

УДК 621.39

**ОЦЕНКА ЗАТУХАНИЯ РАДИОСИГНАЛА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ СТЕНУ**

А.И. СЕМЕНКО, А.А. СМЕЛЯНСКИЙ

*Государственный университет телекоммуникаций  
Соломенская, 7, 03680, г. Киев, Украина**Поступила в редакцию 23 января 2014*

Приведены результаты исследования прохождения радиосигнала через стену типового помещения: офиса, квартиры, склада и т.д. Получены формулы для оценки затухания сигнала и изменения направления его распространения в зависимости от диэлектрической проницаемости материала стены.

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

**Введение**

При проектировании телекоммуникационных систем (ТКС), предназначенных для работы в помещении, в частности ТКС на основе фемтосоты, важной задачей является оценка затухания радиосигнала при прохождении через препятствия – стены, двери, окна, межповерхностные перекрытия и проч. При этом необходимо учесть тип строительного материала, используемого для создания конструкции.

В общем случае определение мощности сигнала на входе приемника фемтосоты от передатчика мобильного телефона, находящегося в помещении за стеной, требует рассмотрения всего электрического поля в помещении на основе теории электродинамики, что связано с очень большими трудностями. Вместе с тем важно определить затухание сигнала при прохождении его через стену. Для этого на основе принципов геометрической оптики условно можно рассмотреть прохождение через стену воображаемого узкого луча, который падает на поверхность стены под произвольным углом  $\varphi$ .

**Оценка затухания радиосигнала**

Рассмотрим общий случай, когда радиосигнал излучается изотропным источником из точки  $A$  мощностью  $P_A$  под некоторым углом к внешней поверхности стены  $\varphi$  (рис. 1).

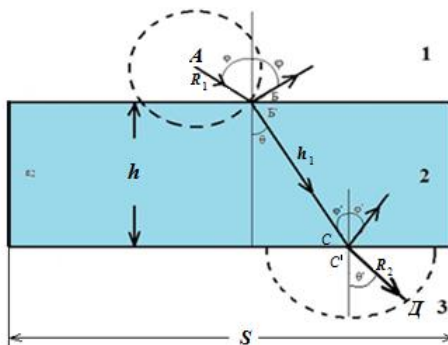


Рис. 1. Особенности прохождения радиосигнала через препятствие

В качестве излучателя радиосигнала используем мобильный телефон стандарта GSM 900, допуская, что он имеет всенаправленную диаграмму направленности антенны, то есть приблизительно его можно считать изотропным излучателем.

Радиосигнал от изотропного излучателя в точке А будет распространяться внутри воображаемой сферы с радиусом  $R_1$  (среда 1).

Тогда на внешнюю поверхность стены в точке Б будет падать сигнал с мощностью  $P_{нб} = \frac{P_A}{L_1}$ , где  $L_1$  – затухание сигнала в свободном пространстве [1];

$$L_1 = \frac{16\pi^2 R_1^2}{\lambda^2}, \text{ где } \lambda - \text{длина волны.}$$

Тогда  $P_{нб} = \frac{\lambda^2 P_A}{16\pi^2 R_1^2}$ . В зависимости от характеристик поверхности стены часть сигнала будет преломляться под углом  $\theta$  с мощностью  $P_{Б'} = T_1^2 P_{нб}$  [2], где  $T_1$  – коэффициент преломления сигнала от стены (коэффициент Френеля для нормальной поляризации) [3]:

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

где  $Z_1, Z_2$  – характеристические сопротивления сред 1 и 2 соответственно  $Z_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}}, Z_2 = \sqrt{\frac{\mu_2}{\epsilon_2}}$ ,

где  $\epsilon_1, \epsilon_2, \mu_1, \mu_2$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости материала сред.

Для частного случая, когда средой 1 служит вакуум или воздух ( $\mu_1 = \epsilon_1 = 1$ ), а средой 2 – немагнитный ( $\mu_2 = 1$ ) диэлектрик с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ ,

формула (1) примет вид  $T_1 = \frac{2 \cos \varphi}{\cos \varphi + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \varphi}}$  [4].

Величина мощности сигнала на внутренней границе стены в точке Б' будет

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

В зависимости от материала внутри стены (среда 2) радиосигнал идет к точке С' на внутреннюю границу стены под углом  $\theta$ .

Угол  $\theta$  найдем с использованием закона Снеллиуса (Снеля) [2]:

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

где  $k_1$  и  $k_2$  – показатели преломления сред 1,2:  $k_1 = \sqrt{\epsilon_1 \mu_1}, k_2 = \sqrt{\epsilon_2 \mu_2}$ .

Тогда из формулы (2) получим

$$\sin \theta = \frac{\sqrt{\epsilon_1 \mu_1} \sin \varphi}{\sqrt{\epsilon_2 \mu_2}}, \quad (3)$$

$$\theta = \arcsin \frac{\sqrt{\epsilon_1 \mu_1} \sin \varphi}{\sqrt{\epsilon_2 \mu_2}}. \quad (4)$$

Для расчета потерь сигнала, который приходит от точки Б' под углом  $\theta$  в точку С, используем логарифмическую единицу  $a_n$  – погонное затухание [5], которое измеряется в децибелах на метр (дБ/м) и определяется по формуле  $a_n = 8,69 \frac{\pi k_2}{\lambda} \text{tg} \delta$  [дБ/м] или

$$a'_n = 10^{\frac{8,69 \pi k_2}{\lambda} \text{tg} \delta} [1/\text{м}], \text{ где } \text{tg} \delta - \text{тангенс угла диэлектрических потерь в среде 2.}$$

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

$$h_1 = \frac{h}{\cos \theta}. \quad (5)$$

Затухание сигнала в диэлектрике равно

$$a''_n = h_1 a'_n = \frac{h10^{8.69 \frac{\pi k_2}{\lambda} \text{tg} \delta}}{\cos \theta}. \quad (6)$$

Мощность сигнала в точке С ( $P_{nC}$ ) с использованием формул (5), (6) будет

$$P_{nC} = \frac{P_{B'}}{a''} = \frac{P_A \lambda^2 Z_2^2 \cos^2 \varphi \cos \theta}{4\pi^2 R_1^2 h10^{8.69 \frac{\pi k_2}{\lambda} \text{tg} \delta} (Z_2 \cos \varphi + Z_2 \cos \theta)^2}.$$

Сигнал, который упадет на внутреннюю границу стены, будет преломляться под углом  $\theta'$ :  $P_{C'} = T_2^2 P_{nC}$ , где  $T_2$  – коэффициент Френеля – коэффициент преломления сигнала от

$$\text{внутренней границы стены [4]} \quad T_2 = \frac{2Z_1 \cos \theta}{Z_1 \cos \theta + Z_2 \cos \theta'}.$$

Угол  $\theta'$  найдем с использованием закона Снеллиуса (Снеля) [2]:

$$k_2 \sin \theta = k_1 \sin \theta'. \quad (7)$$

Тогда из формул (7) и (3) получим

$$\sin \theta' = \sin \varphi. \quad (8)$$

Следовательно, угол  $\theta'$  равняется углу  $\varphi$ . Тогда мощность сигнала на выходе стены (на внешней поверхности) будет

$$P_{C'} = \frac{P_A \lambda^2 Z_1^2 Z_2^2 \cos^2 \varphi \cos^3 \theta}{\pi^2 R_1^2 (Z_2 \cos \varphi + Z_2 \cos \theta)^2 (Z_1 \cos \theta + Z_2 \cos \theta')^2 h10^{8.69 \frac{\pi k_2}{\lambda} \text{tg} \delta}}. \quad (9)$$

Сигнал в точке С' с мощностью  $P_{C'}$  будет распространяться в полусфере над поверхностью стены (среда 3) с затуханием

$$L_3 = \frac{8\pi^2 R_2^2}{\lambda^2}.$$

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

$$P_{Д} = \frac{P_{C'}}{L_3}. \quad (10)$$

Учитывая формулы (7), (8), (9), (10) получим

$$P_{Д} = P_A \frac{\lambda^4 Z_1^2 Z_2^2 \cos^2 \varphi \cos^3 (\arcsin \frac{\sqrt{\epsilon_1 \mu_1} \sin \varphi}{\sqrt{\epsilon_2 \mu_2}})}{8\pi^4 R_1^2 R_2^2 \left[ Z_2 \cos \varphi + Z_2 \cos \left( \arcsin \frac{\sqrt{\epsilon_1 \mu_1} \sin \varphi}{\sqrt{\epsilon_2 \mu_2}} \right) \right]^2 \left[ Z_1 \cos \left( \arcsin \frac{\sqrt{\epsilon_1 \mu_1} \sin \varphi}{\sqrt{\epsilon_2 \mu_2}} \right) + Z_2 \cos \varphi \right]^2 h10^{8.69 \frac{\pi k_2}{\lambda} \text{tg} \delta}}. \quad (11)$$

Исходя из формулы (11) определим отношение исходного сигнала к конечному при прохождении его сквозь препятствие, то есть затухание сигнала на данном пути

$$L_{Д} = \frac{P_{Д}}{P_A} = \frac{\lambda^4 Z_1^2 Z_2^2 \cos^2 \varphi \cos^3 (\arcsin \frac{\sqrt{\epsilon_1 \mu_1} \sin \varphi}{\sqrt{\epsilon_2 \mu_2}})}{8\pi^4 R_1^2 R_2^2 \left[ Z_2 \cos \varphi + Z_2 \cos \left( \arcsin \frac{\sqrt{\epsilon_1 \mu_1} \sin \varphi}{\sqrt{\epsilon_2 \mu_2}} \right) \right]^2 \left[ Z_1 \cos \left( \arcsin \frac{\sqrt{\epsilon_1 \mu_1} \sin \varphi}{\sqrt{\epsilon_2 \mu_2}} \right) + Z_2 \cos \varphi \right]^2 h10^{8.69 \frac{\pi k_2}{\lambda} \text{tg} \delta}}. \quad (12)$$

В случае, когда среда 1 – воздух ( $\mu_1 = \epsilon_1 = 1$ ), а среда 2 – немагнитный диэлектрик ( $\mu_2 = 1$ ), формулы (11), (12) примут вид

$$P'_{Д} = P_A \frac{\lambda^4 \cos^2 \varphi \cos^3 (\arcsin \frac{\sin \varphi}{\sqrt{\epsilon_2}})}{8\pi^4 R_1^2 R_2^2 \left[ \cos \varphi + \sqrt{\epsilon_2 - \sin^2 \varphi} \right]^2 \left[ \cos \left( \arcsin \frac{\sin \varphi}{\sqrt{\epsilon_2}} \right) + \frac{1}{\sqrt{\epsilon_2}} \cos \varphi \right]^2 h10^{8.69 \frac{\pi \sqrt{\epsilon_2}}{\lambda} \text{tg} \delta}}, \quad (13)$$

$$L'_{\text{д}} = \frac{P_{\text{д}}}{P_{\text{А}}} = \frac{\lambda^4 \cos^2 \varphi \cos^3 \left( \arcsin \frac{\sin \varphi}{\sqrt{\varepsilon_2}} \right)}{8\pi^4 R_1^2 R_2^2 \left[ \cos \varphi + \sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \varphi} \right]^2 \left[ \cos \left( \arcsin \frac{\sin \varphi}{\sqrt{\varepsilon_2}} \right) + \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_2}} \cos \varphi \right]^2} h 10^{\frac{8.69 \pi \sqrt{\varepsilon_2} \operatorname{tg} \delta}{\lambda}} \quad (14)$$

В качестве примера рассмотрим прохождение радиосигнала сквозь кирпичную стену и зададим следующие исходные значения преграды и среды: среды 1 и 3 – воздух,  $\mu_1 = \varepsilon_1 = 1$ ; среда 2 – кирпичная стена толщиной  $h = 0,25$  м,  $\mu_1 = 1$ ,  $\varepsilon_1 = 5,86$ ,  $\operatorname{tg} \delta = 1,16 \cdot 10^{-1}$ ; расстояние от изотропного излучателя до стены  $R_1 = 2$  м, приемник Д размещен на расстоянии 2 м от стены,  $R_2 = 2$  м; длина волны радиосигнала  $\lambda = 0,33$  м для GSM 900.

Подставив в формулу (12) исходные данные преграды и среды, получим значения затухания для различных углов падения электромагнитной волны на кирпичную стену (таблица).

**Затухание радиоволны при разных углах падения на препятствие**

№	Угол падения $\varphi$	Затухание
1	0°	-61 дБ
2	30°	-61,3 дБ
3	45°	-62 дБ
4	60°	-63,7 дБ
5	70°	-66 дБ
6	80°	-71 дБ

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

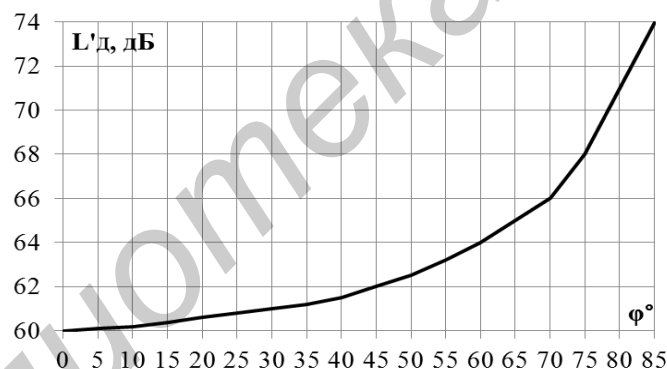


Рис. 2. Зависимость затухания электромагнитной волны от угла падения

### Определение мощности сигнала на входе приемника фемтосоты

Будем рассматривать наиболее общий случай, когда мобильный телефон как изотропный излучатель с всенаправленной диаграммой направленности будет находиться в любой точке А по отношению к стене длиной  $S$  (рис. 3).

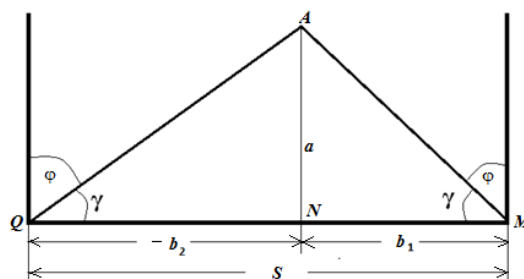


Рис. 3. Особенности расположения источника излучения относительно стены

Приближенно будем считать, что конечная точка  $C$  будет находиться на конце стены длиной  $S$ . Значения углов определим из рис. 3:  $\gamma = \arctg \frac{a}{x}$ ,  $-b_2 \leq x \leq b_1$ ,  $\varphi = 90^\circ - \gamma$ . Путем суммирования мощностей всех условных узких лучей, расположенных вплотную друг к другу, можем приближенно определить суммарную мощность сигнала, поступающего на вход приемника фемтосоты по формуле, полученной из соотношения (13):

$$P'_d = P_A \frac{\lambda^4 \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \cos^2 \varphi d\varphi \times \cos^3 \left( \arcsin \frac{\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin \varphi d\varphi}{\sqrt{\varepsilon_2}} \right)}{8\pi^4 R_1^2 R_2^2 \left[ \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \cos \varphi d\varphi + \sqrt{\varepsilon_2 - \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin^2 \varphi d\varphi} \right]^2 \left[ \cos \left( \arcsin \frac{\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin \varphi d\varphi}{\sqrt{\varepsilon_2}} \right) + \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_2}} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \cos \varphi d\varphi \right]^2 h 10^{8.69 \frac{\pi \sqrt{\varepsilon_2}}{\lambda} \text{tg} \delta}} \quad \text{где}$$

$$\varphi_1 = 90^\circ - \arctg \frac{a}{b_1}, \varphi_2 = 90^\circ - \arctg \left( -\frac{a}{b_2} \right).$$

### Выводы

При прохождении радиосигнала через стену он претерпевает затухание (потери) и изменение направления, которые определяются диалектической проницаемостью материала стены: угол отклонения тем больше, чем больше диэлектрическая проницаемость.

Реальное затухание сигнала в помещении из-за наличия препятствия в виде стены позволяет нормально работать мобильному телефону стандарта GSM 900 с чувствительностью  $-108$  дБм ( $10^{-13.8}$  Вт) даже с запасом энергии.

Полученные формулы могут быть использованы для приближенного определения затухания сигнала в однослойной стене из различных материалов, а также суммарной мощности сигнала на входе приемника фемтосоты.

## ATTENUATION RADIO PASS THROUGH A WALL

A.I. SEMENKO, A.A. SMELYANSKIY

### Abstract

The results of investigation of a radio signal through the wall of the main living room: office, apartment, warehouse are given. The formulas for determining the attenuation of the signal and changes its direction of propagation depends on the dielectric constant of the material wall.

### Список литературы

1. Кантор Л.Я. Спутниковая связь и вещание: Справочник. М., 1988.
2. Пименов В.Ю., Вольман В.И., Муравцов А.Д. Техническая электродинамика. М., 2000.
3. Родос Л.Я. Электродинамика и распространение радиоволн. СПб, 2007.
4. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн. М, 1992.
5. Гроднев И.И. Верник С.М. Линии связи. М., 1988.
6. Гавриленко В.Г., Яшинов В.А. Распространение радиоволн в современных системах мобильной связи. Нижний Новгород, 2003.