

УДК 621.396.2

Смелянский А. А., асп. (Гос. унив-т телекоммуникаций. +380 (63) 738 27 52. smilianskiy@ukr.net)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАТУХАНИЯ РАДИОСИГНАЛА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ ДВУХСЛОЙНУЮ СТЕНУ

Смелянский А. О. Визначення загасання радіосигналу при проходженні через двошарову стіну. Наведено результати дослідження проходження радіосигналу через двошарову стінку типового приміщення: офісу, квартири, складу і т. п. Отримано формули для визначення загасання сигналу і зміни напрямку його поширення залежно від діелектричної проникності і тангенса кута втрат матеріалу стіни. Наведено залежність загасання електромагнітної хвилі від кута падіння на перешкоду. Графічно показані зміни напрямку електромагнітної хвилі на межі розділу двох середовищ, а також при проходженні крізь діелектрик і вільний простір. Проаналізовано залежність реального загасання хвилі, при проходженні його крізь стіну, від кута падіння на дану перешкоду в мобільних мережах стандарту GSM 900.

Ключові слова: радіосигнал, фемточарунка, діелектрична проникність, коефіцієнт проходження, кут падіння, кут відбиття, поширення радіохвиль, загасання сигналу

Смелянский А. А. Определение затухания радиосигнала при прохождении через двухслойную стену. Приведены результаты исследования прохождения радиосигнала через двухслойную стенку типового помещения: офиса, квартиры, склада и т. п. Получены формулы для определения затухания сигнала и изменения направления его распространения в зависимости от диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь материала стены. Приведена зависимость затухания электромагнитной волны от угла падения на преграду. Графически показаны изменения направления электромагнитной волны на границе раздела двух сред, а также при прохождении сквозь диэлектрик и свободное пространство. Проанализирована зависимость реального затухания волны при прохождении его сквозь стену от угла падения на данную преграду в мобильных сетях стандарта GSM 900

Ключевые слова: радиосигнал, фемтосота, диэлектрическая проницаемость, коэффициент прохождения, угол падения, угол отражения, распространение радиоволн, затухание сигнала

Smilianskiy A. O. Definition radio attenuation when passing through the double layer wall. The results of the study of radio signal passing through the wall of a two-layer model space: office, apartment, warehouse, etc. The formulas for determining the attenuation of the signal and changes its direction of propagation depends on the dielectric constant and loss tangent of the wall material. The dependence of the attenuation of the electromagnetic wave from the angle of incidence on the barrier is shown. Graphically shows the changes in the direction of the electromagnetic wave at the interface of two media, as well as passing through the dielectric and free space. The dependence of the real wave attenuation, as it passes through the wall, the angle of incidence on this barrier in mobile networks GSM 900.

Keywords: radio signal, femtocell, permittivity, transmission coefficient, angle of incidence, angle of reflection, radio wave propagation, signal attenuation

I. Введение. При проектировании телекоммуникационных систем (ТКС), предназначенных для работы в помещении, в частности ТКС на основе фемтосоты, важной задачей является определение затухания радиосигнала при прохождении через препятствия – стены, двери, окна, межповерхностные перекрытия и проч. При этом необходимо учесть тип строительного материала, используемого для создания конструкции. Данная проблема была рассмотрена в ряде фундаментальных работ и научных статей [1-5], однако для определенных частот и характеристик указанные вопросы высветлены не полностью. Основной поставленной задачей есть вычисление потери определенной электромагнитной волны в зависимости от угла падения на преграду, также выведение универсальных формул, которые могли бы использоваться для расчетов затухания сигнала в двухслойной стене из различных материалов с использованием специфических характеристик. Интерес к данной проблеме связан с плотностью городской застройки и специфическим распространением сигнала внутри помещения, что существенно влияет на качество сигнала, передающегося на приемник. Во многих случаях для улучшения сигнала используется фемтосота [6] (миниатюрная базовая станция для обслуживания небольшого количества абонентов), и чтобы определить наиболее оптимальное место расположения прибора необходимо просчитать затухание электромагнитной волны в определенных направлениях и при определенных углах.

II. Расчет затухания сигнала

Рассмотрим общий случай, когда радиосигнал излучается изотропным источником из точки А мощностью P_A под некоторым углом к внешней поверхности стены φ (Рис. 1).

На внешнюю поверхность стены в точке P_A будет падать сигнал с мощностью $P'_A = \frac{P_A}{L_1}$, где $L_1 = \frac{16\pi^2 R_1^2}{\lambda^2}$

– затухание сигнала в свободном пространстве [7]; λ – длина волны.

$$\text{Тогда } P'_A = \frac{\lambda^2 P_A}{16\pi^2 R_1^2}.$$

В зависимости от характеристик поверхности стены часть сигнала будет преломляться под углом φ с мощностью $P_B = T_1^2 P_{nA}$ [8], где T_1 – коэффициент преломления сигнала на границе двух сред (коэффициент Френеля для нормальной поляризации) [9]:

$$T_1 = \frac{2Z_2 \cos \phi}{Z_2 \cos \phi + Z_1 \cos \theta'}, \quad (1)$$

где $Z_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}$, $Z_2 = \sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}$, – характеристические сопротивления сред 1 и 2, соответственно; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \mu_1, \mu_2$ – диэлектрическая и магнитная проницаемость материала сред.

Для частного случая, когда средой 1 служит вакуум или воздух ($\mu_1 = \mu_2 = 1$), а средой 2 – немагнитный ($\mu_2 = 1$) диэлектрик с относительной диэлектрической проницаемостью ε , формула (5) примет вид [10]

$$T_1 = \frac{2 \cos \phi}{\cos \phi + \sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \phi}}.$$

Величина мощности сигнала на внутренней границе стены в точке P_B будет равна:

$$P_B = \frac{\lambda^2 P_A}{16\pi^2 R_1^2} \left(\frac{2Z_2 \cos \phi}{Z_2 \cos \phi + Z_1 \cos \theta'} \right)^2.$$

В зависимости от материала внутри стены (среда 2) радиосигнал идет к точке P'_B на внутреннюю границу стены под углом θ .

Угол θ найдем с использованием закона Снеллиуса (Снеля) [8]

$$k_2 \sin \theta = k_1 \sin \varphi, \quad (2)$$

где k_1 и k_2 – показатели преломления сред 1, 2

$$k_1 = \sqrt{\varepsilon_1 \mu_1}, \quad k_2 = \sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}.$$

Тогда из формулы (2) получим

$$\sin \theta = \frac{\sqrt{\varepsilon_1 \mu_1} \sin \varphi}{\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}}, \quad \theta = \arcsin \frac{\sqrt{\varepsilon_1 \mu_1} \sin \varphi}{\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}}.$$

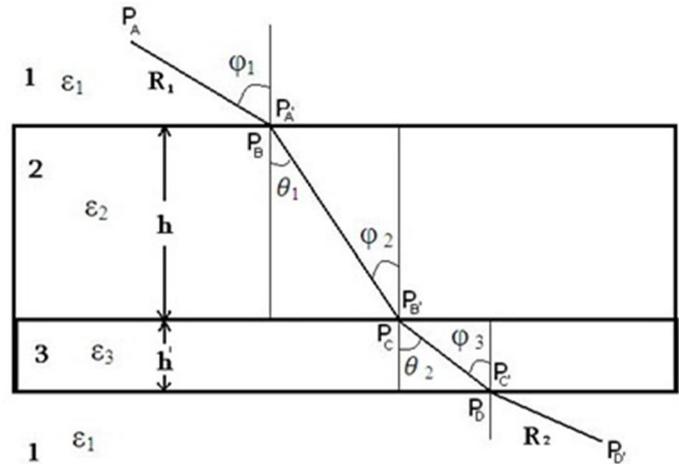


Рис. 1. Особенности прохождения радиосигнала через препятствие

Для расчета потерь сигнала, который приходит от точки P_B' под углом θ , в точке С используем логарифмическую единицу a_{II} – погонное затухание [11], которое измеряется в децибелах на метр (дБ/м) и определяется по формуле

$$a_{II} = 8,69 \frac{\pi k_2}{\lambda} \operatorname{tg} \delta_1 \text{ [дБ/м]},$$

или

$$a_{II}' = 10^{0,869 \frac{\pi k_2}{\lambda} \operatorname{tg} \delta_1} \text{ [1/м]},$$

где $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

Длину пути h_1 , который проходит сигнал внутри стены, определим по формуле

$$h_1 = \frac{h}{\cos \theta_1}. \quad (3)$$

Затухание сигнала в диэлектрике равно:

$$a_{II}'' = h_1 a_{II}' = \frac{h 10^{0,869 \frac{\pi k_2}{\lambda} \operatorname{tg} \delta_1}}{\cos \theta_1}. \quad (4)$$

Мощность сигнала в точке P_B' с учетом формул (3), (4) будет равна:

$$P_B' = \frac{P_B}{a_{II}''} = \frac{\lambda^2 P_A Z_2^2 \cos^2 \phi \cos \theta_1}{4\pi^2 R_1^2 (Z_2 \cos \phi + Z_1 \cos \theta')^2 h 10^{0,869 \frac{\pi k_2}{\lambda} \operatorname{tg} \delta_1}}.$$

Сигнал, который упадет на внутреннюю границу стены, будет преломляться под углом θ_2 :

$$P_C = T_2^2 P_B',$$

где T_2 – коэффициент Френеля, коэффициент преломления сигнала от внутренней границы стены [10]

$$T_2 = \frac{2Z_1 \cos \theta_1}{Z_1 \cos \theta_1 + Z_1 \cos \theta_2},$$

Тогда мощность сигнала на выходе стены (на внешней поверхности среды 2) будет

$$P_C = \frac{\lambda^2 P_A Z_2^2 Z_1^2 \cos^2 \phi \cos^3 \theta_1}{4\pi^2 R_1^2 (Z_2 \cos \phi + Z_1 \cos \theta')^2 (Z_1 \cos \theta_1 + Z_1 \cos \theta_2)^2 h 10^{0,869 \frac{\pi k_2}{\lambda} \operatorname{tg} \delta_1}}.$$

Сигнал в точке P_C' будет

$$P_C' = \frac{P_C}{a_{2II}},$$

где $a_{II}'' = h_2 a_{2II}' = \frac{h' 10^{0,869 \frac{\pi k_2}{\lambda} \operatorname{tg} \delta_2}}{\cos \theta_2}$, $h_1 = \frac{h'}{\cos \theta_2}$.

Тогда

$$P_C' = \frac{\lambda^2 P_A Z_2^2 Z_1^2 \cos^2 \phi \cos^3 \theta_1 \cos \theta_2}{\pi^2 R_1^2 (Z_2 \cos \phi + Z_1 \cos \theta')^2 h' 10^{0,869 \frac{\pi k_2}{\lambda} \operatorname{tg} \delta_2} (Z_1 \cos \theta_1 + Z_1 \cos \theta_2)^2 h 10^{0,869 \frac{\pi k_2}{\lambda} \operatorname{tg} \delta_1}}.$$

Сигнал в точке P_D , который появится как преломленный от источника в точке P_C' , будет иметь мощность

$$P_D = T_3^2 P_C'$$

где T_3 – коэффициент Френеля, коэффициент преломления сигнала от внутренней границы стены

$$T_3 = \frac{2Z_2 \cos \theta_2}{Z_2 \cos \theta_2 + Z_3 \cos \theta_3}.$$

Тогда P_D будет равно:

$$P_D = \frac{4\lambda^2 P_A Z_2^4 Z_1^2 \cos^2 \phi \cos^3 \theta_1 \cos^2 \theta_2}{\pi^2 R_1^2 (Z_2 \cos \phi + Z_1 \cos \theta')^2 h^2 10^{0,869 \frac{\pi k_3}{\lambda} \text{tg} \delta_2} (Z_1 \cos \theta_1 + Z_1 \cos \theta_2)^2 (Z_2 \cos \theta_2 + Z_3 \cos \theta_3)^2 h^2 10^{0,869 \frac{\pi k_2}{\lambda} \text{tg} \delta_1}}.$$

Сигнал в точке P_D' будет распространяться в полусфере над поверхностью стены с затуханием

$$L_2 = \frac{8\pi^2 R_2^2}{\lambda^2}.$$

Тогда сигнал в точке P_D' , который появится как преломленный от источника в точке P_D , будет иметь мощность

$$P_D' = \frac{P_D}{L_3} = \frac{4\lambda^2 P_A Z_2^4 Z_1^2 \cos^2 \phi \cos^3 \theta_1 \cos^3 \theta_2}{2\pi^4 R_1^2 R_2^2 (Z_2 \cos \phi + Z_1 \cos \theta')^2 h^2 10^{0,869 \frac{\pi k_3}{\lambda} \text{tg} \delta_2} (Z_1 \cos \theta_1 + Z_1 \cos \theta_2)^2 (Z_2 \cos \theta_2 + Z_3 \cos \theta_3)^2 h^2 10^{0,869 \frac{\pi k_2}{\lambda} \text{tg} \delta_1}}. \quad (5)$$

Исходя из формулы (5), определим соотношения исходного сигнала к конечному при прохождении его сквозь препятствие

$$L_D' = \frac{P_D'}{P_A} = \frac{2\lambda^2 Z_2^4 Z_1^2 \cos^2 \phi \cos^3 \theta_1 \cos^3 \theta_2}{\pi^4 R_1^2 R_2^2 (Z_2 \cos \phi + Z_1 \cos \theta')^2 h^2 10^{0,869 \frac{\pi k_3}{\lambda} \text{tg} \delta_2} (Z_1 \cos \theta_1 + Z_1 \cos \theta_2)^2 (Z_2 \cos \theta_2 + Z_3 \cos \theta_3)^2 h^2 10^{0,869 \frac{\pi k_2}{\lambda} \text{tg} \delta_1}}. \quad (6)$$

В случае, когда среда 1 воздух ($\mu_1 = \epsilon_1 = 1$), а среда 2 и 3 немагнитный ($\mu = 1$) диэлектрик и сигнал от излучателя в точке А будет падать на стенку вертикально ($\phi = 0$), из формулы (6) получим

$$L_D' = \frac{P_D'}{P_A} = \frac{\lambda^2 Z_2^4}{2\pi^4 R_1^2 R_2^2 (Z_2 + 1)^2 (Z_2 + Z_3)^2 h^2 10^{0,869 \frac{\pi k_3}{\lambda} \text{tg} \delta_2} h^2 10^{0,869 \frac{\pi k_2}{\lambda} \text{tg} \delta_1}}.$$

В качестве примера рассмотрим прохождение радиосигнала сквозь двухслойную стену (2 слой – кирпич, 3 – гипсокартонная плита) и зададим следующие исходные значения преграды и среды: среда 1 и 4 – воздух, $\mu_1 = \epsilon_1 = 1$; среда 2- кирпичная стена толщиной $h = 0.25\text{м}$, $\mu_1 = 1$, $\epsilon_1 = 5.86$, $\text{tg} \delta = 1,16 \cdot 10^{-1}$; среда 3 – гипсокартонная плита толщиной $h = 0.01\text{м}$, $\mu_1 = 1$, $\epsilon_1 = 1.07$, $\text{tg} \delta = 4,29 \cdot 10^{-1}$; расстояние от изотропного излучателя до стены $R_1 = 2\text{м}$, приемник D размещен на расстоянии 2м от стены, $R_2 = 2\text{м}$; длина волны радиосигнала $\Lambda = 0.33\text{м}$ для GSM 900.

Подставив в формулу (6) исходные данные преграды и среды, получим значения затухания для различных углов падения электромагнитной волны на кирпичную стену (Табл. 1).

Табл. 1

№	Угол падения	Затухания
1	0°	-64.1 дБ
2	30°	-64.5 дБ
3	45°	-65.2 дБ
4	60°	-66.8 дБ
5	70°	-69.3 дБ
6	80°	-74.5 дБ

График зависимости затухания электромагнитной волны от угла падения приведен на Рис. 2.

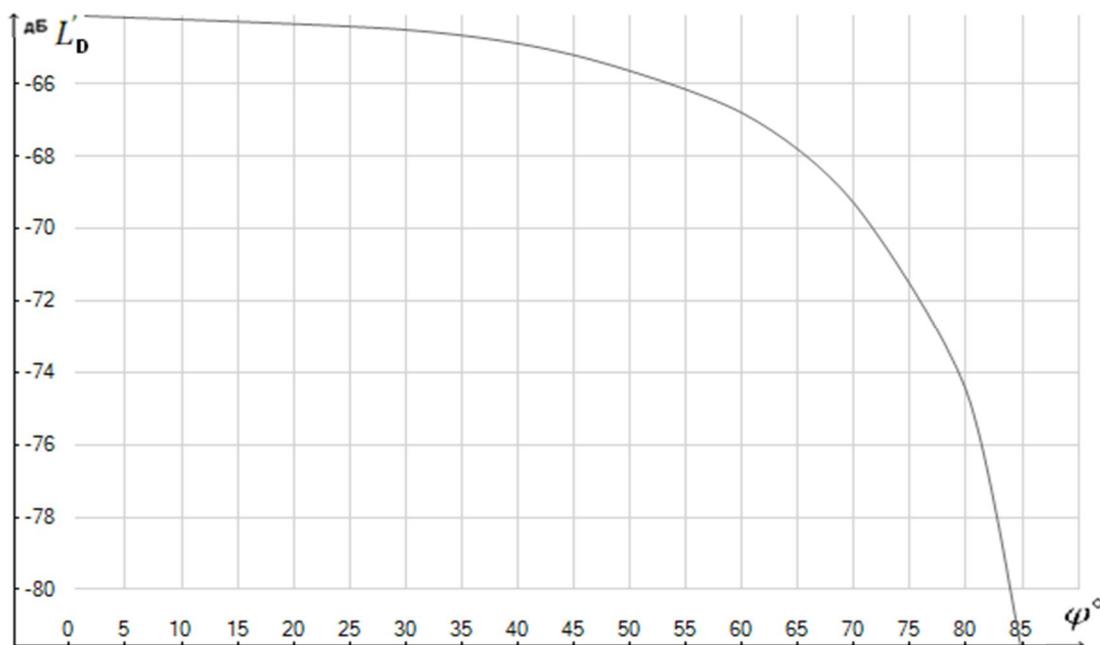


Рис. 2. Зависимость затухания электромагнитной волны от угла падения

Следует заметить, что реальное затухание сигнала позволит нормально работать в помещении мобильным телефонам стандарта GSM 900, чувствительность которых составляет -108 дБм ($10^{-13,8}$ Вт).

При выполнении расчетов следует использовать значения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь в диапазоне 2...7 ГГц для некоторых материалов (Табл. 2) [12].

III. Выводы

1. При прохождении сигнала через стену он претерпевает изменение направления и затухание (потери). Причем, изменение направления и затухание сигнала определяется диэлектрической проницаемостью материалов стены: угол отклонения тем больше, чем больше диэлектрическая проницаемость.

2. Реальное затухание сигнала в помещении из-за наличия препятствия в виде двухслойной стены позволит нормально работать мобильному телефону стандарта GSM 900 с чувствительностью -108 дБ ($10^{-13,8}$ Вт) даже с запасом энергии до 60 дБ.

3. Полученные формулы могут быть использованы при выполнении расчетов затухания сигнала в двухслойной стене из различных материалов с использованием характеристик материалов.

Табл. 2

Материал	Относительная диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла потерь
Оргстекло	2,74	$3,2 \cdot 10^{-4}$
Жалюзи (закрытые)	1,96	$5,96 \cdot 10^{-5}$
Красный кирпич (сухой)	5,86	$1,16 \cdot 10^{-1}$
Красный кирпич (влажный)	5,92	$1,17 \cdot 10^{-1}$
Ковер	1,32	$5,96 \cdot 10^{-4}$
Потолочное покрытие	1,32	$1,44 \cdot 10^{-2}$
Ткань	1,49	$5,96 \cdot 10^{-5}$
Стекловолокно	1,02	$9,21 \cdot 10^{-4}$
Стекло	6,38	$2,6 \cdot 10^{-2}$
Линолеум	3,08	$1,45 \cdot 10^{-3}$
Хвойная доска	2,58	$2,0 \cdot 10^{-1}$
ДСП	2,7	$1,1 \cdot 10^{-1}$
Фанера	2,47	$1,27 \cdot 10^{-1}$
Гипсовая плита	1,07	$4,29 \cdot 10^{-1}$
Кафель	3,08	$5,88 \cdot 10^{-2}$
Толь	2,47	$3,86 \cdot 10^{-2}$

Литература

1. Чернышев В. П., Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства. Учебник для техникумов / В. П. Чернышев, Д. И. Шейнман. – М.: Радио и связь, 1989г.
2. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн / [Г. А.Ерохин, О. В.Чернышев, Н. Д. Козырев, В. Г. Кочержевский] / – М.: Радио и связь, 1996 г.
3. Смелянский А. А. Распространение радиосигнала через препятствие / А. А. Смелянский // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2013. – № 2(26). – С. 86-91.
4. Долуханов М. П. Распространение радиоволн / М. П. Долуханов / – М.: Связь, 1972 г.
5. Грудинская Г. П. Распространение радиоволн / Г. П. Грудинская. – М.: Высшая школа, 1975 г.
6. Смелянский А. А. Особенности использования фемтосот в сетях мобильной связи / А. А. Смелянский // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2013. – № 4(28). – С.68-72.
7. Кантор Л. Я. Спутниковая связь и вещание: Справочник / Л. Я. Кантор. – М.: Радио и связь, 1988. – 345 с.
8. Пименов В. Ю. Техническая электродинамика / В. Ю Пименов, В. И. Вольман, А. Д. Муравцов. – М.: Радио и связь, 2000. – 536 с.
9. Родос Л. Я. Электродинамика и распространение радиоволн (Распространение радиоволн): учеб.-метод. комплекс (учебное пособие) / Л. Я. Родос. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2007. – 90 с.
10. Баскаков С. И. Электродинамика и распространение радиоволн / С. И., Баскаков. – М: Высшая школа, 1992. – 416с.
11. Гроднев И. И. Линии связи / И. И. Гроднев, С. М. Верник. – М.: Радио и связь, 1988. – 544 с.
12. Гавриленко В. Г. Распространение радиоволн в современных системах мобильной связи / В. Г. Гавриленко, В. А. Яшнов. – Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, радиофизический факультет, кафедра радиоастрономии и распространения радиоволн. –2003. – 148 с.