

УДК 537.874

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ РАДИОВОЛН ДИАПАЗОНА  
ЧАСТОТ 100 МГц – 2 ГГц НА ТРАССЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ  
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 сентября 2013 г.

**Аннотация.** Приведены результаты экспериментальных исследований ослабления сигналов при распространении радиоволн из комнаты здания на улицу; на основе физического анализа полученных результатов выявлены закономерности формирования результирующего интерференционного поля вблизи здания; предложен новый метод экспериментальных исследований ослаблений многолучевых сигналов.

**Ключевые слова:** распространение радиоволн, экспериментальные исследования, мобильная радиосвязь, побочные электромагнитные излучения, дифракция.

**Abstract.** Results of experimental researches of easing of signals are resulted at radio-waves propagation from a building room on street; on the basis of the physical analysis of the received results laws of formation of the resulting interference fields near to a building are revealed; the new method of experimental researches of easings of multibeam signals is offered.

**Keywords:** propagation of radio-waves, experimental researches, a mobile radio communication, side electromagnetic radiations, diffraction.

**Введение**

В настоящее время в связи с развитием систем беспроводной связи ближ-

него действия (микро и пикосотовых систем связи, систем беспроводного доступа), транкинговой радиосвязи, а также необходимостью организации подавления мобильной УКВ радиосвязи, обеспечения защиты информации от утечки по каналу побочных электромагнитных излучений (ПЭМИ) приобретают актуальность исследования особенностей распространения радиоволн из многоэтажного здания.

Трассовые ослабления радиоволн в городских условиях и внутри зданий исследовались в достаточном количестве работ, например в [1-6]. Однако вопрос распространения радиоволн из здания на улицу в данных работах не рассматривался. Кроме того, в работах [1, 2], основанных на экспериментальных исследованиях, в основном проводилась оценка усредненных значений напряженности поля. В рекомендациях ИТУ-R [7-9] ослабление радиоволн, вносимое стенами и другими строительными материалами, предлагается учитывать с помощью некоторых коэффициентов, полученных для ряда выборочных частот. Очевидно, что таких данных недостаточно для адекватной оценки уровней сигналов на сложной трассе распространения радиоволн из здания в широком диапазоне частот от сотен мегагерц до 2 ГГц, охватывающем диапазоны современных системы мобильной радиосвязи, а также основной спектр побочных электромагнитных излучений различных технических средств (компьютеров и другой офисной техники).

Кроме того при оценке ослабления ПЭМИ часто используется приближенная «трехзонная» формула [10]. Однако в работе [11] показано, что результаты расчетов коэффициентов ослабления по приближенной формуле могут существенно (на 20 дБ и более) отличаться от результатов расчетов ослабления на основе точной формулы для напряженности поля дипольного излучателя в свободном пространстве. В связи с этим представляет интерес сравнение результатов экспериментальных исследований ослабления радиоволн на типовых трассах распространения с результатами теоретических оценок, основанных на

использовании точной и приближенной формулы для условий свободного пространства.

**Методика проведения экспериментальных исследований и описание измерительной установки.**

Необходимо отметить, что распространение радиоволн в городе характеризуется многолучевостью и, как следствие, глубокими интерференционными замираниями сигнала в точке приема. В связи с этим, для выявления сложной интерференционной структуры формируемого поля необходимо проводить измерения в некоторой области пространства с шагом, зависящим от длины волны сигнала.

Как правило, такая задача решается путем измерения на фиксированных частотах амплитуды принимаемого сигнала и построения зависимости уровня сигнала от расстояния между точкой приема и передающей антенной. Перемещение измерительной антенны в пространстве приводит к изменению соотношений фаз радиоволн, приходящих в точку приема по различным траекториям, что позволяет учесть глубокие интерференционные замирания принимаемого сигнала вдоль трассы распространения.

В настоящей работе применяется альтернативный метод исследования интерференционной структуры сигнала в условиях многолучевого распространения радиоволн. Суть этого метода заключается в выборе нескольких типовых контрольных точек приема в пространстве. При этом изменяется не местоположение приемной антенны, а частота сигнала, что также приводит к изменению фазовых соотношений волн в точке приема и позволяет учесть интерференционные замирания в частотной области.

Измерительная установка состояла из передатчика (генератор Rohde&Schwarz SMA 100A) и приемника (анализатор спектра Rohde&Schwarz FSU 26). Для излучения радиоволн использовалась широкополосная антенна DA-3000, для приема – широкополосная активная антенна HE-500. Поляризация антенн вертикальная, диаграмма направленности в горизонтальной плоско-

сти круговая. Частота излучаемого сигнала изменялась в широком диапазоне от 100 МГц до 2000 МГц с шагом 2 МГц.

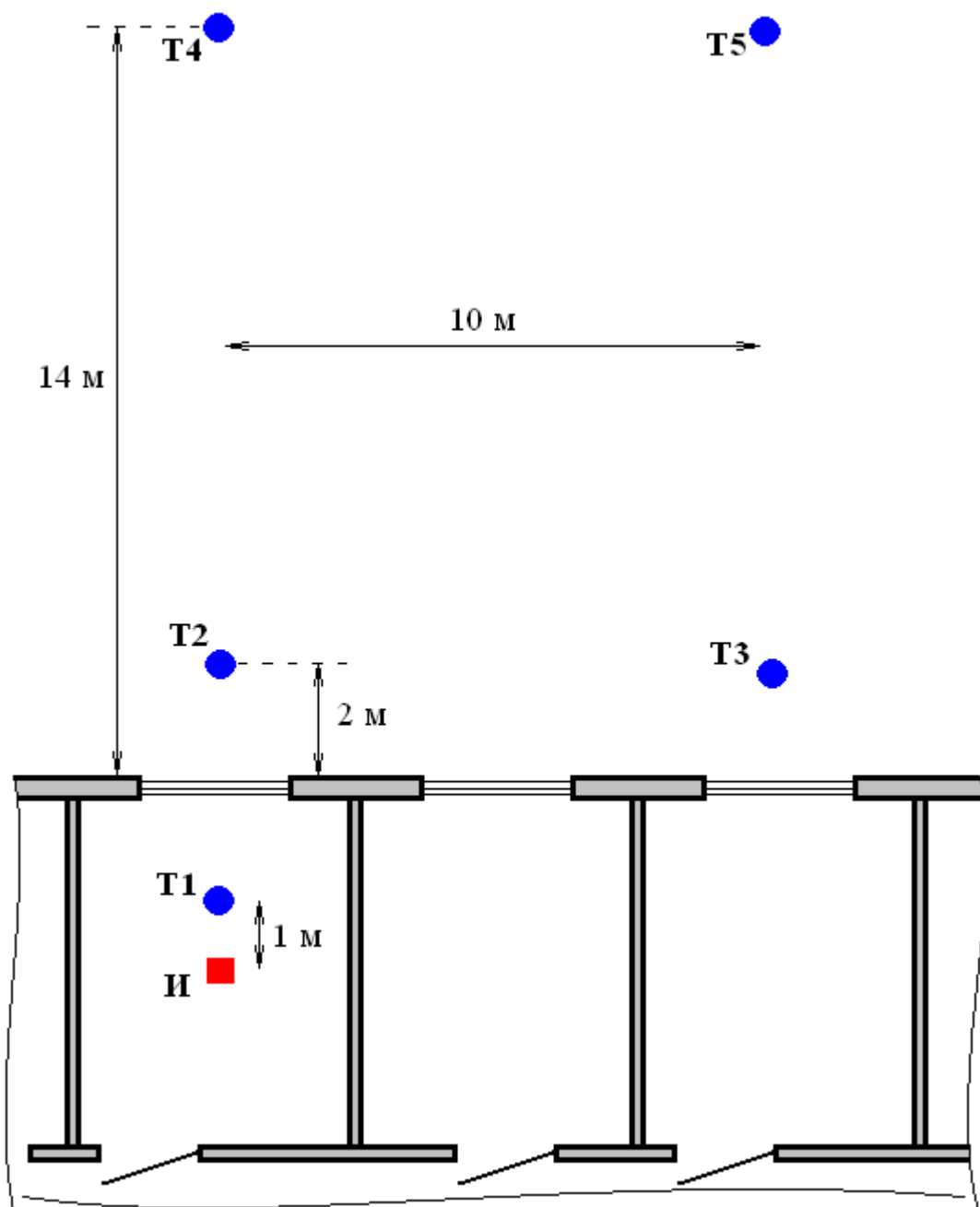


Рис. 1 Схема размещения передающей и приемной антенн (вид сверху)

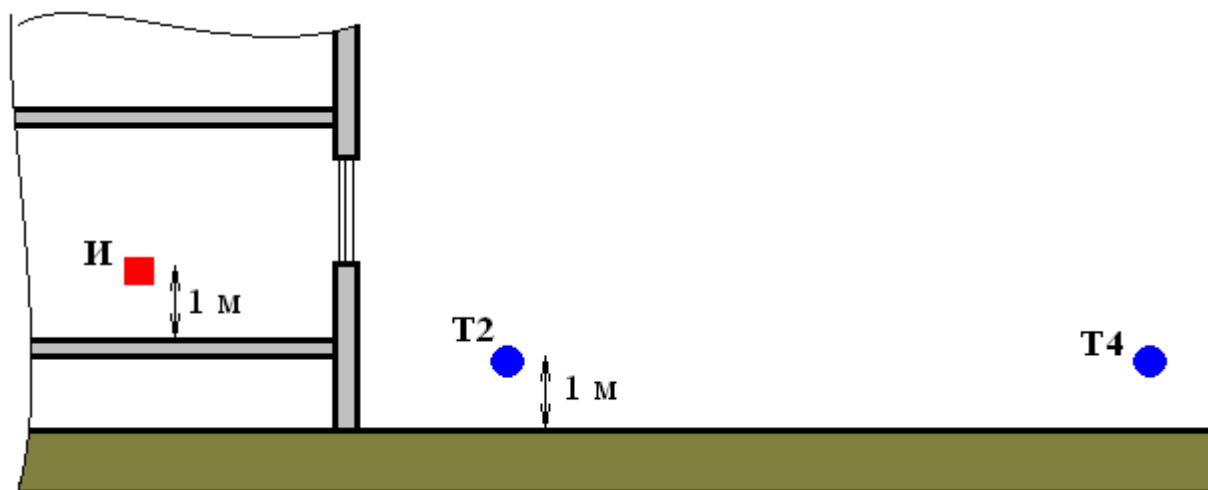


Рис. 2 Схема размещения передающей и приемной антенн (вид сбоку)

На рис. 1, 2 приведена схема части первого этажа кирпичного здания и прилегающей территории, в пределах которой размещалась приемная антенна. Толщина фронтальной стены здания составляла 0,4 м. Передающая антенна располагалась в точке **И** в центре комнаты на удалении 3 м от окна и на высоте 1 м от пола. Высота подоконника приблизительно 1 м, пол первого этажа находился на высоте 1 м над землей. Приемная антенна размещалась в точках **Т1-Т5** на высоте 1 м над землей (полом). Опорная точка **Т1** находилась в комнате на удалении 1 м от передающей антенны. Следует отметить, что приемная антенна находилась в зоне радиотени при размещении как вблизи здания в точках **Т2, Т3**, так и в удаленных точках **Т4, Т5** (рис. 2). При этом точка **Т3** находится в зоне глубокой тени. Рассматривалось нормальное по отношению к фронту здания расположение линии «передающая антенна-приемная антенна» (точки **Т2, Т4**), а также расположение указанной линии под углом к фронту здания (точки **Т3, Т5**).

Сначала измерялась частотная зависимость уровня сигнала на входе анализатора спектра  $U_1(f)$  в опорной точке **Т1**. Затем приемная антенна размещалась в точках **Т2...Т5** и измерялся уровень сигнала  $U_2(f) \dots U_5(f)$ .

Ослабление сигнала в точках наблюдения относительно уровня сигнала, измеренного в опорной точке, рассчитывалось по формуле

$$K_2(f) \dots K_5(f) = \frac{U_2(f) \dots U_5(f)}{U_1(f)}$$

### Результаты экспериментальных исследований и их анализ.

На рис. 3 и рис. 4 представлены зависимости ослабления сигнала от частоты при размещении приемной антенны вблизи здания в точках **T2** и **T3** соответственно.

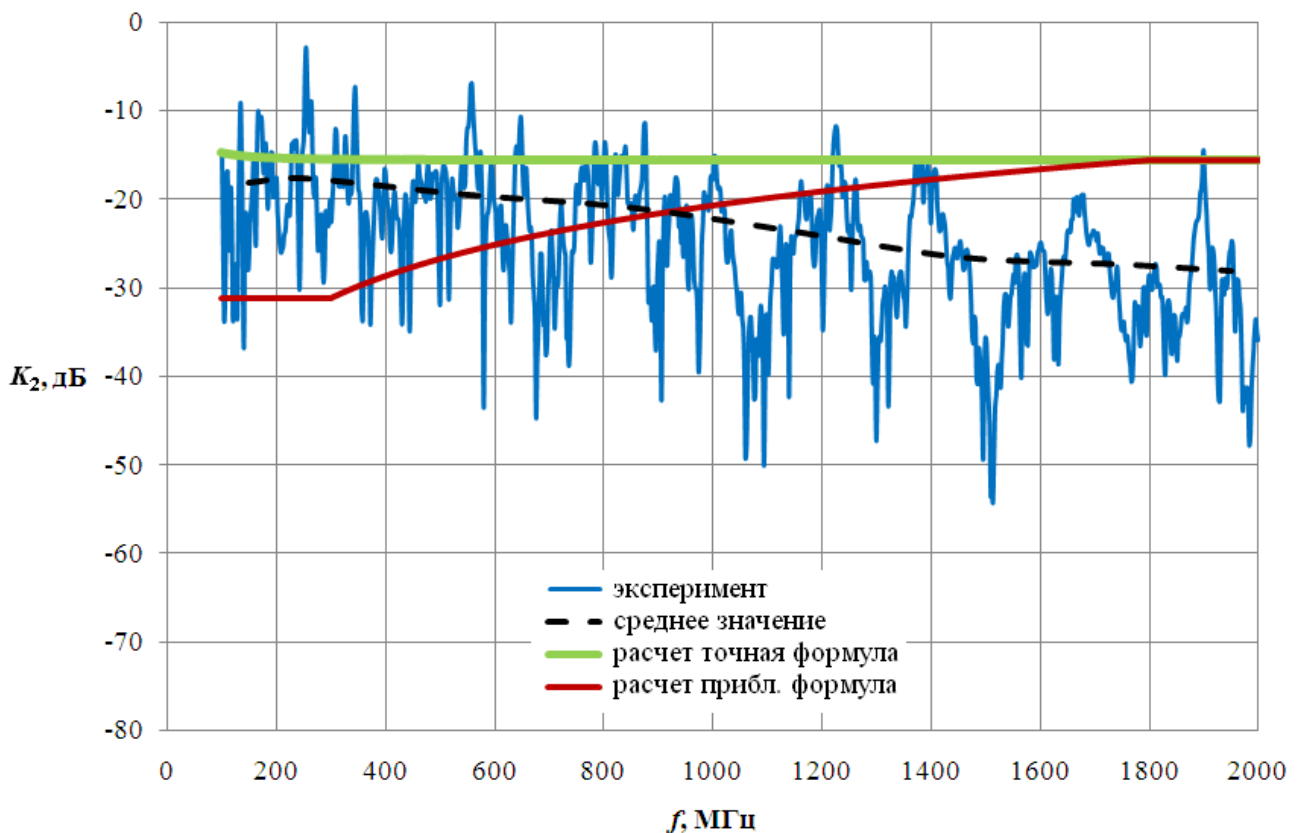


Рис. 3. Частотная зависимость ослабления сигнала в точке **T2**

На рисунках обозначено: кривая синего цвета – значения ослабления, полученные экспериментально; черная штриховая кривая – результаты усреднения экспериментальных значений; зеленая линия – результаты расчета ослабления в свободном пространстве [11]; красная кривая – результаты расчета ослаб-

ления по приближенной формуле [10]. Для выявления наиболее общих закономерностей усреднение экспериментальных значений проводилось в достаточно широкой полосе частот  $\Delta F = 300$  МГц.

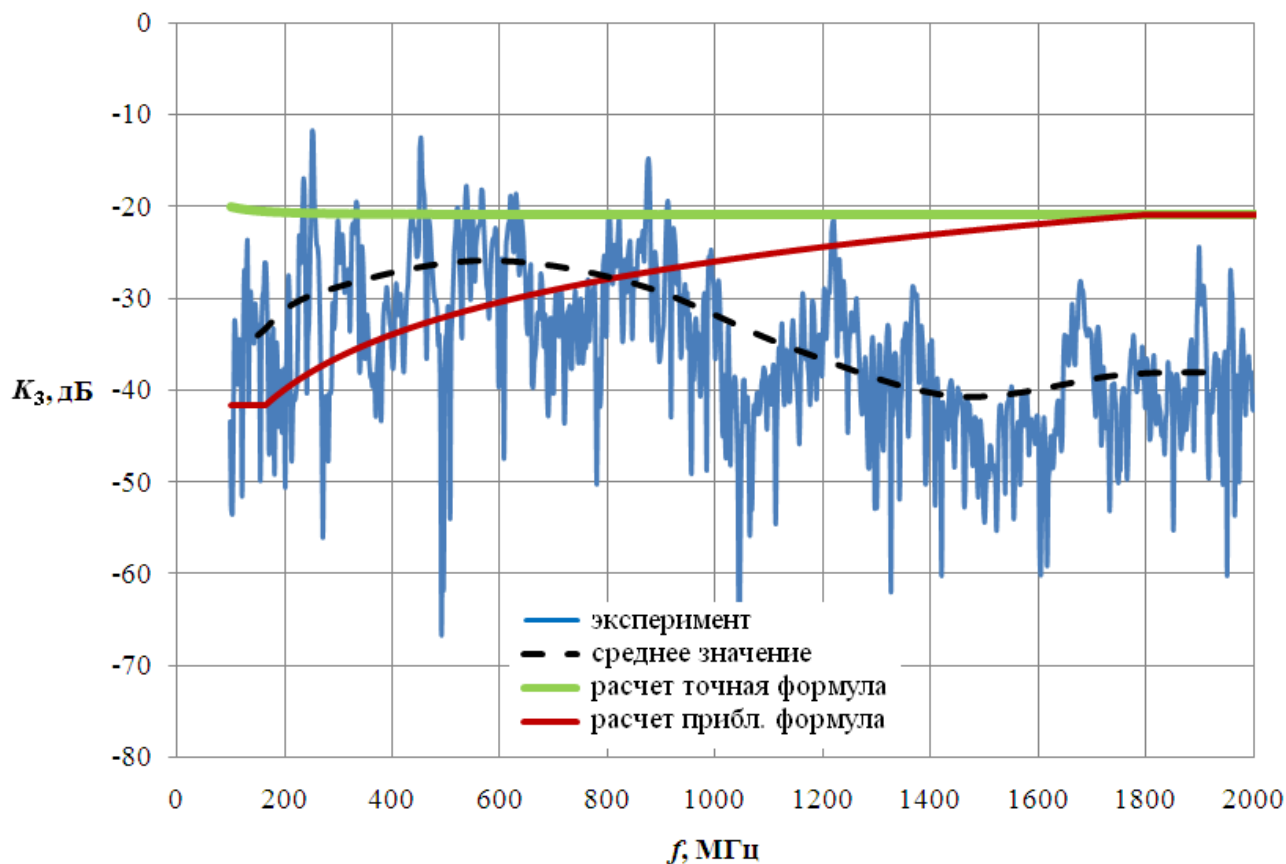


Рис. 4. Частотная зависимость ослабления сигнала в точке Т3

На основе анализа рис. 3, 4 выявлены следующие закономерности.

При размещении приемной антенны в точке Т2 наблюдается конкуренция сквозной волны через фронтальную стену здания и волны дифракции на нижней кромке оконного проема, особенно это заметно в диапазоне частот 1–2 ГГц (глубокие интерференционные замирания с периодом повторения приблизительно 200 МГц достигают 40 дБ).

С увеличением частоты сигнала средний уровень ослабления почти монотонно убывает (рис. 3), что связано с затуханием сквозной волны в стене и

ухудшением дифракционных способностей радиоволн при уменьшении длины волны сигнала.

При размещении приемной антенны в точке **T3** частота быстрых осцилляций ослабления существенно увеличивается (рис. 4). Это объясняется сложной трассой распространения радиоволн (скользящее падение волны на фронтальную стену здания). При этом увеличивается число лучей в точке приема, вносящих существенный вклад в результирующее поле. Кроме того разность хода между отдельными лучами в точке приема возрастает (вследствие многочисленных переотражений), что, как известно, также приводит к увеличению частоты осцилляций сигнала.

Точка **T3** находится в зоне глубокой тени, поэтому средний уровень сигнала относительно свободного пространства уменьшается в среднем на 5-10 дБ по сравнению с уровнем сигнала в точке **T2**. Однако следует отметить, что на частотах вблизи 600 МГц при перемещении приемной антенны из точки **T2** в точку **T3** ослабление сигнала относительно свободного пространства практически не меняется.

Поскольку точки приема находятся в зоне тени расчет ослабления по формуле для дипольного излучателя в свободном пространстве (зеленая кривая) дает завышенные значения **K**, особенно на частотах больше 1 ГГц.

Приближенная формула для расчета ослабления дает заниженные значения на частотах сигнала до 800-1000 МГц. При этом кривые среднего уровня измеренного ослабления и результатов расчета по приближенной формуле существенно отличаются даже на качественном уровне – с повышением частоты среднее значение ослабления уменьшается, а значение ослабления, полученное на основе приближенной формулы, увеличивается (рис. 3).

На рис. 5 и рис. 6 приведены зависимости ослабления сигнала от частоты при размещении приемной антенны в точках **T4** и **T5** соответственно.



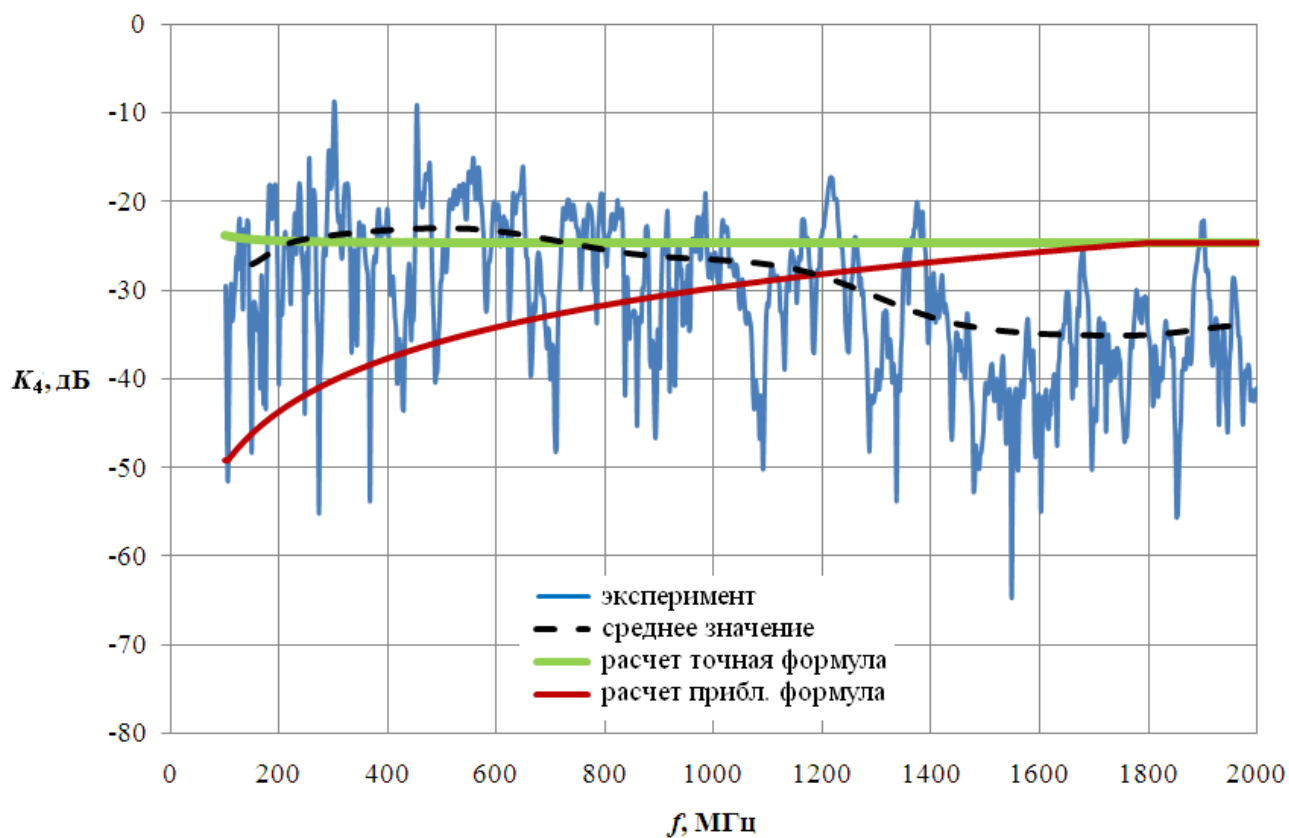


Рис. 5. Частотная зависимость ослабления сигнала в точке T4

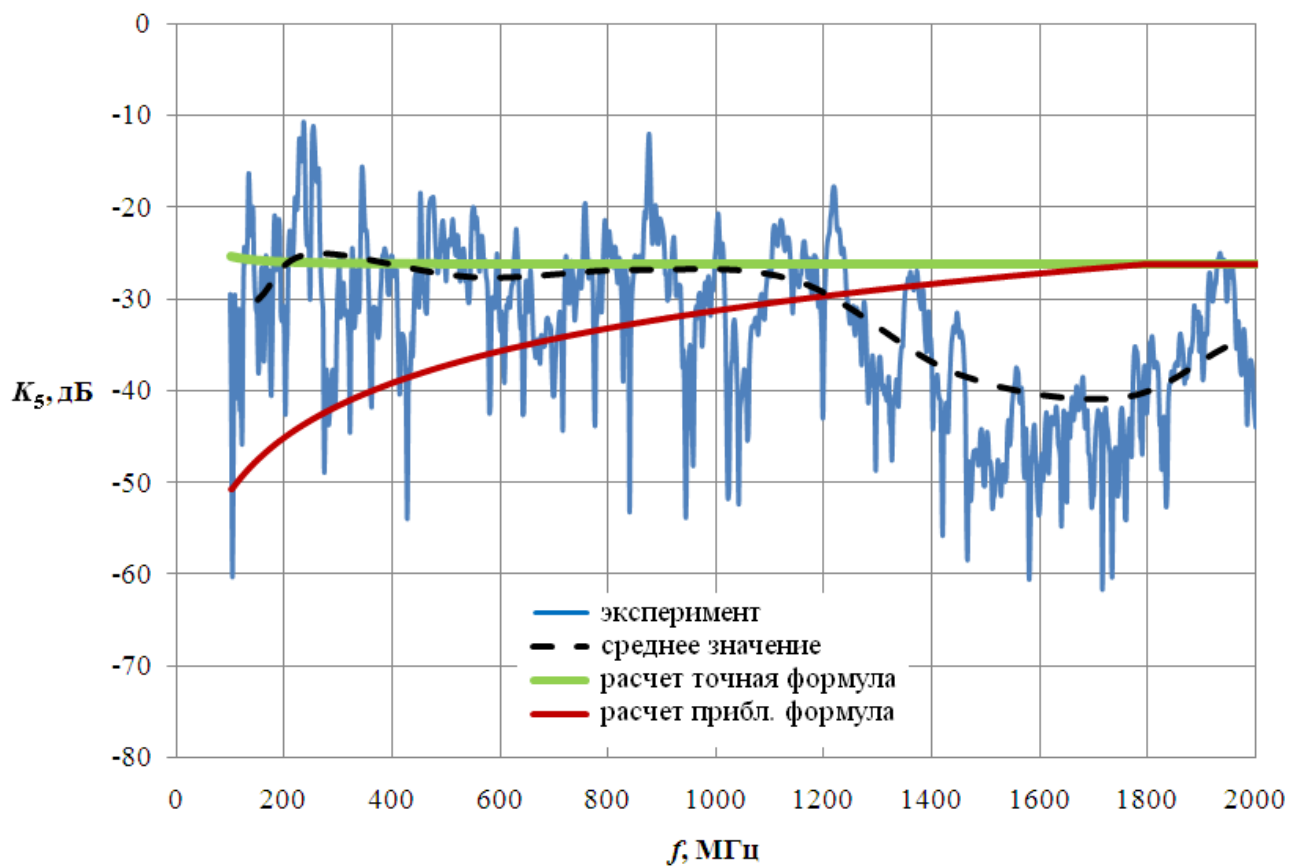


Рис. 6. Частотная зависимость ослабления сигнала в точке T5

Анализ рис.5, 6 показывает следующее:

- при удалении приемной антенны от здания трасса становится более открытой (точка приема переходит в зону полутени). В результате уровень дифракционной компоненты возрастает. При этом средний уровень измеренного ослабления приближается к ослаблению в свободном пространстве на частотах до 1..1,2 ГГц;

- дальнейшее увеличение частоты приводит к ухудшению дифракционных способностей радиоволн и, соответственно, к уменьшению среднего уровня ослабления;

- при удалении приемной антенны от здания уровень сигнала может возрасть. Например, средний уровень ослабления для частот 1..1,2 ГГц в точке Т3 составляет -32..-37 дБ (рис. 4), а в более удаленной точке Т5 увеличивается до -27..-30 дБ (рис. 6);

- расчет ослабления на основе приближенной формулы дает весьма заниженные результаты по сравнению с медианным значением ослабления на частотах до 1,2 ГГц (например, при частоте 200 МГц недооценка уровня сигнала составляет 20 дБ!).

### **Выводы**

1. При распространении радиоволн из комнаты здания наблюдается сложная интерференционная структура принимаемого сигнала в частотной области. При этом осцилляции сигнала достигают 40 дБ и более. Такой характер формируемого сигнала обусловлен многокомпонентным составом поля в точке приема (конкуренция сквозной через стену здания волны, отраженных в комнате и дифрагировавших на оконном проеме волн).

2. При удалении точки приема от здания на расстояние порядка 15 м трассы распространения радиоволн приближаются к открытому типу, поэтому средний уровень принимаемого сигнала соизмерим с уровнем сигнала в свободном пространстве. Таким образом, для частот ниже 1 ГГц средний уровень

сигнала может быть вполне достоверно оценен с помощью формулы для расчета ослабления излучения диполя в свободном пространстве.

4. На частотах выше 1 ГГц необходим учет дифракционных потерь и затухания радиоволн в фронтальной стене, составляющих в среднем 10-15 дБ (для кирпичной стены толщиной 0,4 м).

5. Расчет ослабления сигнала с использованием приближенной формулы приводит к существенному занижению прогнозируемого уровня сигнала (до 20 дБ) в широкой полосе частот от 100 МГц до 1 ГГц, что недопустимо при оценке защищенности информации от утечки по каналу ПЭМИ.

### **Литература**

1. Okamura J. et al. Field strength and its variability in VHF and UHF land mobile radio service // *Rev. Inst. Elec. Eng.* – 1968. – V.16. – №9-10. – P. 825-873.

2. Whittaker J.H. Measurements of path loss at 910 MHz for proposed micro-cell urban mobile systems // *IEEE Trans. Veh. Technol.* – 1998. – V.37. – №8. – P.125-129.

3. Degli-Esposti V., Lombardi G., Passerini C., Riva G. Wide-band measurement and ray-tracing simulation of the 1900 MHz indoor propagation channel: comparison criteria and results // *IEEE Transactions on Antennas & Propagation.* – 2001. – V.49. – №7. – P. 1101-1110.

4. Zhang W. A wide-band propagation model based on UTD for cellular mobile radio communications // *IEEE Transactions on Antennas & Propagation.* – 1997. – V.45. – №11. – P. 1669-1678.

5. Son H.-W., Myung N.-H. A deterministic ray tube method for microcellular wave propagation prediction model // *IEEE Transactions on Antennas & Propagation.* – 1999. – V.47. – №8. – P. 1344-1350.

6. Chung H.K., Bertoni H.L. Rang-dependent path-loss model in residential areas for the VHF and UHF bands // *IEEE Transactions on Antennas & Propagation.* –

2002. – V.50. – №1. – P.1-11.

7. Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radio-communication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz. Recommendation ITU-R P.1238-7. Geneva, 2012.

8. Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz. Recommendation ITU-R P.1411-6, Geneva (02/2012).

9. Propagation data required for the design of broadcasting-satellite systems. Recommendation ITU-R P.679-3, (02/2001).

10. Хорев А.А. Оценка возможности по перехвату побочных электромагнитных излучений видеосистемы компьютера. Часть 2 // Специальная техника. – 2011. – № 4. – С. 51-62.

11. Авдеев В.Б., Катруша А.Н. Расчет коэффициента ослабления побочных электромагнитных излучений // Специальная техника. – 2013. – № 2. – С. 18-27.