интегрирования быстро осциллирует при изменении r вблизи $\bar{\rho}$, и интегралом от него можно пренебречь. При выполнении неравенства, обратного (6.36), когда мобильный передатчик находится слишком близко к земле, принимаемая мощность очень мала. Возможность пренебречь интегралом от косинуса означает, что случайное рассеяние на зданиях прямой и отраженной от земли волн сглаживает при усреднении интерференционные замирания и дает аддитивный вклад в среднюю интенсивность. Это позволяет в дальнейшем при работе с выражением (6.31) не учитывать интерференцию прямой и отраженной от земли волн.

Интеграл по переменной z с учетом предыдущего упрощается

$$\int_0^h \exp\left(-\gamma_0 \bar{r} \frac{h-z}{z_2-z}\right) dz = \frac{z_2-h}{\gamma_0 \bar{r}} \quad (6.37)$$

при $\gamma_0 \bar{r} h \gg (z_2 - h)$.

Далее с учетом того, $(\sin \vartheta_2 - \sin \vartheta_1) \approx -(h - z_1) \gamma_0$ и $\gamma_0 h \ll 1$, после окончательного интегрирования по r с учетом отмеченных свойств подынтегральных функций (интеграл от «острой» функции

$\int_0^\infty r \exp(-\gamma_0 r) dr = \frac{1}{\gamma_0^2}$, плавные функции выносятся из-под интеграла при

$r = \frac{1}{\gamma_0} = \bar{\rho}$) можно получить [2]

$$\langle I(\bar{r}_2) \rangle = \frac{\Gamma}{32\pi} \frac{\lambda l_B}{\lambda^2 + [2\pi l_B \gamma_0 (h - z_1)]^2} \frac{z_2 - h}{d^3} \quad (6.38)$$

где $d = |\bar{r}_2 - \bar{r}_1|$.

Полная средняя интенсивность, принимаемая поднятой над городской застройкой базовой станцией, складывается в нашей модели из

интенсивности однократно отраженных от стен волн (6.38) и интенсивности когерентной волны (6.16), приходящей непосредственно от излучателя.

6.7. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными

Интересно сравнить найденную теоретически среднюю интенсивность с экспериментальными данными Окамуры. В экспериментальных исследованиях высота антенны центральной станции изменялась от 45 до 820 м, подвижная станция размещалась в автомашине и имела ненаправленную антенну на высоте 3 м над земной поверхностью.

Регистрировались медианные значения напряженности поля на дальностях от 1 до 100 км. В указанных условиях с результатами эксперимента нужно сопоставить среднее значение интенсивности рассеянных волн $\langle I \rangle$, определяемое (6.38) без учета $\langle I_k \rangle$. Действительно, если принять $h=30$ м и $\gamma_0=10$ км⁻¹, то вероятность $P(\bar{r}_2, \bar{r}_1)$ приема сигнала непосредственно от излучателя для $z_1=3$ м и $45 < z_2 < 200$ м окажется уже на расстоянии 1 км слишком малой, чтобы повлиять на медианные значения.

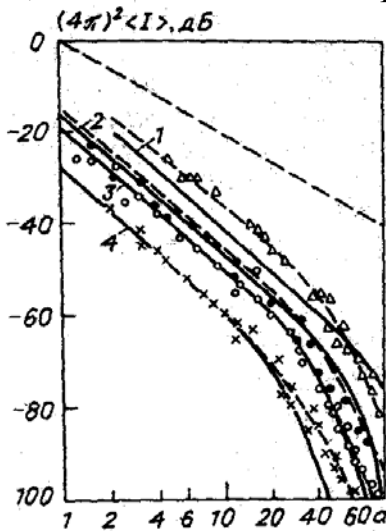


Рис 6.6

Измерения показали, что при увеличении дальности до 15 км мощность сигнала убывает как d^{-3} [3,4]. Последующее увеличение дальности приводит к более быстрому уменьшению уровня сигнала. Теоретическая формула (6.38) для $\langle I \rangle$ также определяет зависимость d^{-3} для дальностей меньше дальности радиогоризонта d_R . На больших расстояниях приходится учитывать сферичность Земли. Это можно сделать добавлением в (7.48) множителя, рассчитанного по дифракционной теории Фока [2] и обеспечивающего более быстрый спад уровня сигнала в области геометрической тени Земли ($d > d_R$). На Рис.6.6 штриховыми линиями представлены зависимости медианного значения мощности сигнала от расстояния, построенные Окамурой для частоты 453 МГц при $z_1=3$ м и $z_2=820, 220, 140, 45$ м. Мощность сигнала в городе отнесена к мощности в свободном пространстве, измеренной на расстоянии 1 км от излучателя. Здесь же нанесены условными знаками полученные им в ходе измерений медианные значения напряженности поля. Для сравнения верхней штриховой линией показан уровень сигнала в свободном пространстве. Расчетные зависимости величины $(4\pi)^2 \langle I \rangle$ от дальности показаны сплошными линиями 1-4. Значения $\Gamma=0,1$ и $l_B=1$ м выбраны из тех соображений, чтобы обеспечить совмещение кривых 4 на дальности 1 км, вместе с тем эти значения не противоречат представлениям о свойствах реальных отражающих поверхностей городских строений. Расчетные кривые 2-4 практически

совпали с построенными Окамурай во всем диапазоне дальностей от 1 до 100км. Расхождение расчетных и измеренных значений становится заметным лишь при $z_2=820\text{м}$, достигая 4дБ (кривая 1). Это естественно, поскольку расчеты проведены в малоугловом приближении, а значение $z_2=820\text{м}$ этим условиям уже не удовлетворяет. Тем не менее, и в этом случае характер зависимости ослабления от дальности между излучателем и приемным пунктом определяется теоретическим выражением правильно. Резкий излом кривой 3 при $d=40\text{км}$ объясняется уходом за радиогоризонт (для $z_2=140\text{м}$ $d_R=40\text{км}$). Такое же хорошее согласие теории и эксперимента имеет место и на частоте 1920МГц [2].

Как отмечалось выше, затухание сигнала в городе возрастает с увеличением его частоты по степенному закону. Причем с увеличением частоты от 100 до 2000МГц показатель степени n меняется от 0,2 до 1, оставаясь величиной слабо зависящей от расстояния в диапазоне от 1 до 10км. При дальнейшем увеличении расстояния n начинает зависеть от него и растет значительно быстрее. Результаты теоретического расчета $\langle I \rangle$ дают объяснение этому экспериментально установленному факту. Действительно, пока Землю можно считать плоской, т.е. для расстояний около 10-20км, зависимость средней интенсивности от длины волны λ определяется множителем

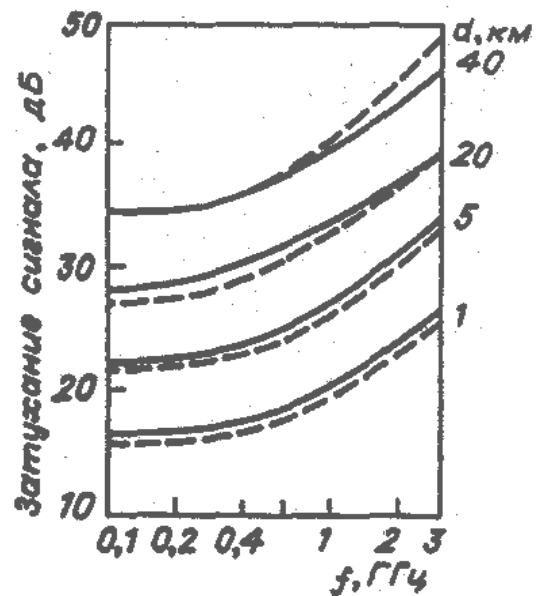
$$\frac{\lambda}{\lambda^2 + [2\pi l_B \gamma_0 (h - z_1)]^2},$$

и меняется от λ^{-1} в нижней части УКВ диапазона до λ на высоких частотах с переходом через λ^0 в окрестности 100МГц. Для дальностей, больших 10-20км, добавляется дифракционный множитель ослабления, который и дает более быстрое уменьшение уровня сигнала с увеличением частоты на больших расстояниях.

Физическое объяснение зависимости средней рассеянной мощности от частоты в пределах радиогоризонта состоит в том, что, хотя в рассматриваемой модели затенения рассчитываются чисто геометрически, дифракция волн все-таки проявляется при рассеянии на поверхностях зданий со случайным распределением

Рис. 6.7

коэффициента отражения. Для более коротких волн диаграмма рассеяния имеет меньшую ширину, и рассеянному излучению труднее попасть в



низко расположенный приемник после частично диффузного отражения от верхних слабоэтаженных от передатчика участков стен городских зданий.

На Рис.6.7 представлены графики зависимости затухания сигнала относительно свободного пространства от частоты для $z_1=3\text{м}$, $z_2=220\text{м}$ на дальностях 1,5,20 и 40км. Расчетным значениям соответствуют сплошные линии, измеренным Окамурой медианным значениям - штриховые.

Высота антенны базовой станции z_2 в расчетную формулу (6.38) входит в множитель $(z_2 - h)$, который описывает ее влияние на дальностях в пределах радиогоризонта. Кроме того, от высоты антенны центральной станции зависит дифракционный множитель ослабления. Зависимость от z_2 можно проследить по кривым на Рис.6.6. Для дальностей, меньших d_R (дальность радиогоризонта d_R в зависимости от высоты z_2 приведена на Рис 6.8),

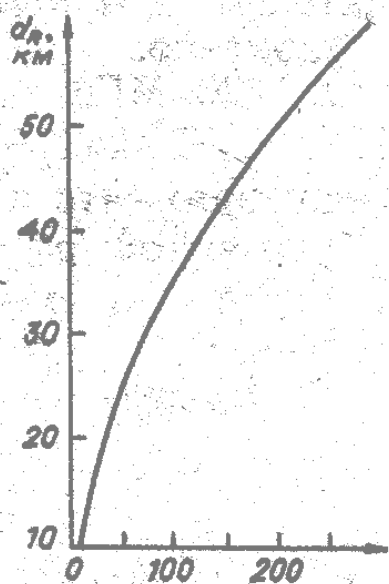


Рис.6.8

высота z_2 не влияет на скорость уменьшения средней интенсивности поля с расстоянием. Однако, подъем антенны центральной станции приводит к уменьшению затухания сигнала по сравнению с затуханием в свободном пространстве. Так, при изменении z_2 от 45 до 220 м уменьшение затухания составляет 11 дБ. При $d > d_R$ зависимость средней интенсивности от z_2 становится существенно иной. Теперь от z_2 зависит как сама средняя интенсивность, так и скорость ее изменения с расстоянием. Такой характер зависимости обусловлен дифракционным ослабляющим множителем, который начинает давать

вклад только при дальностях, превышающих дальность радиогоризонта.

Выражение (6.38) позволяет проанализировать также влияние высоты антенны низко расположенного мобильного пункта [2]. Как видно, результаты расчета дают зависимость средней интенсивности рассеянного поля от высоты z_1 мобильного пункта в виде множителя

$$\frac{1}{\left\{ \lambda^2 + [2\pi l_B \gamma_0 (h - z_1)]^2 \right\}}$$

параметрами которого являются как длина волны λ , так и характеристики застройки γ_0 , h и l_B . Отметим, что поскольку дальность не является параметром, вид зависимости средней интенсивности от z_1 сохраняется во всем диапазоне рассматриваемых дальностей. Влияние высоты z_1 на $\langle I \rangle$ существенным образом зависит от диапазона частот, в котором исследуется эта зависимость.

В книге [3] отмечается интересный эффект, заключающийся в том, что для небольших городов с увеличением z_1 , большое усиление сигнала наблюдается для более коротких длин волн. Для крупных городов усиление незначительное и практически не зависит от длины волны.

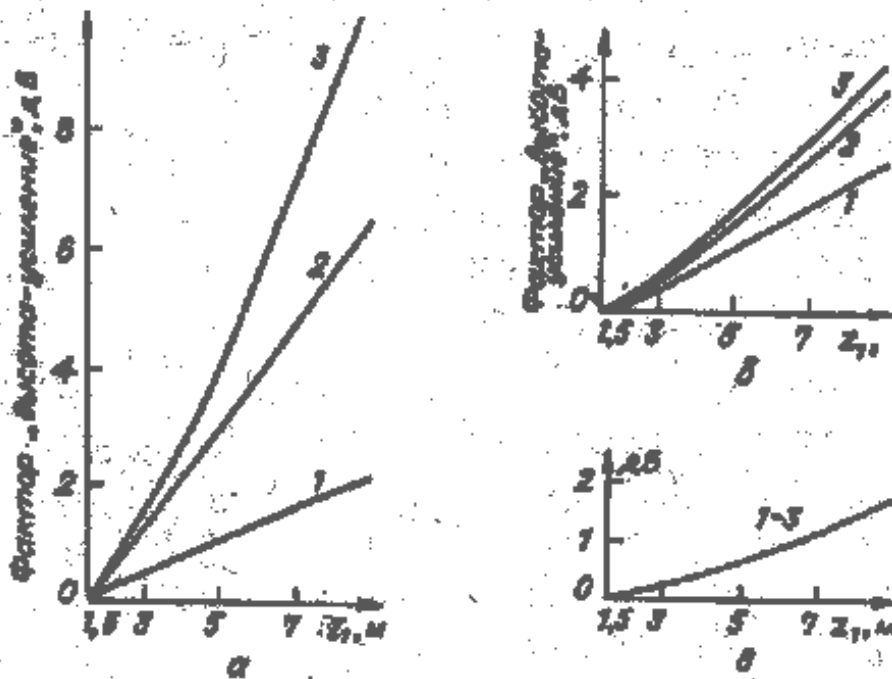


Рис. 6.9

На Рис.6.9 приведены расчетные кривые для $\langle I \rangle$ в зависимости от высоты z_1 , (фактор "высота-усиление") для частот 400, 1000 и 2000 МГц (кривые 1, 2 и 3 соответственно) и различных типов городов. За ноль децибел взято значение средней интенсивности при $z_1 = 1,5$ м. Значения параметров равны: $l_B = 1$ м и $\gamma_0 = 10 \text{ км}^{-1}$. Для небольших городов ($h = 10$ м, рис. 6.9а) усиление на частоте 2000 МГц для симметричной антенны (т.е. находящейся на высоте 7 м от земли) составляет 7 дБ, а на частоте 400 МГц только около 2 дБ. Для средних городов ($h = 20$ м, рис. 6.9б) усиление составляет соответственно 3 и 2 дБ, а для крупных городов ($h = 40$ м, рис. 6.9в) усиление для той же антенны одинаково в диапазоне частот от 400 до 2000 МГц и составляет около децибела.

Таким образом, расчет поля УКВ над городской застройкой в приближении однократного рассеяния с учетом затенений позволяет получить для средней интенсивности результаты, согласующиеся с экспериментом по характеру зависимости от дальности, высот расположения антенн и частоты.

Список литературы к лекциям 3,4

1. Туляков Ю.М. Системы персонального радиовызова. М.: Радио и связь, 1988. – 168 с.
2. Пономарев Г.А., Куликов А.М., Тельпуховский Е.Д. Распространение УКВ в городе.-Томск: МП «Раско». 1991.
3. Связь с подвижными объектами в диапазоне СВЧ / Под ред. У.К. Джейкса. М.: Связь. 1979. – 520с.
4. Okumura J. et.al. Field strength and its variability in VHF and UHF land mobile radio service. Rev. ins. Elec. Eng., 1968, v.16, no. 9-10, pp. 825-873.
5. Пономарев Л.И., Манкевич Т.Л. Моделирование радиотрасс мобильных систем связи. Успехи современной радиоэлектроники, 1999, № 8, с. 45-58.
6. Nata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio service. IEEE Trans. Veh. Technol., 1980, v. VT-29, no. 3, pp. 317-325.
7. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 1. М.: Наука. 1976. 496 с.
8. Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука. 1972. 424 с.
9. Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. М.: АН СССР. 1961. – 546 с.