

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ СИГНАЛА  
В РАДИОКАНАЛЕ ЛОКАЛЬНЫХ САРД. Ч2**

Настоящая статья – продолжение работы [1]. В ней рассмотрены актуальные вопросы выяснения закономерностей распространения радиоволн локальных систем абонентского радиодоступа (САРД) в помещении.

Цель работы состоит в теоретическом определении и экспериментальной проверке выражения для коэффициента затухания мощности сигнала радиоволн в помещении с учетом отражений от стен пола и потолка для САРД протокола 802.11b.

**Модель радиотрассы САРД с несколькими отражающими поверхностями в ближней зоне**

Рассмотрим модель ослабления сигнала САРД в помещении. Будем считать, что помещение имеет прямоугольную форму (рис. 1). Линия 1 – 2 – это пол, 3 – 4 – потолок, 1 – 3 и 2 – 4 – это передняя и задняя стены, а линии 5 – 6 и 7 – 8 являются боковыми стенами помещения. Все указанные поверхности выполнены из одного однородного материала и на рабочей частоте САРД выполняется критерий Релея. Предположим, что при таких условиях применима, как и в [1, п. 1] отражательная трактовка в приближении отсутствия отражений от задней и передней стенок комнаты, т.к. установленные в точках А и В антенны однонаправленные. Эта идеализация в достаточной мере выполняется в антеннах, установленных на крышках ноутбуков.

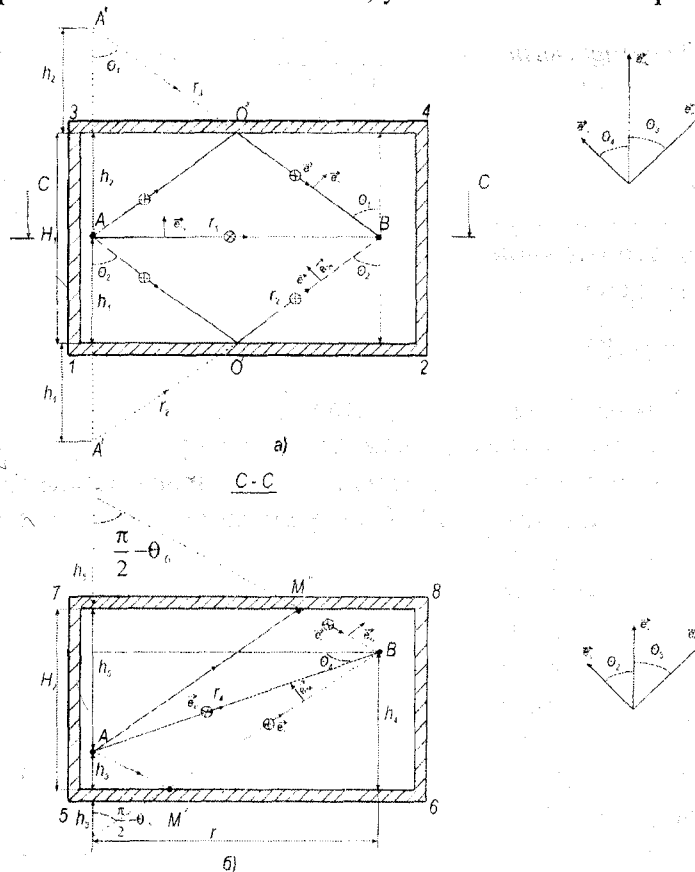


Рис. 1

В силу указанной в [1, п. 1] особенности САРД будем также полагать, что точки передачи А и приема В находятся в ближней зоне системы излучателей, образованной точкой А и ее зеркальным изображением. Точки А и В имеют одну и ту же высоту  $h_1$  относительно пола, но относительно боковых стен расположены произвольно ( $h_3 \neq h_4$ ),

Общее выражение для результирующей напряженности электрического поля в точке  $B$  имеет вид

$$\dot{\vec{E}}_p = \dot{\vec{E}}_{np} + \sum_{i=1}^N \dot{\vec{E}}_i, \quad N=1...4, \quad (1)$$

где  $\dot{\vec{E}}_p$  – результирующая напряженность поля прямого луча  $\dot{\vec{E}}_{np}$  и отраженных лучей от пола, потолка и боковых стен  $\dot{\vec{E}}_i$ .

Если принять вначале, что излучается сигнал горизонтальной (относительно пола и потолка) поляризации, то отраженные от боковых стен лучи будут иметь вертикальную поляризацию. В этом случае выражение (1) запишется таким образом:

$$\dot{\vec{E}}_{pH} = \dot{\vec{E}}_I + \dot{\vec{E}}_B = \bar{e}_{pH} \cdot \dot{E}_I + \bar{e}_{pV} \cdot \dot{E}_B,$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_I &= \sqrt{60P_\Sigma} \left( \frac{e^{-ikr_1}}{r_1} + \dot{R}_I \left( \frac{e^{-ikr_2}}{r_2} + \frac{e^{-ikr_3}}{r_3} \right) \right) \bar{e}_{pH} \approx \\ &\approx \sqrt{60P_\Sigma} \left( \frac{e^{-ikr_1}}{r_1} - R_I \left( \frac{e^{-ikr_2}}{r_2} + \frac{e^{-ikr_3}}{r_3} \right) \right) \bar{e}_{pH}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_B &= \sqrt{60P_\Sigma} \left( \frac{e^{-ikr_4}}{r_4} \cos \theta_4 + \dot{R}_B \left( \frac{e^{-ikr_5}}{r_5} \cos \theta_5 + \frac{e^{-ikr_6}}{r_6} \cos \theta_6 \right) \right) \bar{e}_{pV} \approx \\ &\approx \sqrt{60P_\Sigma} \left( \frac{e^{-ikr_4}}{r_4} \cos \theta_4 + R_B \left( \frac{e^{-ikr_5}}{r_5} \cos \theta_5 + \frac{e^{-ikr_6}}{r_6} \cos \theta_6 \right) \right) \bar{e}_{pV}. \end{aligned} \quad (3)$$

При записи (2) принято, что аргумент коэффициента отражения  $\arg \dot{R}_I$  для всех углов падения примерно равен  $\pi$ , а в (3)  $\arg \dot{R}_B \approx 0$ ,  $\dot{E}_{pH}$  – комплексная амплитуда напряженности электрического результирующего поля горизонтальной поляризации в точке  $B$ ;  $\bar{e}_{pH}$  – орт горизонтальной поляризации в точке  $B$ ,  $\dot{E}_B$  – комплексная амплитуда напряженности электрического результирующего поля вертикально поляризованного в точке  $B$ .

В выражении (3) принято:

$$\cos \theta_4 = \frac{r}{\sqrt{r^2 + (h_4 - h_3)^2}}, \quad \bar{e}_{pH} = \bar{e}_4 \cdot \cos \theta_4;$$

$$\cos \theta_5 = \frac{r}{\sqrt{r^2 + (h_4 + h_3)^2}}, \quad \bar{e}_{pH} = \bar{e}_5 \cdot \cos \theta_5; \quad (4)$$

$$\cos \theta_6 = \frac{r}{\sqrt{r^2 + [(H_2 - h_4) + h_3]^2}}, \quad \bar{e}_{pH} = \bar{e}_6 \cdot \cos \theta_6.$$

$\Pi_{pH}$  результирующего поля в точке  $B$ :

$$\begin{aligned} \Pi_{pH} &= \frac{1}{2Z_{co}} |E_{pH}|^2 = \frac{60P_\Sigma}{Z_{co}} \left\{ \left[ \frac{\cos kr}{r} - \frac{R_I \cos kr_2}{r_2} - \frac{R_I \cos kr_3}{r_3} + \frac{\cos kr_4}{r_4} \cos \theta_4 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + R_B \left( \frac{\cos kr_5}{r_5} \cos \theta_5 + \frac{\cos kr_6}{r_6} \cos \theta_6 \right) \right]^2 + \right. \\ &\quad \left. + \left[ -\frac{\sin kr}{r} + \frac{R_I \sin kr_2}{r_2} + \frac{R_I \sin kr_3}{r_3} + \frac{\sin kr_4}{r_4} \cos \theta_4 + R_B \left( \frac{\sin kr_5}{r_5} \cos \theta_5 + \frac{\sin kr_6}{r_6} \cos \theta_6 \right) \right]^2 \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $r_2 = \sqrt{r^2 + (2h_1)^2}$ ,  $r_3 = \sqrt{r^2 + (2h_2)^2}$ ,

$$r_4 = \sqrt{r^2 + (h_4 - h_3)^2}, \quad r_5 = \sqrt{r^2 + (h_4 + h_3)^2},$$

$$r_6 = \sqrt{r^2 + [(H_2 - h_4) + h_5]^2},$$

$Z_{Co}$  – характеристическое сопротивление свободного пространства.

Выражение (5) является интерференционной формулой, которая может быть представлена так:

$$\Pi_{pr} = \frac{60}{Z_{Co}} P_{\Sigma} \cdot I(r),$$

где  $I(r)$  – интерференционный множитель. Пример зависимости ненормированного интерференционного множителя от расстояния  $r$  приведен на рис. 2.

Этот график получен для случая помещения со следующими размерами:  $h_1 = 0,6\text{ м}$ ,  $h_2 = 4,5\text{ м}$ ,  $h_3 = 5,1\text{ м}$ ,  $h_4 = 5,1\text{ м}$ ,  $h_5 = 4,5\text{ м}$  и  $R_f = 0,8$  (см. рис. 1).

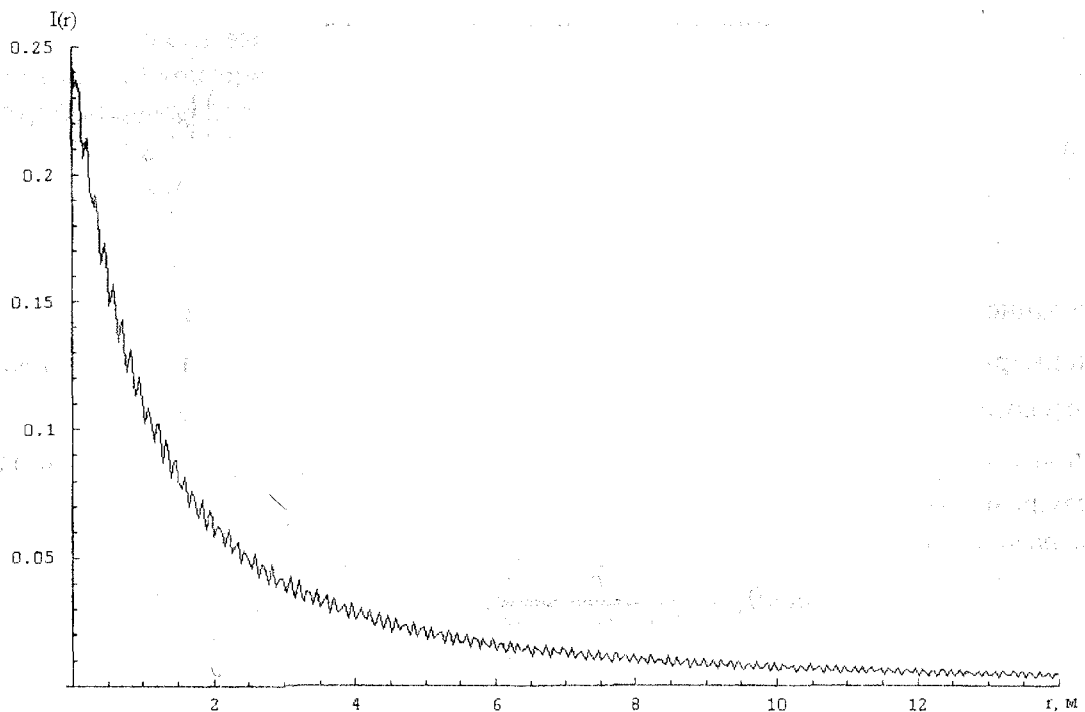


Рис. 2

Для выяснения справедливости развитой теории необходимо сопоставить экспериментальные и теоретические результаты исследований затухания в помещении от расстояния. Зависимость затухания  $\alpha_r(r)$  является огибающей функцией  $I(r)$ , которая может быть получена программным способом из выражения (7).

#### **Анализ результатов численных и натуральных экспериментов затуханий сигнала в радиоканале локальной САРД в помещении**

Ниже приведено сопоставление данных об ослаблении мощности сигнала в радиоканале локальной САРД, расположенной в помещении, полученных при проведении расчетов по предложенной модели и серии экспериментов.

Схема измерений представлена на рис. 1, а методика описана в [1, п. 2].

В ряде помещений, где проводился эксперимент, уровень сигнала на эталонном расстоянии  $r_0$  был весьма большой. Поскольку внутренние аттенюаторы в клиентских адаптерах (КА) отсутствуют, то удобный для опытов уровень сигнала в радиолинии достигался за счет того,

что один из КА помещался в камеру, выполненную из поглощающего материала. Экспериментальные исследования закономерности изменения ослабления сигнала от расстояния проводились в помещениях различных размеров. Одна из серий опытов была проведена в значительной по размерам антенной лаборатории с габаритными размерами 18x12x5,5 м. Объем этой лаборатории существенно заполнен учебным оборудованием СВЧ диапазона. Эскиз размещения оборудования и измерительной установки в лаборатории показан на рис. 3.

Условные обозначения

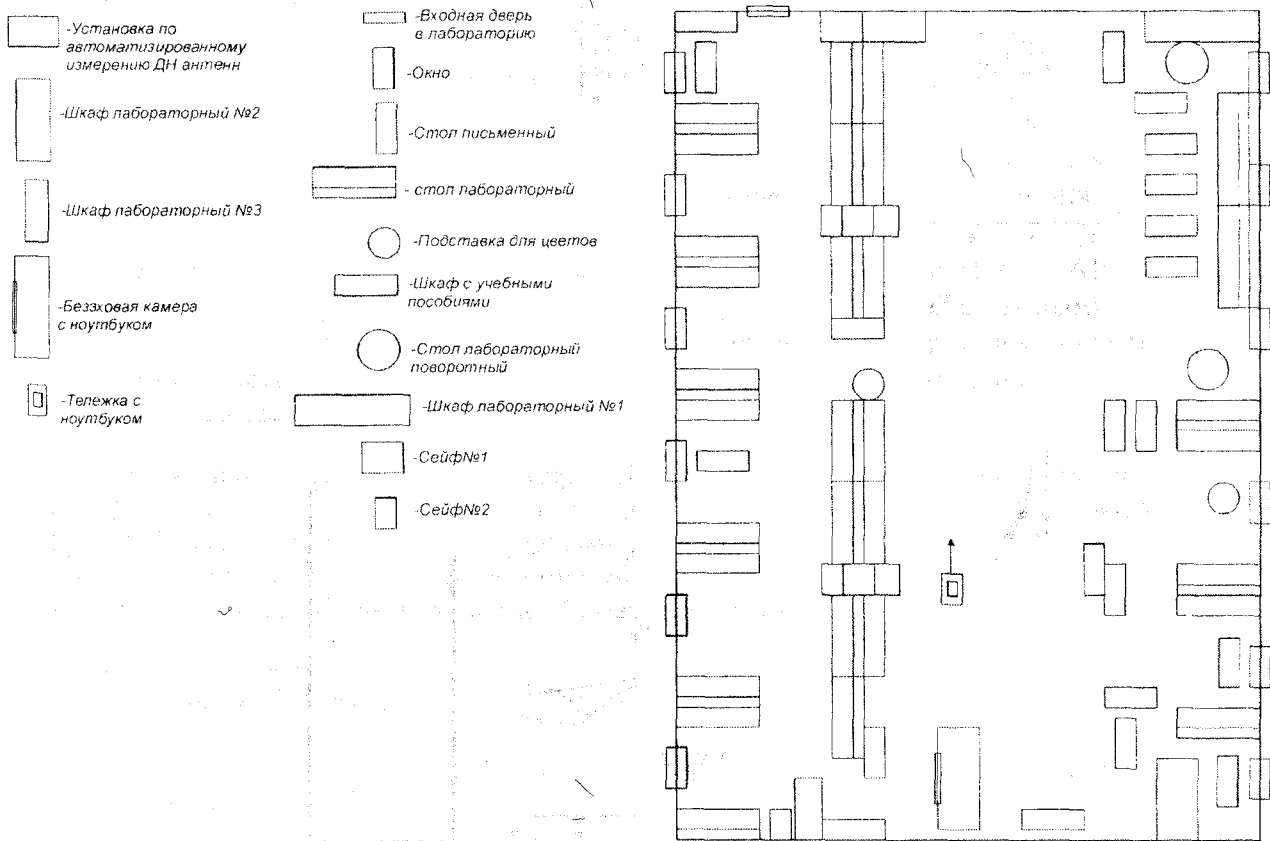


Рис. 3

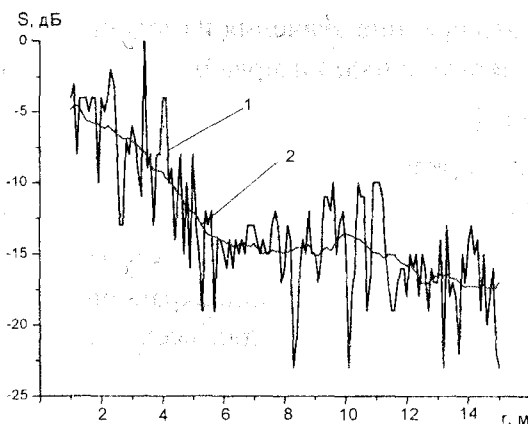


Рис. 4

На рис. 4–6 представлены графики зависимости сигнала  $S$  от расстояния  $r$ . Наличие многолучевости в лаборатории иллюстрируется графиками, приведенными на рис. 3. Кривая 1 – это (по терминологии [3]) суперпозиция мелкомасштабных и крупномасштабных замираний,

кривая 2 – локально средние замирания. Обработка выборки из десяти измерений проводилась также, как и в [1, п.2.2] с помощью распределения Стьюдента [4]. На рис. 5 и 6 показаны зависимости  $S(r)$  для высот поднятия антенн КА равных 0,6 м и 1,09 м.

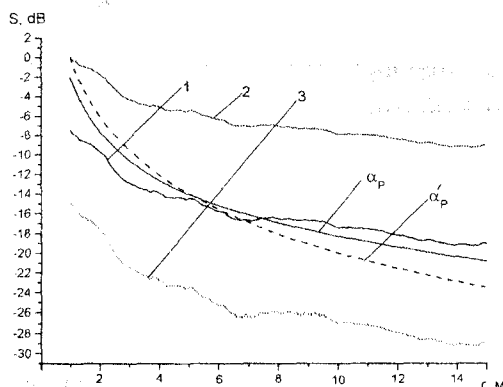


Рис. 5

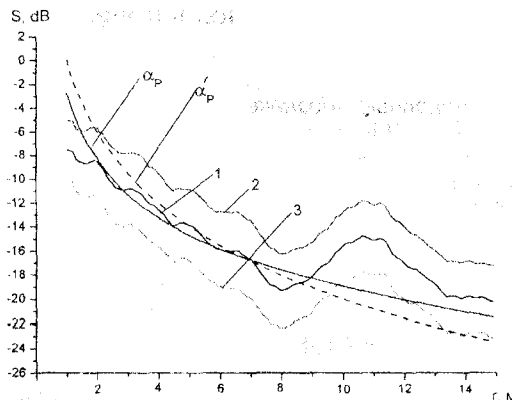


Рис. 6

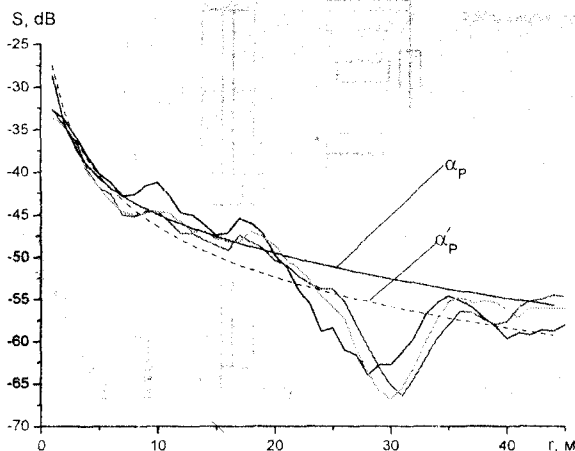


Рис. 7

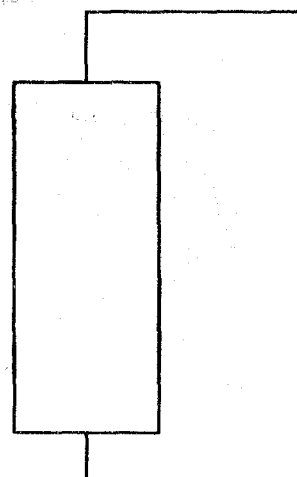


Рис. 8

Кривые 1 на рисунках – это средние значения измеренной величины, кривые 2,3 ограничивают верхний и нижний доверительный интервалы,  $\alpha_p$  – расчетная кривая по формуле (7), а расчеты  $\alpha'_p$  по формуле (7) [1].

Расчеты проводились при горизонтальной поляризации для следующих геометрических параметров  $h_1 = 0,6\text{ м}$ ,  $h_2 = 4,5\text{ м}$ ,  $h_3 = 5,1\text{ м}$ ,  $h_4 = 5,1\text{ м}$ ,  $h_5 = 4,5\text{ м}$  (см. рис. 1).

Для этого случая расстояние ближней зоны  $r_0 \approx 12\text{ м}$ . Из анализа структуры стен, пола и потолка, имеющих в своем составе металлические вкрапления и конструкции, было принято, что модуль коэффициента отражения  $R = 0.8$  для всех углов падения. Такое приближение можно принять, опираясь на материалы [2].

Из анализа представленных данных следует, что разработанная модель дает хорошее совпадение с результатом эксперимента и может быть применена на практике при расчете радиолиний локальных САРД в помещении. Сравнивая кривые  $\alpha_p$  и  $\alpha'_p$ , можно также сделать вывод о том, что учет влияния стен и потолка на процесс распространения радиоволн существенно улучшает достоверность анализа закономерности ослабления сигнала на трассе.

Описанные выше исследования проводились в помещении, отражающие поверхности которого мало отличаются друг от друга по электродинамическим параметрам, что собст-

венно и дает право применять отражательную трактовку. При наличии на трассе протяженных неоднородностей с сильно отличающимися коэффициентами отражения применение разработанной модели становится невозможным. Доказательством этого положения служат графики, приведенные на рис. 6. Здесь кривые 1,2,3 – результаты усредненных однократных измерений, а  $\alpha_p$  – это расчетная кривая. Упомянутые данные получены для протяженного помещения (коридора) при параметрах  $R_r = 0,8$ ;  $h = 0,6$  м.

Эскиз коридора приведен на рис. 8. Сопоставляя этот эскиз с данными рис. 7, нетрудно сделать вывод, что в месте ответвления коридора на лестничный марш результаты расчета и эксперимента явно не совпадают. По известным причинам именно в этом месте происходит резкий скачок электродинамических характеристик отражающей поверхности.

### Выводы

1. Полученные в [1] теоретические результаты, дополнены расчетными соотношениями для затухания сигналов САРД в помещениях, которые выведены в приближении отражательной трактовки.

2. Проведены экспериментальные исследования затуханий сигналов САРД протокола 802.11b в помещении; путем сравнительного анализа их результатов с данными вычислений доказана возможность практического применения разработанной приближенной модели при анализе характеристик локальных САРД, функционирующих в помещении при наличии многолучевости.

**Список литературы:** 1. Шокало В.М., Лихограй В.Г., Стрельницкий А.Е., Стрельницкий А.А., Роздоловский Ю.М., Бабанская Е.В. // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2005. №143. С. 143 – 150. 2. Грудинская Г.П. Распространение радиоволн. М. Высш. шк., 1975. 280с. 3. Бернард Скляр. Цифровая связь. Москва; СПб; Киев: Изд. дом «Вильямс», 2003. 1104 с. с ил. 4. Румицкий Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. М.: Наука, 1971. 192 с.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники  
Поступила в редколлегию 15.02.2006