

УДК 537.874

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОСЛАБЛЕНИЯ СИГНАЛОВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОВОЛН ИЗ ЗДАНИЯ НА УЛИЦУ

А. Н. Катруша

Военно-учебный научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

Статья получена 29 августа 2014 г.

Аннотация. На основе равномерной геометрической теории дифракции разработана методика расчета уровней ослабления сигналов при распространении радиоволн из здания на улицу; выполнен сравнительный анализ результатов расчетов и экспериментов; выявлены основные закономерности ослабления сигналов при типовых вариантах размещения передающей и приемной антенн.

Ключевые слова: распространение радиоволн, геометрическая теория дифракции, коэффициент ослабления.

Abstract. On the basis of uniform geometrical theory of diffraction the method for calculation of levels of attenuation of signals in the propagation of radio waves from the building to the street is developed; a comparative analysis of the results of calculations and experiments is made; the General regularities of the attenuation of signals during typical variants of placement of receiving and transmitting antennas were revealed.

Keywords: propagation of radio waves, geometric theory of diffraction, the attenuation coefficient.

Введение

В настоящее время разработано достаточно много моделей распространения радиоволн и методик расчета уровней ослабления сигналов в условиях городской застройки. Как правило, такие модели можно разделить на три типа:

модели распространения радиоволн в городских кварталах, модели распространения радиоволн внутри зданий и модели распространения радиоволн из здания и внутрь здания. При этом модели распространения радиоволн из здания и внутрь здания могут применяться как в виде самостоятельного аппарата прогнозирования, так и в виде связующего звена между моделями распространения в городе (вне зданий) и моделями распространения внутри здания.

На практике широкое применение нашли статистические модели распространения радиоволн из здания на улицу [1-3], полученные на основе обработки результатов экспериментальных исследований. Следует отметить, что указанные модели разрабатывались для определенных частотных диапазонов, используемых в различных мобильных системах связи общего пользования и беспроводных сетях передачи данных. Базовой моделью является COST 231 [1] для диапазона частот 900 – 1800 МГц. Модель WINNER II [2] построена на основе модели COST 231 и охватывает диапазон более высоких частот 2 - 6 ГГц. Модель, предложенная в работе [3], позволяет учитывать дифракционные компоненты радиоволн, распространяющиеся через двери и окна, при этом полученные на основе экспериментов формулы справедливы только для частоты 8,45 ГГц.

Вместе с тем представляет интерес исследование ослабления радиоволн на трассе распространения из здания на улицу на частотах ниже 900 МГц. На практике результаты таких исследований могут использоваться при организации и подавлении профессиональной радиосвязи, оценке уровней побочных электромагнитных излучений офисной техники, оценке влияния мощных сверхкоротких импульсов на функционирование радиоэлектронной аппаратуры.

Следует отметить, что статистические модели не позволяют в полной мере учесть особенности трасс распространения радиоволн. В связи с этим в некоторых случаях могут использоваться детерминированные модели [4-10]. Такие модели весьма трудоемки в плане построения трасс распространения ра-

диоволн и проведения расчетов и требуют множество исходных данных, которые не всегда известны. Однако преимущество детерминированных моделей заключается в возможности анализа с их использованием закономерностей распространения радиоволн для типовых трасс и различных диапазонов частот, что может использоваться в дальнейшем при корректировке статистических моделей.

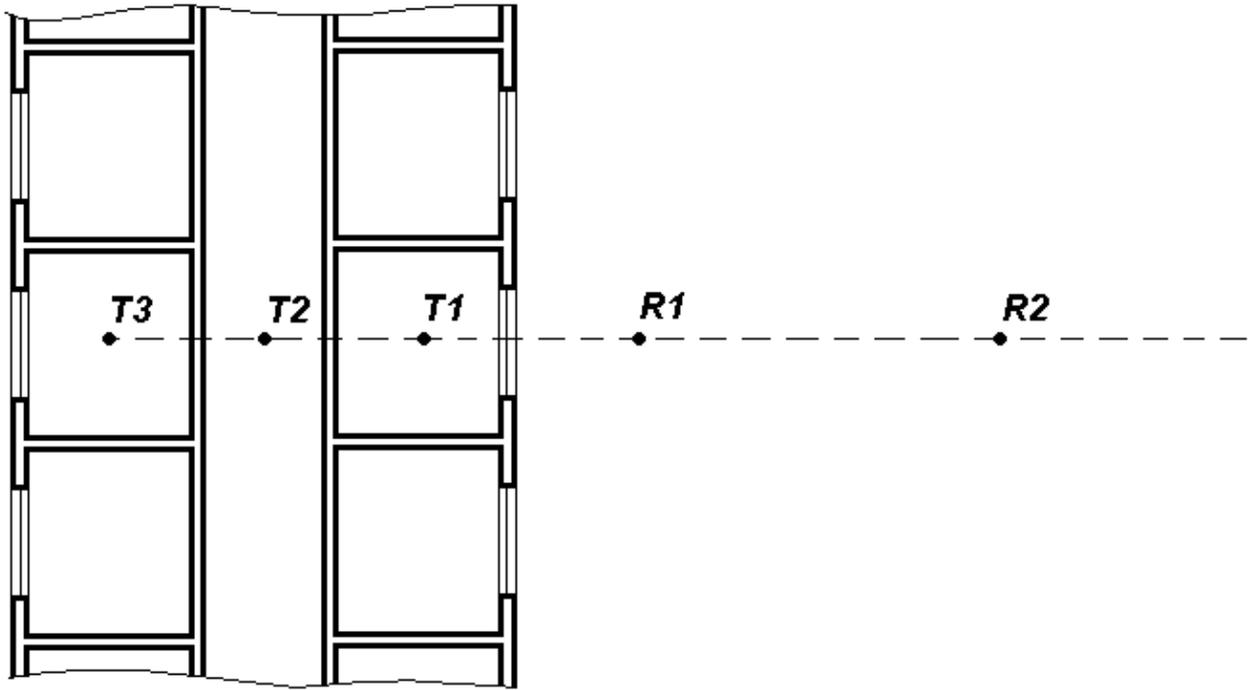
В статье представлены разработанная детерминированная модель распространения радиоволн из многоэтажного здания на улицу для типовых вариантов размещения передающей антенны внутри здания и приемной антенны вблизи поверхности земли, методика расчета ослабления сигналов на трассе распространения, а также результаты исследования особенностей распространения радиоволн из здания на улицу в диапазоне частот 100 МГц – 2 ГГц.

Основные положения методики расчета ослабления сигналов на трассе распространения из здания на улицу.

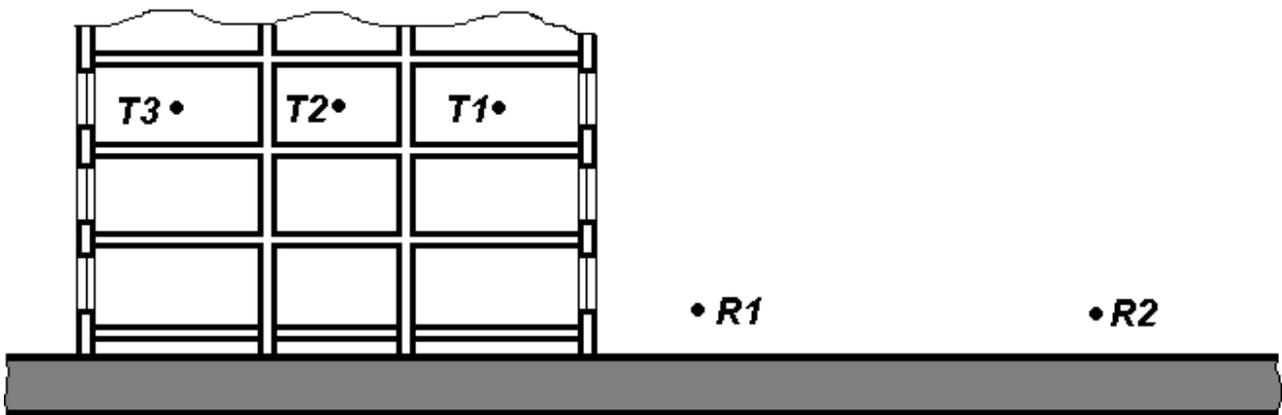
Рассмотрим многоэтажное здание офисного типа в виде периодической структуры с ячейками из помещений и коридоров (рис. 1). В общем случае предполагаем, что помещения на каждом этаже имеют одинаковые размеры и соединены общим коридором. Приемная антенна может размещаться на различных удалениях от здания, например, в точках R1 и R2. Передающая антенна может размещаться в ближайшей к приемной антенне комнате (точка T1), в коридоре (точка T2) и в удаленной комнате (точка T3).

Для выявления наиболее общих закономерностей полагаем, что проекция линии, соединяющей точки T и R, на горизонтальную плоскость нормальна фронтальной стене здания (рис. 1а). Кроме того предполагается, что в комнатах здания отсутствует мебель.

В качестве передающей и приемной антенны рассмотрим дипольную антенну, удовлетворяющую условию $l \ll \lambda$, где l - длина антенны, λ - длина волны.



а) вид сверху



б) вид сбоку

Рис. 1. Схема многоэтажного здания и точек размещения передающей и приемной антенн

Для расчета напряженности поля целесообразно использовать геометрическую теорию дифракции, отличающуюся простой математической записью выражений для коэффициентов дифракции и достаточно высокой точностью расчетов при размещении точки приема в зоне тени.

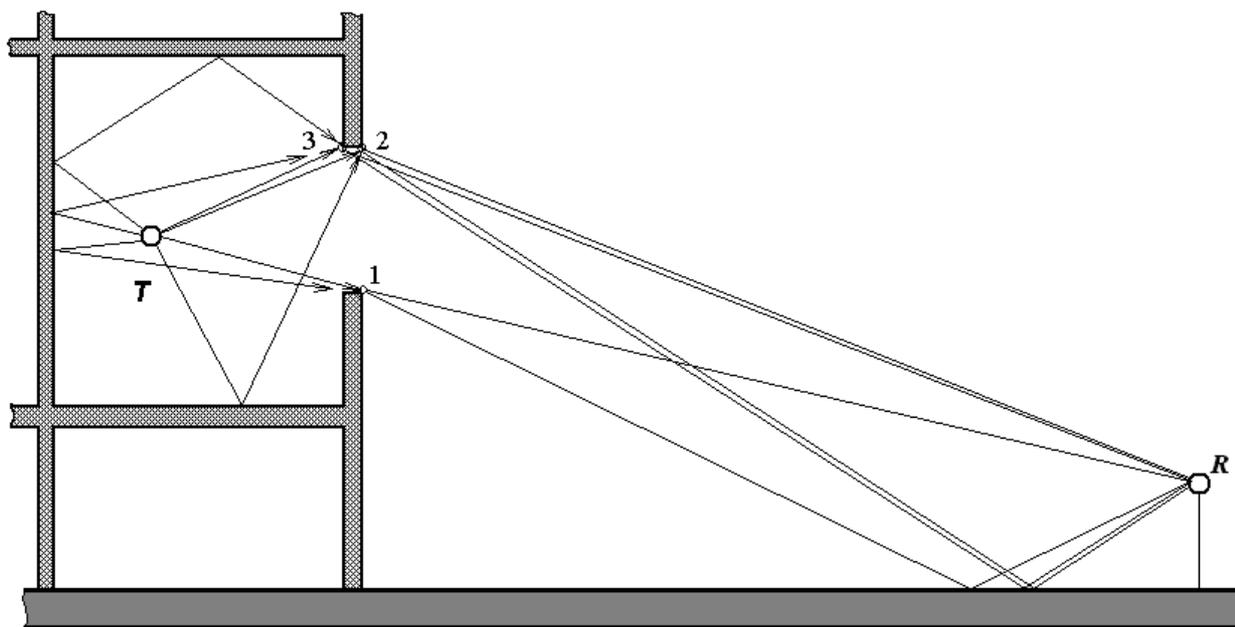
В качестве примера рассмотрим лучевую структуру поля для типовой ситуации размещения передающей антенны в комнате на первом этаже здания и приемной антенны – вблизи земли на некотором удалении от здания (рис. 2).

Для упрощения анализа предлагаемой модели распространения радиоволн все множество лучей в точке приема выделим в две группы.

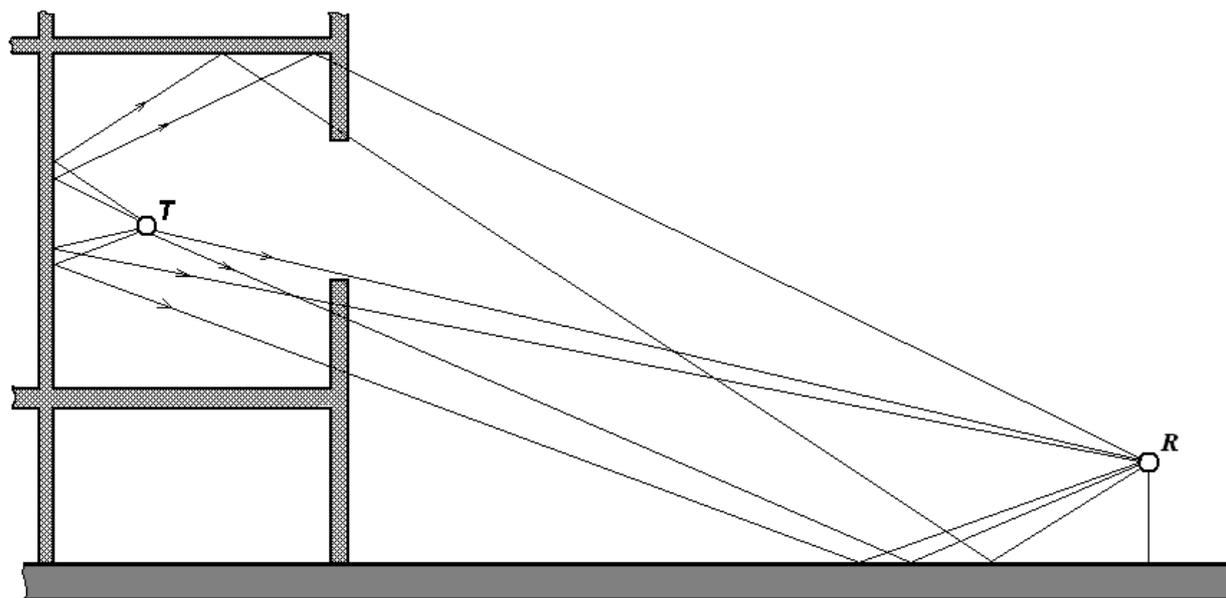
Первая группа лучей образует дифракционную компоненту поля (рис. 2а). Для рассматриваемой трассы распространения радиоволн эту группу образуют дифракционные лучи на вертикальных и горизонтальных краях оконного проема (на рис. 2а цифрами 1-3 обозначены горизонтальные края оконного проема, освещенные первичным падающим полем). Кроме того, учитывается многократное отражение лучей от стен, пола и потолка комнаты.

Вторая группа лучей образует сквозную компоненту и представляет собой лучи, проходящие через окно, стены и межэтажные перекрытия, а также сквозные лучи многократно переотразившиеся внутри комнаты (рис. 2б).

Кроме того, в каждой группе учитывается как прямой луч, так и луч, отраженный от земной поверхности.



a)



б)

Рис. 2. Схема лучей дифракционной (а) и сквозной (б) компонент волны (вид сбоку)

При размещении передающей антенны на n -ом этаже дополнительный вклад в результирующий сигнал будут вносить волны дифракции на оконных проемах более низких этажей (рис. 3). Однако проведенные дополнительные расчеты показали, что вклад волн дифракции на более низких этажах существенно меньше вклада волн дифракции на оконном проеме этажа размещения передающей антенны вследствие существенного ослабления радиоволн межэтажными перекрытиями.

Следует отметить, что экспериментальные исследования прохождения радиоволн через стеклопакет [11, 12] показали, что на частотах до 3 ГГц стеклопакет практически не влияет на уровень принимаемого сигнала. В связи с этим в предлагаемой модели наличие оконного стекла на трассе распространения не учитывается.

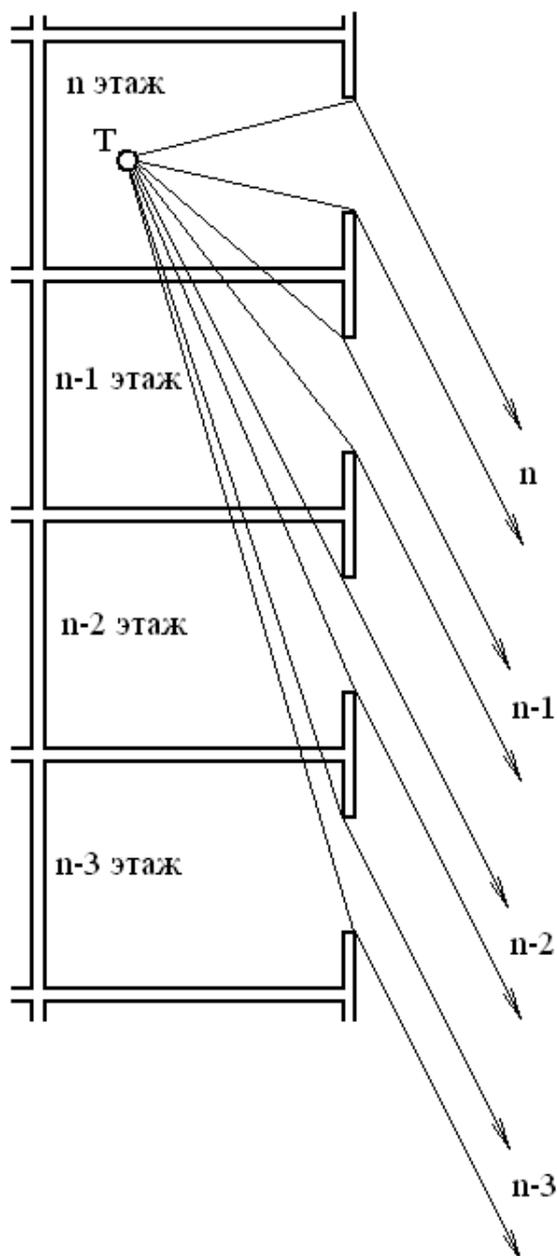


Рис. 3 Схема лучей дифракции на оконных проемах комнат различных этажей здания

Общая электродвижущая сила (ЭДС), наведенная в приемной антенне многолучевым полем, будет определяться суммой:

$$\xi_A = \sum_{i=1}^N \xi_i,$$

где $\xi_i = E_i l_d(\theta_i, \varphi_i)$ – ЭДС, наведенная полем i -го луча; E_i – напряжённость поля i -го луча в точке приёма; θ_i, φ_i – угол места и азимут прихода луча;

$l_d(\theta_i, \varphi_i) = l_d(\theta_i) = l \cos(\theta_i)$ – действующая длина дипольной антенны.

Напряжённость поля сквозной через препятствие волны можно записать в виде:

$$E_N = E_0 W A_N e^{-iks}$$

где E_0 – напряжённость поля падающей волны, A_N – коэффициент, зависящий от геометрии трассы; W – коэффициент прозрачности препятствия; k – постоянная распространения в воздухе; s – расстояние от точки выхода волны из стены до точки приема.

Коэффициент прозрачности может быть рассчитан как с учетом переотражений волны внутри слоя, так и приближенно через коэффициенты прохождения волны из воздуха в стену и из стены в воздух.

В первом случае коэффициент прозрачности равен [13]:

$$W = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2 e^{ik_2 h} - (Z_1 - Z_2)^2 e^{-ik_2 h}}$$

где $Z_{1,2}$ – импеданс воздуха и стены соответственно; k_2 – постоянная распространения в стене; h – толщина стены.

Во втором случае приближенное выражение для коэффициента прозрачности имеет вид [14]:

$$W = T_{1-2} T_{2-1} e^{-ik_2 h_1}$$

где $T_{1-2, 2-1}$ – коэффициент прохождения из воздуха в стену и из стены в воздух; h_1 – расстояние, проходимое волной в стене.

Напряжённость поля отраженной от препятствия волны равна:

$$E_R = E_0 R A_R e^{-iks}$$

где A_R – коэффициент, зависящий от геометрии трассы; R – коэффициент отражения Френеля; s – расстояние между точкой отражения и точкой приёма.

Выражение для напряженности поля дифракционной волны имеет вид:

$$E_D = E_0 D A_D e^{-iks}$$

где A_D - коэффициент, зависящий от геометрии трассы, D - коэффициент дифракции; s – расстояние между точкой дифракции и точкой приёма.

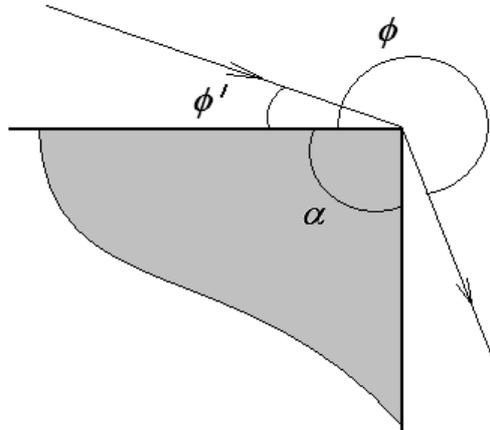


Рис. 4. Геометрия задачи дифракции на диэлектрическом клине

При нахождении коэффициента дифракции воспользуемся решением задачи дифракции плоской волны на диэлектрическом клине [15].

$$D = D_1 + D_2 + R(\psi)(D_3 + D_4),$$

$$D_1 = -\frac{e^{-j(\pi/4)}}{2n\sqrt{2\pi k}} \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi + (\phi - \phi')}{2n} \right) \times F(kLa^+(\phi - \phi')),$$

$$D_2 = -\frac{e^{-j(\pi/4)}}{2n\sqrt{2\pi k}} \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi - (\phi - \phi')}{2n} \right) \times F(kLa^-(\phi - \phi')),$$

$$D_3 = -\frac{e^{-j(\pi/4)}}{2n\sqrt{2\pi k}} \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi + (\phi + \phi')}{2n} \right) \times F(kLa^+(\phi + \phi')),$$

$$D_4 = -\frac{e^{-j(\pi/4)}}{2n\sqrt{2\pi k}} \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi - (\phi + \phi')}{2n} \right) \times F(kLa^-(\phi + \phi')),$$

$$F(x) = 2j\sqrt{x} \int_{\sqrt{x}}^{\infty} e^{-ju} du \text{ для } x > 0,$$

$$F(x) = F^*(|x|) \text{ для } x < 0,$$

$$a^{\pm}(\phi, \phi') = 2 \cos^2 \left(\frac{2\pi n N^{\pm} - (\phi \pm \phi')}{2} \right),$$

ϕ и ϕ' - угол дифракции и падения волны соответственно,

N^{\pm} - целое число, максимально удовлетворяющее двум уравнениям

$$2\pi n N^{+} - (\phi \pm \phi') = \pi,$$

$$2\pi n N^{-} - (\phi \pm \phi') = -\pi,$$

$$n = \frac{2\pi - \alpha}{\pi}, \quad \alpha - \text{внутренний угол клина};$$

$R(\psi)$ - коэффициент отражения, $\psi = \psi(\phi)$ - угол между нормалью к грани клина и направлением дифракционного луча;

$$\psi(\phi) = 0,5\pi - n\pi + \phi, \quad \text{при } 0,75\pi \leq \phi < n\pi,$$

$$\psi(\phi) = 0,5\pi - \phi, \quad \text{при } 0 < \phi < 0,75\pi.$$

Результаты расчетов и их анализ.

Для проверки достоверности разработанной методики проведены сравнения результатов расчетов с результатами экспериментов, полученными в работе [17]. Параметры трассы распространения приняты аналогичными представленным в [17]:

- толщина фронтальной стены здания равна 0,4 м;
- передающая антенна размещается на удалении 3 м от окна на высоте 1 м над полом;
- высота подоконника – 1 м;
- пол первого этажа находится на высоте 1 м над землей;
- приемная антенна размещается на удалении 2 м и 14 м от здания на высоте 1 м над землей.

Необходимо отметить, что весьма важным является определение комплексной диэлектрической проницаемости стен и межэтажных перекрытий

$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$, оказывающей существенное влияние на поглощение радиоволн в материале препятствия.

Наиболее достоверные результаты оценки поглощения радиоволн в различных материалах могут быть получены на основе экспериментальных исследований. Анализ параметров влажной и сухой кирпичной стены (песка) [14, 16], показывает, что в рассматриваемом диапазоне частот вещественная часть диэлектрической проницаемости практически не зависит от частоты и может быть принята равной $\varepsilon' = 5$.

На рис. 5 приведены обобщенные результаты измерений удельного затухания радиоволн в сухой и влажной кирпичной стене (песке). Сплошные кривые построены по данным [14], штриховые – по данным [16].

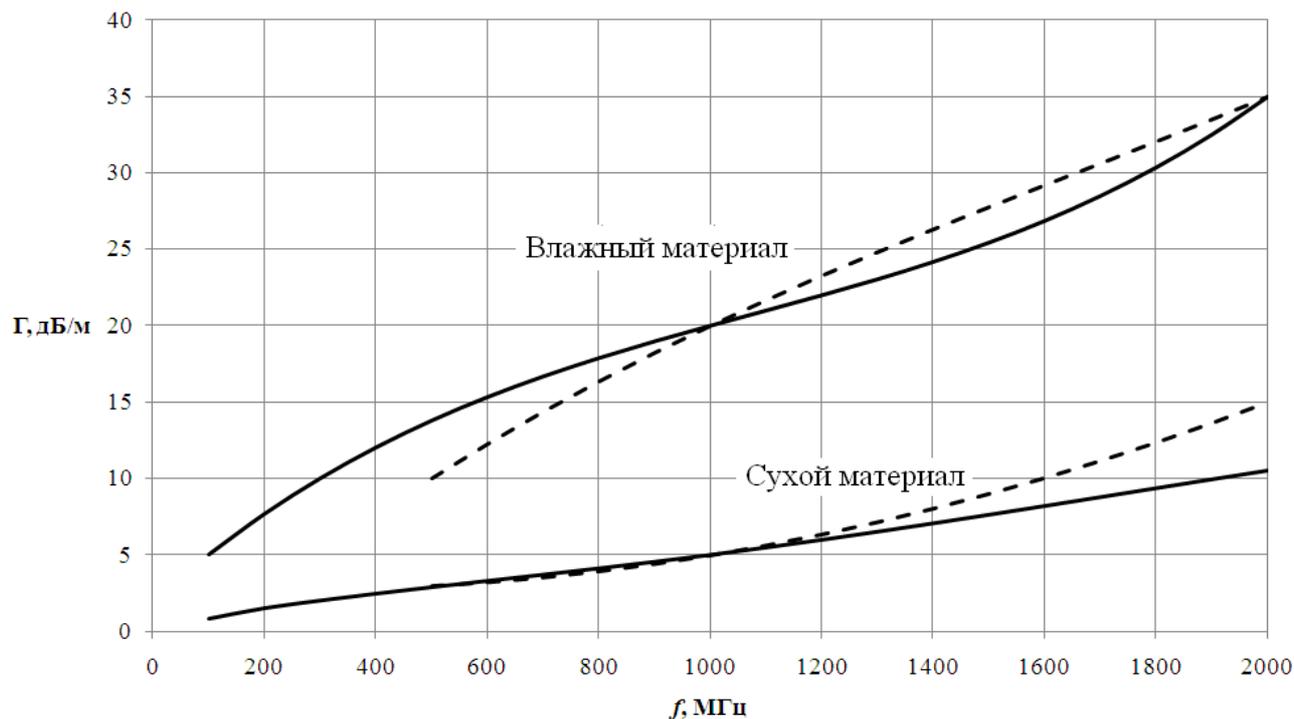


Рис. 5. Частотная зависимость удельного затухания в сухом и влажном материале

На основе известного удельного затухания рассчитаны частотные зависимости мнимой части диэлектрической проницаемости (рис. 6) и проводимости (рис. 7).

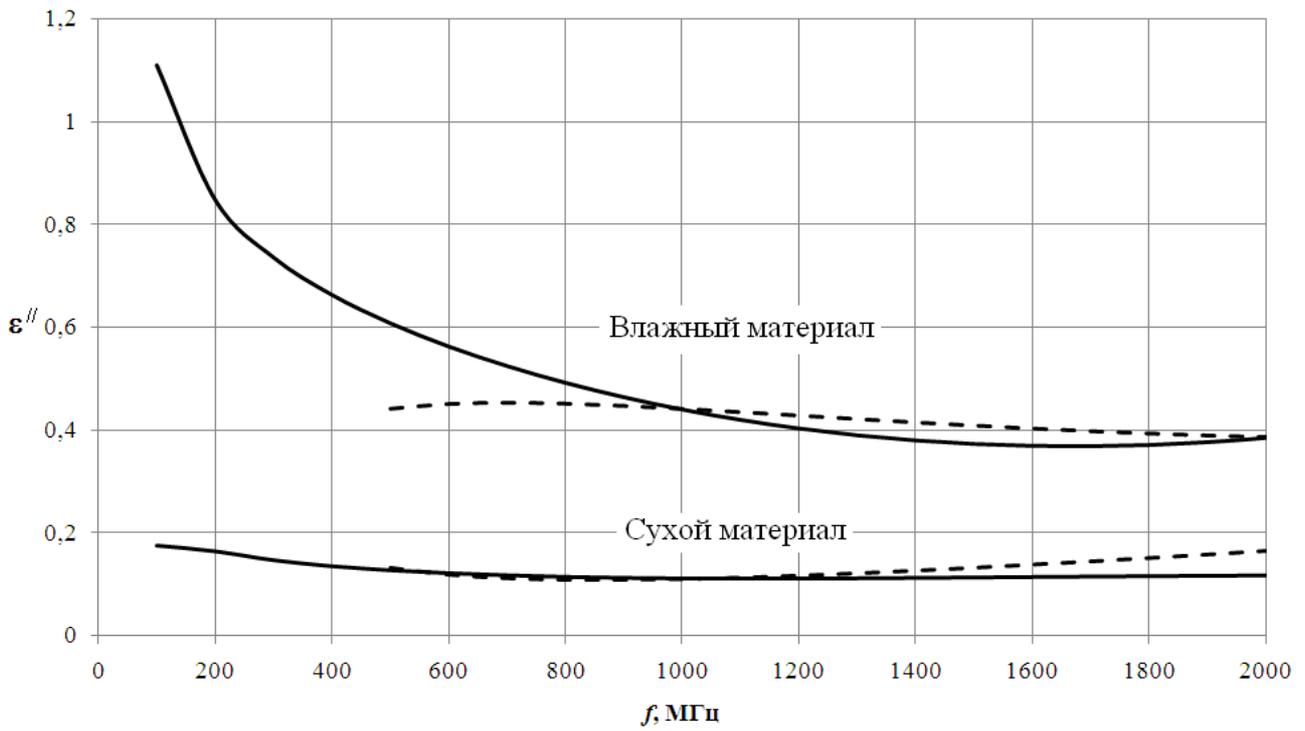


Рис. 6. Частотная зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости для сухого и влажного материала

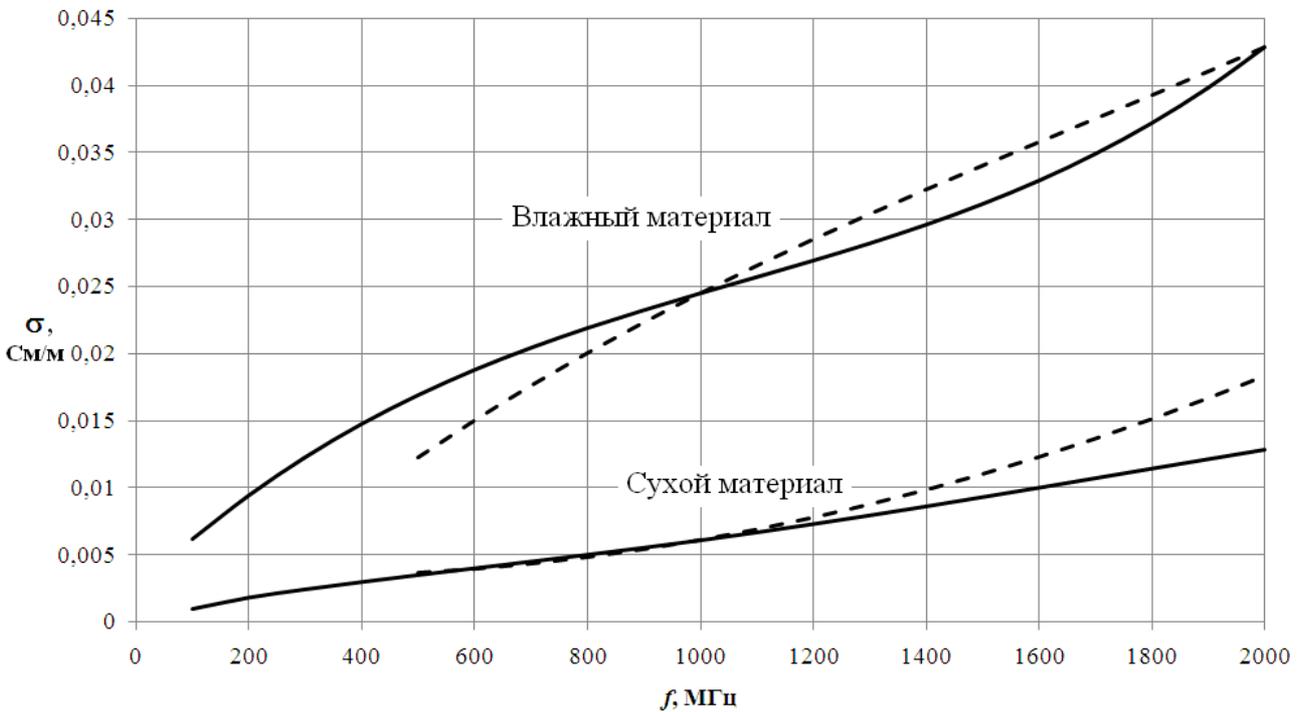


Рис. 7. Частотная зависимость проводимости для сухого и влажного материала

Диэлектрическая проницаемость межэтажных перекрытий может быть принята равной диэлектрической проницаемости внешней кирпичной стены.

На основе предлагаемой методики рассчитывался уровень сигнала в точке наблюдения относительно уровня сигнала в опорной точке, расположенной на удалении 1 м от передающей антенны (ослабление сигнала относительно сигнала в опорной точке):

$$K(f) = \frac{\xi_A(f)}{\xi_{A0}(f)},$$

где $\xi_A(f)$ - ЭДС в точке наблюдения; $\xi_{A0}(f)$ - ЭДС в опорной точке.

Для сравнения также были проведены расчеты относительного уровня сигнала (ослабления сигнала) K на основе модели COST 231:

$$K[\text{дБ}] = L_0[\text{дБ}] - L[\text{дБ}]$$

где L - потери на трассе распространения из здания на улицу; L_0 - потери в опорной точке на расстоянии 1 м от передающей антенны.

Согласно [1] L рассчитывается по формуле:

$$L[\text{дБ}] = 32,4 + 20\log(f) + 20\log(S + d) + W_e + WG_e \left(1 - \frac{D}{S}\right)^2 + \max(\Gamma_1, \Gamma_2)$$

где S , D , d [м] – расстояния, определяемые из геометрии задачи (рис. 8), f [ГГц] – частота сигнала; W_e - потери во внешней стене здания при нормальном падении волны на стену ($S = D$); WG_e - дополнительные потери при $D = 0$.

$\Gamma_1 = W_i p$; $\Gamma_2 = \alpha(d - 2)(1 - D/S)^2$; W_i - потери во внутренней стене здания; p - количество внутренних стен, пересекаемых линией d ; α - затухание внутри здания.

На основании анализа результатов многочисленных измерений в [1] предлагаются следующие значения указанных параметров:

$$W_e = 4..10 \text{ дБ (среднее значение при стандартном окне – 7 дБ);}$$

$$W_i = 4..10 \text{ дБ (среднее значение 7 дБ);}$$

$$WG_e = 20 \text{ дБ;}$$

$$\alpha = 0,6 \text{ дБ/м.}$$

Поскольку опорная точка находится достаточно близко к передающей антенне, потери L_0 могут быть определены по формуле для свободного пространства [1]:

$$L_0[\text{дБ}] = 32,4 + 20\log(f[\text{ГГц}]) + 20\log(r[\text{м}])$$

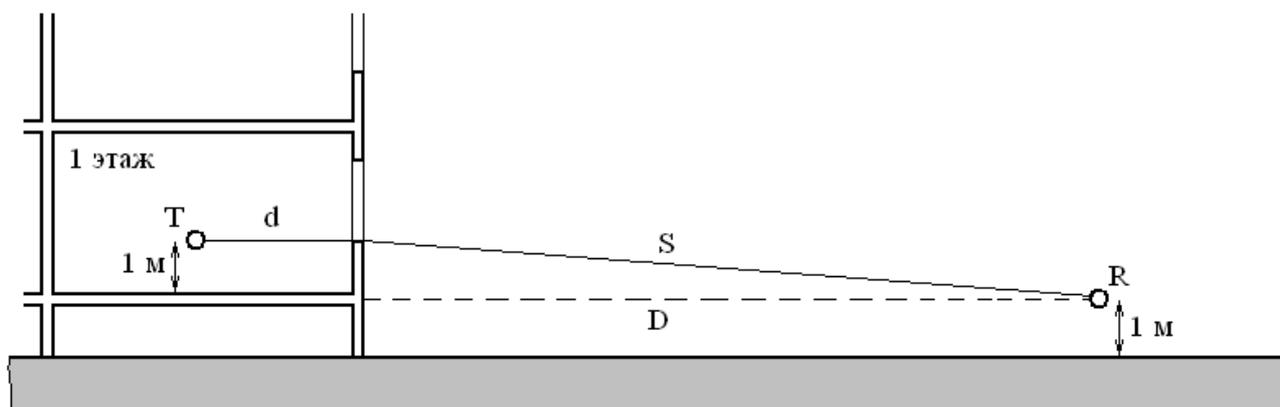


Рис. 8. Геометрия трассы распространения радиоволн с первого этажа здания

На рис. 9, 10 представлены значения ослабления сигналов при удалении приемной антенны на расстояние 2 м (рис.9) и 14 м (рис.10) от здания, рассчитанные по предлагаемой методике (сплошная кривая), по методике COST (штриховая линия) и полученные экспериментально в работе [17] (точки).

Анализ рис. 9, 10 показывает достаточно хорошее согласование результатов экспериментов и расчетов по предлагаемой методике. Экспериментальные данные имеют несколько больший разброс, что объясняется принятым в модели упрощением трассы распространения. В частности предполагается, что в комнатах отсутствует мебель. Однако при проведении измерений в работе [17] в комнатах кроме мебели находилась офисная техника. Модель COST 231 в целом позволяет определить средний уровень ослабления в условии отсутствия прямой видимости при размещении приемной антенны на расстоянии 2 м от здания. При удалении приемной антенны на расстояние 14 м от здания трасса распространения приближается к открытому типу. В этом случае модель COST 231 занижает средний уровень сигнала на значение порядка 8 дБ в диапазоне частот 900 МГц – 1400 МГц (рис. 10).

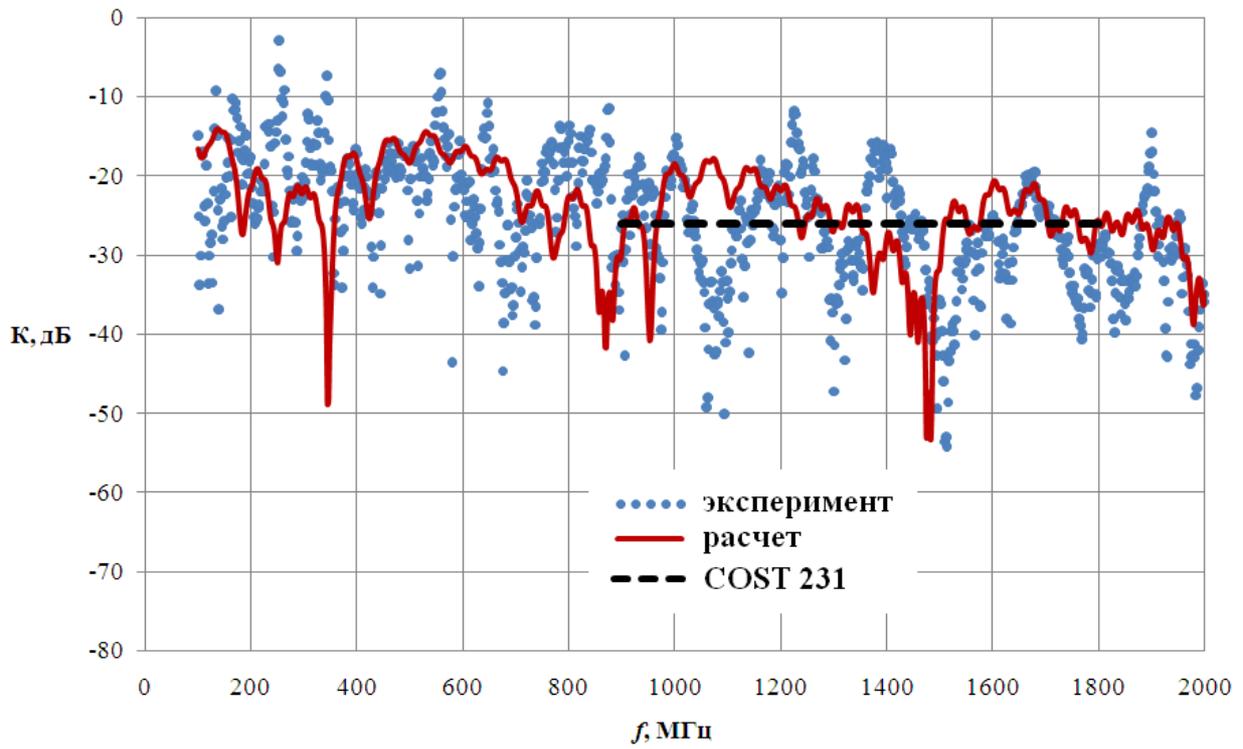


Рис. 9. Частотные зависимости ослабления сигнала относительно точки на расстоянии 1 м от передающей антенны при удалении приемной антенны на расстояние 2 м от здания

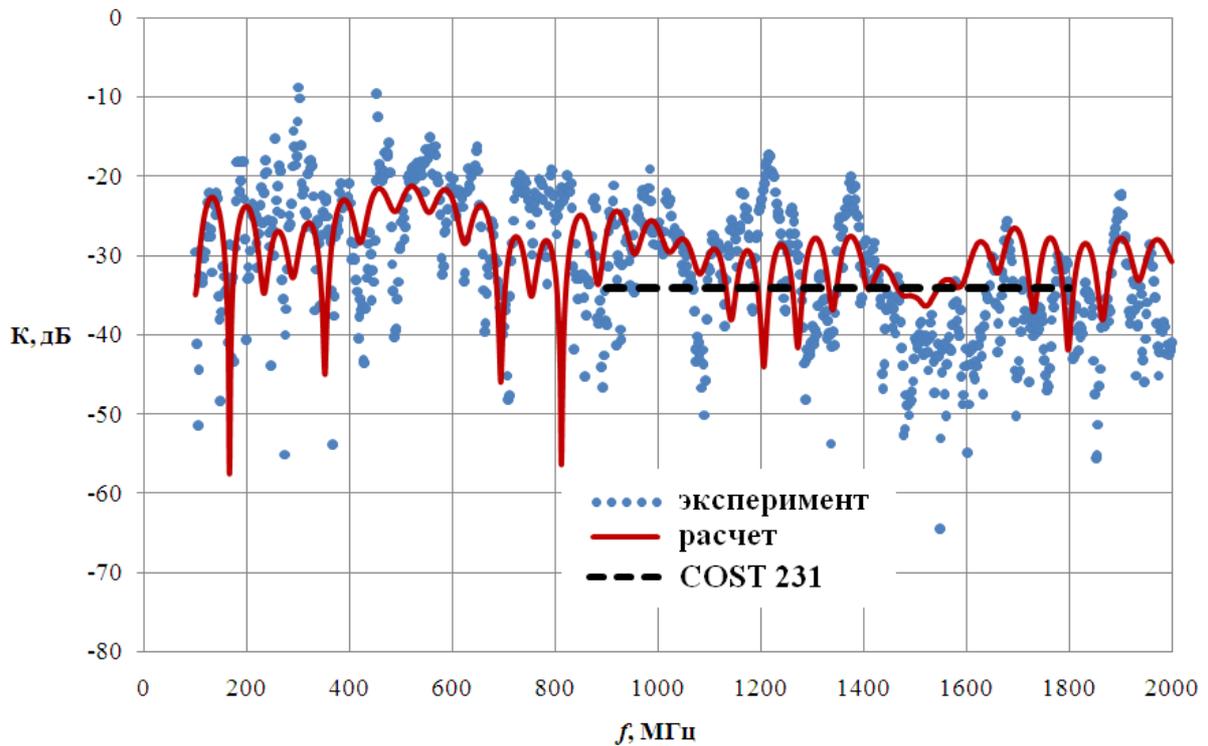


Рис. 10. Частотные зависимости ослабления сигнала относительно точки на расстоянии 1 м от передающей антенны при удалении приемной антенны на расстояние 14 м от здания

Максимальная недооценка уровня сигнала при использовании модели COST 231 наблюдается при наличии прямой видимости между передающей и приемной антенной. Такая трасса может быть получена в рассматриваемой геометрии задачи (рис. 8) при увеличении высоты передающей антенны над полом до 1,5 м (рис. 11).

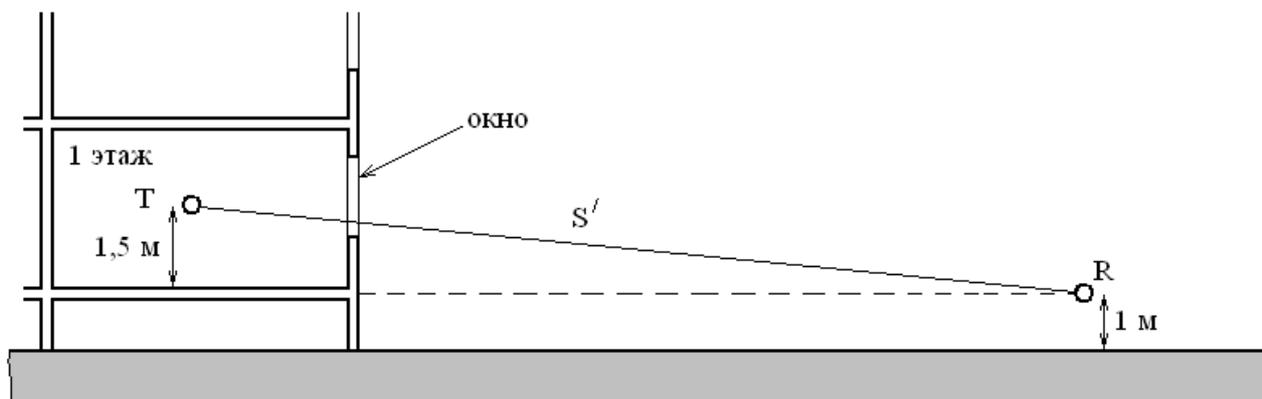


Рис. 11. Геометрия трассы распространения радиоволн с первого этажа здания (передающая и приемная антенны находятся на линии прямой видимости)

На рис. 12 представлены частотные зависимости ослабления при размещении передающей антенны на высоте 1,5 м над полом, рассчитанные по предлагаемой методике и по методике COST 231.

Из рис. 12 видно, что во всем диапазоне частот 900 – 1800 МГц средние значения K , полученные на основе COST 231, занижены на 8 - 14 дБ (уровень сигнала существенно недооценивается). Объясняется это возможно тем, что экспериментальные данные, на основе которых разработана модель COST231, были получены для различных трасс распространения радиоволн, причем большинство трасс существенно отличалось от линии прямой видимости между передающей и приемной антеннами, проходящей через окно.

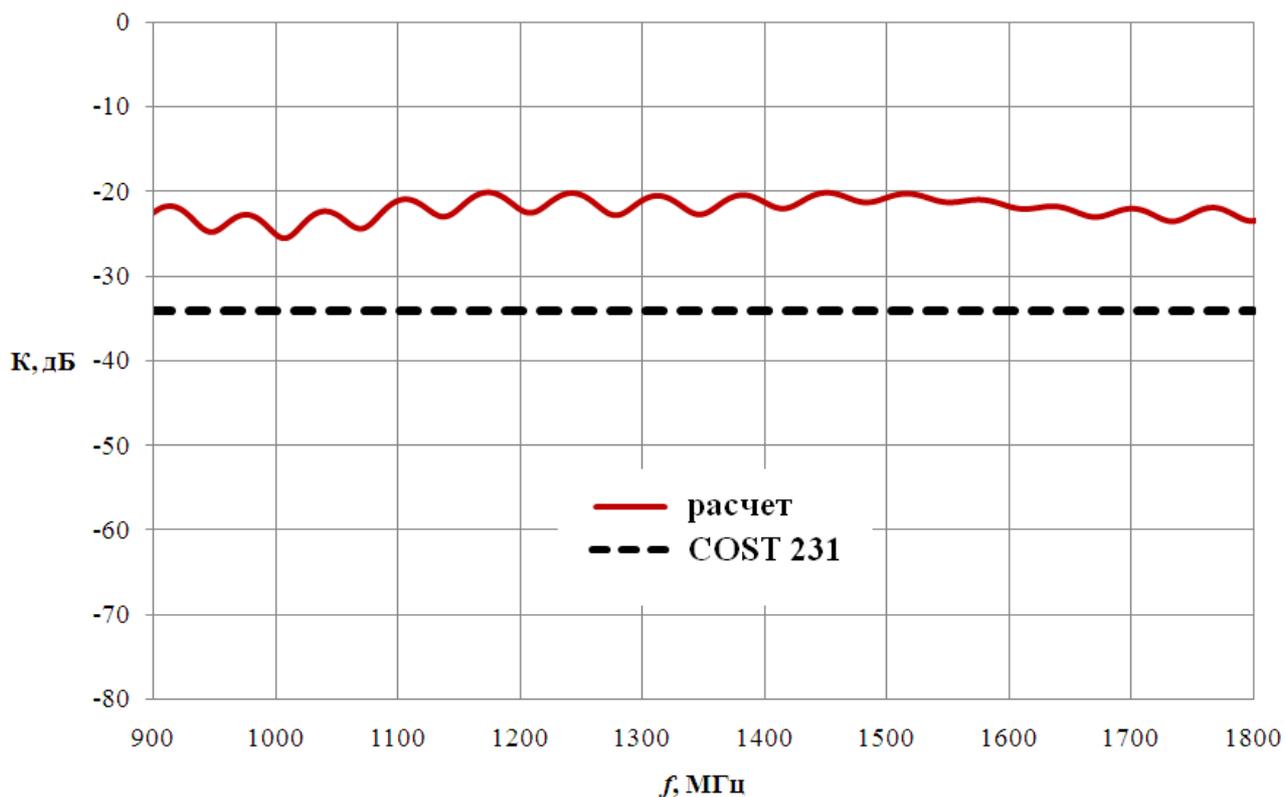


Рис. 12. Частотные зависимости ослабления сигнала при удалении приемной антенны на расстояние 14 м от здания (высота передающей антенны 1,5 м над уровнем пола)

При достаточно большом удалении приемной антенны от здания существенное влияние на уровень принимаемого сигнала может оказывать поверхность земли за счет интерференции в точке приема прямых и отраженных от земли лучей.

На рис. 13 – 15 представлены рассчитанные частотные зависимости ослабления сигнала при размещении передающей антенны на высоте 1 м над уровнем пола на 1, 3 и 7 этажах и приемной антенны на удалении 100 м от здания (на рисунках обозначено «модель поверхность + здание»). Также для сравнения представлены результаты расчетов ослабления при аналогичном размещении передающей антенны относительно поверхности земли, но в отсутствии здания (на рисунках обозначено «модель поверхность»), и результаты расчетов на основе модели COST 231.

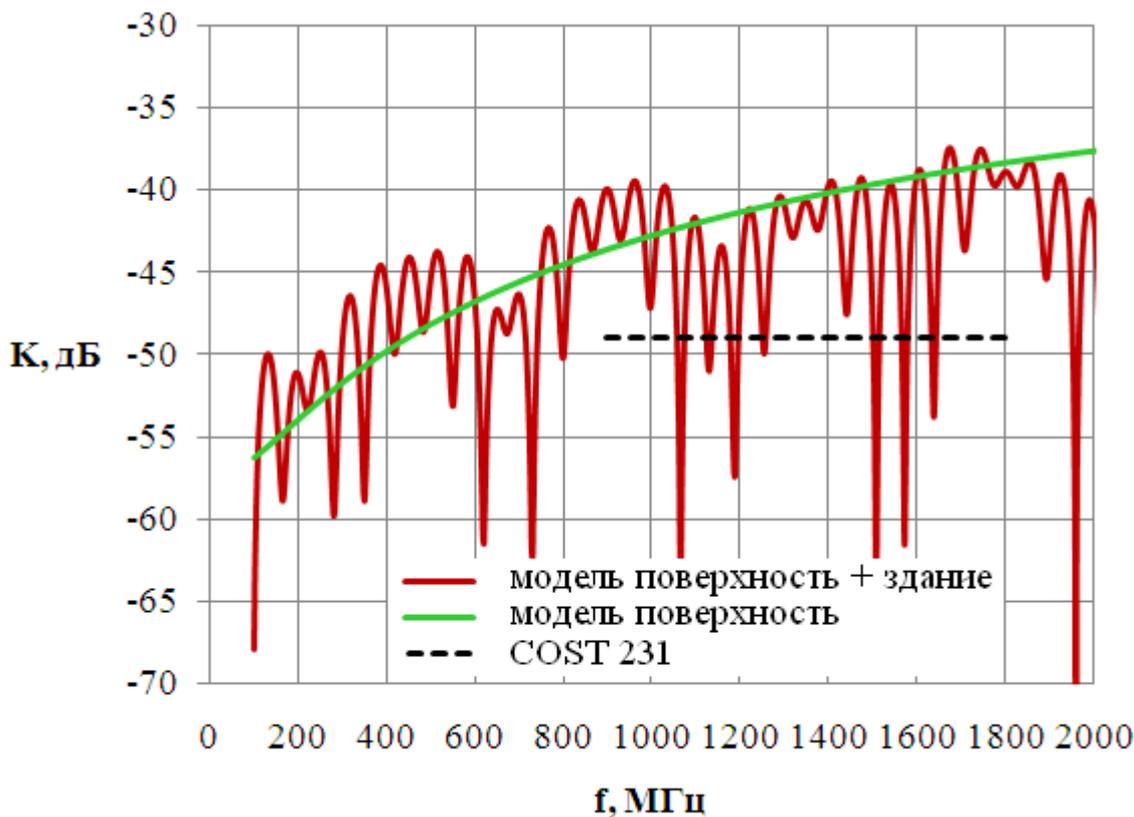


Рис. 13. Частотные зависимости ослабления сигнала при размещении передающей антенны на первом этаже здания

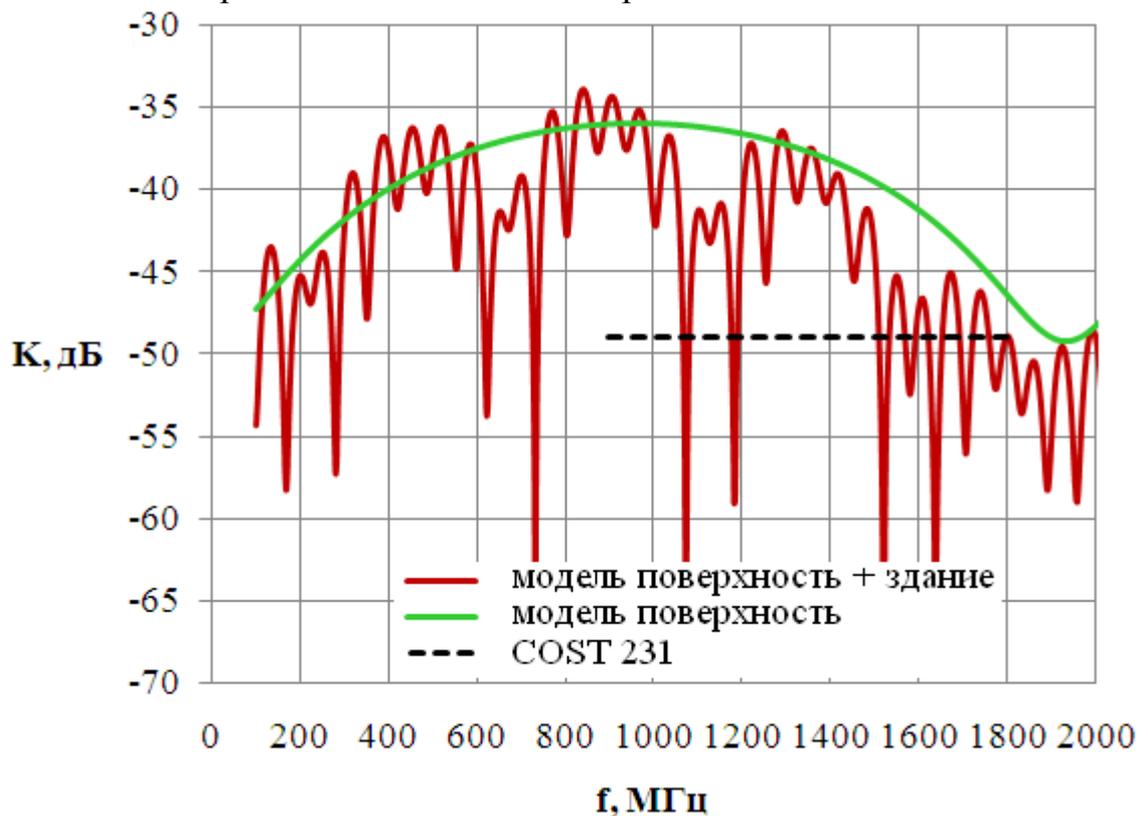


Рис. 14. Частотные зависимости ослабления сигнала при размещении передающей антенны на третьем этаже здания

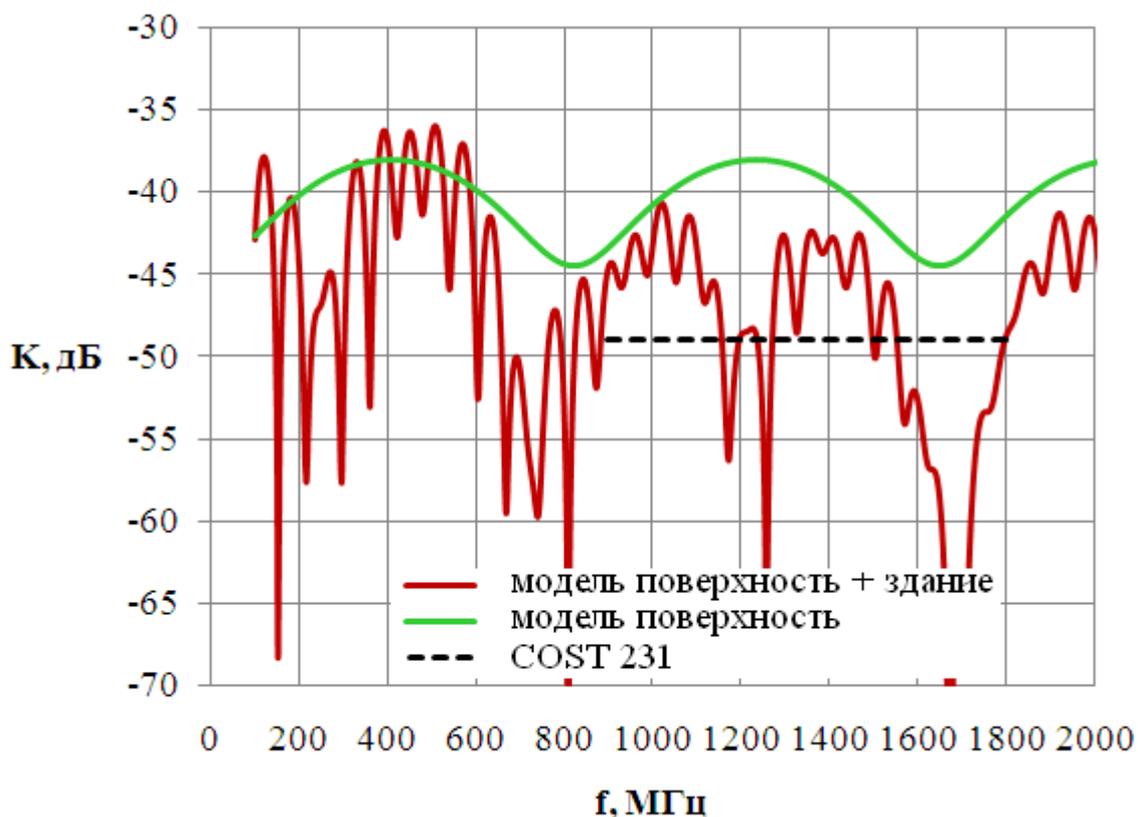


Рис. 15. Частотные зависимости ослабления сигнала при размещении передающей антенны на 7-м этаже здания

Из анализа рис. 13-14 видно, что при размещении передающей антенны на нижних этажах здания влияние земли весьма существенно, средний уровень ослабления с учетом здания практически повторяет уровень ослабления, рассчитанного только с учетом поверхности. При перемещении передающей антенны с первого этажа на третий влияние земли уменьшается на частотах 100 – 800 МГц (средний уровень относительного сигнала увеличивается на 5 – 10 дБ), однако проявляется на частотах 1500 – 2000 МГц (средний уровень относительного сигнала уменьшается на 5 – 10 дБ).

При размещении передающей антенны на 7-м этаже влияние земли практически не заметно (рис. 15), при этом уровень сигнала на частотах 100 – 500 МГц увеличивается на 10 – 15 дБ в сравнении с уровнем сигнала при размещении передающей антенны на первом этаже).

Модель COST 231 дает оценки уровня относительного сигнала, заниженные в среднем на 5 – 10 дБ, что объясняется практически открытой трассой распространения радиоволн.

Выводы.

1. Разработана детерминированная методика расчета ослабления сигналов при распространении радиоволн из здания на улицу. Проведенные расчеты для типовых вариантов размещения передающей и приемной антенн показывают достаточно хорошее согласование полученных результатов с экспериментальными данными.

2. Сравнение разработанной методики, модели COST 231 и результатов экспериментов показывает, что модель COST 231 достаточно точно оценивает средний уровень ослабления на закрытых трассах. При приближении трасс распространения радиоволн к открытому типу модель COST231 может существенно недооценивать уровень сигнала в точке приема.

3. При размещении передающей антенны на нижних этажах здания и достаточно большом удалении приемной антенны от здания существенное влияние на уровень принимаемого сигнала оказывает поверхность земли (средний уровень сигнала может уменьшаться на 10-15 дБ).

Литература

1. European Comission: European cooperation on the field of scientific and technical research (EURO-COST 231): “Digital mobile radio towards future generation systems“, Final report, Bruxelles, 1999, <http://www.lx.it.pt/cost231/>.

2. P.Kyosti et al. “WINNER II channel models,” WINNER II Public Deliverable, Sep.2007.

3. Y. Miura, Y. Oda, T. Taka, ”Outdoor-to indoor propagation modelling with the identification of path passing through wall openings”, IEEE 13th PIMRC, Vol. 1, pp. 130-134, 2002.

4. H. Okamoto, K. Kitao and S. Ichitsubo. Outdoor-to-Indoor Propagation Loss Prediction in 800-MHz to 8-GHz Band for an Urban Area // IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 58, no.3, march 2009, 1059-1067.

5. M. Thiel and K. Sarabandi, “3D-Wave Propagation Analysis of Indoor Wireless Channels Utilizing Hybrid Methods,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 57, pp. 1539–1546, 2009.

6. Z. Lai, N. Bessis, G. de la Roche, H. Song, J. Zhang, and G. Clapworthy, “A new approach to solve angular dispersion of discrete ray launching for urban scenarios,” in Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC), Loughborough, UK, November 2009.

7. V. Degli-Esposti, F. Fuschini, E. Vitucci, and G. Falciasecca, “Speed-Up Techniques for Ray Tracing Field Prediction Models,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 57, pp. 1469–1480, May 2009.

8. Blas J., Fernandez P., Lorenzo R. M., and Abril E. J. A model for transition between outdoor and indoor propagation // Progress In Electromagnetics Research, PIER 85, 147–167, 2008 (окно в виде апертуры).

9. Z. Zhang, R. K. Sorensen, Z. Yun, M. F. Iskander and J. F. Harvey. A ray-tracing approach for indoor/outdoor propagation through window structures // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 50, no. 5, may 2002, 742-748.

10. G. de la Roche, P. Flipo, Z. Lai, G. Villemaud, J. Zhang, and J-M. Gorce. Combined model for outdoor to indoor radio propagation prediction. COST 2100 TD(10)10045, Athens, Greece, February 3-5, 2010. (детерминированные методы).

11. A. Seville, S. Cirstea and J.F. Taylor. Effects of propagation between the indoor and outdoor environment. ICAP 2003. 31.3.-1.4. 2003.

12. Катруша А.Н. Экспериментальные исследования ослабления радиоволн строительными и экранирующими материалами в диапазоне частот 800 МГц – 17 ГГц // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2013, № 8. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/aug13/8/text.pdf>

13. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: АН СССР, 1957,

503 с.

14. Финкельштейн М.И., Карпухин В.И., Кутев В.А., Метелкин В.Н. Под ред. М. И. Финкельштейна. Подповерхностная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1994, 216 с.

15. Luebbers R.J. Finite Conductivity Uniform GTD Versus Knife Edge Diffraction in Prediction of Propagation Path Loss. // IEEE Trans. On Antennas and Propagation, vol. 32, No.1, 1984, p.70-76.

16. А. И. Рыжов , В. А. Лазарев , Т. И. Мохсени , Д. В. Никеров , Ю. В. Андреев , А. С. Дмитриев , Н. П. Чубинский. Ослабление сверхширокополосных хаотических сигналов диапазона 3–5 ГГц при прохождении через стены зданий. // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2012. №5. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/may12/1/text.pdf>.

17. Катруша А.Н. Исследование ослабления радиоволн диапазона частот 100 МГц – 2 ГГц на трассе распространения из здания на улицу // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2013, № 10. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct13/14/text.pdf>.