

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 537.876;537.874;621.372;621.374

МОДЕЛЬ ЗАТУХАНИЯ МОЩНОСТИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ ВОЛНЫ В ПОМЕЩЕНИИ

© 2023 г. Ю. В. Андреев^{a, b, *, **}, М. М. Петросян^a^a Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125009 Российская Федерация^b Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Институтский пер., 9, Долгопрудный, Московская область, 141700 Российская Федерация

*E-mail: yuwa@cplire.ru

**E-mail: andreev.iuv@mipt.ru

Поступила в редакцию 28.11.2022 г.

После доработки 02.12.2022 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

Для исследования распространения сверхширокополосной волны внутри помещений предложена модель с парными отражениями от поверхностей, расположенных друг против друга. Показано, что в отличие от открытой местности многолучевая среда помещений по характеру затухания волны с расстоянием близка к свободному пространству. Благодаря этому энергетический резерв сверхширокополосной линии связи в помещении должен быть выше, чем на открытой местности.

DOI: 10.31857/S0033849423100042, EDN: DPIAXS

ВВЕДЕНИЕ

Основным параметром среды распространения, определяющим энергетический резерв линии связи, является показатель затухания n мощности сигнала P с расстоянием r : $P \sim r^{-n}$. В свободном пространстве показатель $n = 2$, однако на открытой местности на достаточном удалении от передатчика мощность сигнала в точке приема затухает примерно как r^{-4} , причем такое затухание сигнала характерно как для узкополосных [1], так и для сверхширокополосных (СШП) сигналов [2–4]. Это явление объясняется интерференцией в точке приема прямой волны и волны, отраженной от поверхности раздела сред “воздух–земля”, и хорошо описывается так называемой двухлучевой интерференционной моделью [1].

В рамках двухлучевой модели, при распространении радиоволны на открытой местности поле в точке приема формируется путем суммирования прямой волны $s(t)$ и волны $u(t)$, отраженной от поверхности земли (рис. 1а). На больших расстояниях r , при которых угол падения волны θ близок к 90° (соответственно, угол скольжения близок к 0°), волна отражается от земли с коэффициентом $R \approx -1$, поэтому $u(t) = s(t)R \approx -s(t)$ и прямая и отраженная волны в точке приема практически “гасят” друг друга. Как следствие, интерференционный множитель V , который связывает комплексную амплитуду электрического поля $\dot{E}$

в точке приема с комплексной амплитудой поля $\dot{E}_{m0}$ в свободном пространстве

$$\dot{E} = \dot{E}_{m0} V \quad (1)$$

зависит от расстояния как $1/r$ для амплитуды и как $1/r^2$ для мощности, что дает в этой модели итоговый показатель затухания $n = 4$ [1–4].

В то же время в моделях СШП-канала для стандартов IEEE 802.15.3а и 802.15.4а, построенных на основе массива экспериментов, для каналов связи с прямым лучом внутри помещений различного типа (офисных, жилых, промышленных) используются значения показателя затухания в диапазоне $n = 1.4...2$ [5, 6]. С чем связан разрыв значений показателей затухания n на открытой местности и в помещениях, можно ли сравнивать характеристики систем связи в этих средах распространения – чтобы ответить на эти вопросы, исследуем распространение СШП-сигнала в помещении с помощью простой модели, учитывающей парный характер основных отражений сигнала.

1. МОДЕЛЬ С ПАРНЫМИ ОТРАЖЕНИЯМИ

В отличие от открытой местности, распространение радиоволны в помещении сопровождается большим числом отражений, причем во многих случаях основными отражающими поверхностями являются главные конструктивные плоскости помещения, т.е. стены, пол и потолок. Поэтому в

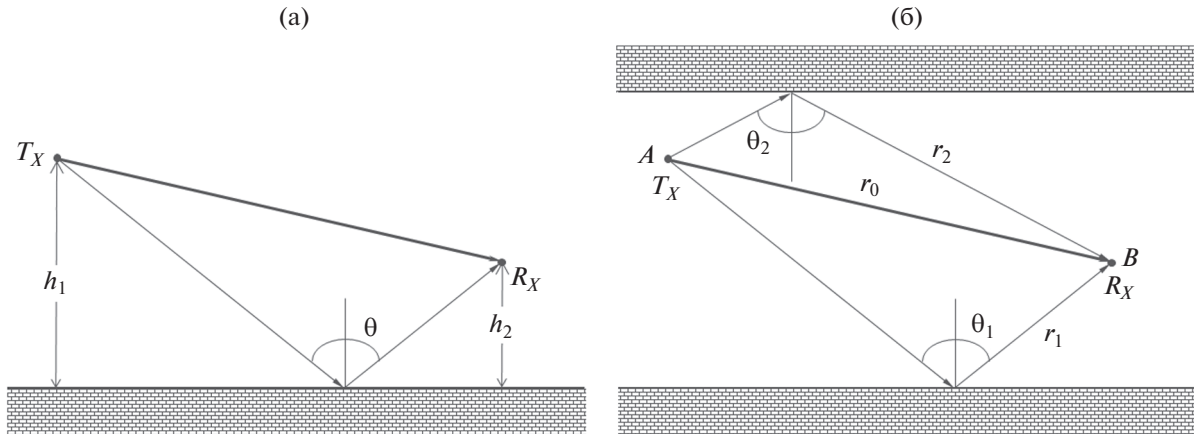


Рис. 1. Модели распространения радиоволны: а) над поверхностью Земли; б) в помещении.

точке приема прямая волна суммируется не с одной отраженной волной, а с волнами, отраженными от параллельных поверхностей: пол — потолок, противоположные стены. Таким образом, в каждой плоскости отражения помимо прямой волны имеется, как минимум, пара отраженных волн, образованных отражением от пары поверхностей, как показано на рис. 1б.

Интуитивно понятно, что в этом случае на больших расстояниях (при углах падения $\theta \approx 90^\circ$) прямая волна $s(t)$ и одна из двух отраженных волн $u(t)$ также гасят друг друга, однако при этом в точку приема приходит вторая отраженная волна $u(t) \approx -s(t)$. Поэтому, несмотря на интерференцию, не происходит ослабления мощности в точке приема, следовательно, показатель затухания n в этой ситуации должен быть не хуже, чем в свободном пространстве, т.е. $n \leq 2$.

Эти качественные рассуждения можно продемонстрировать на модели, описывающей взаимодействие прямой волны с парой отраженных волн (рис. 1б). Фактически будем исследовать распространение электромагнитной волны между двумя параллельными плоскостями (как будет понятно далее, требование параллельности не является обязательным). Для этого вычислим интерференционный множитель (1), подобно тому, как это делается в классической двухлучевой модели [1]. Интерференционный множитель удобен тем, что позволяет сосредоточиться на особенностях изменения показателя затухания мощности принятого сигнала на фоне квадратичного закона затухания $P \sim r^{-2}$, характерного для свободного пространства.

Выведем сначала выражение $V(\omega)$ для гармонической электромагнитной волны. Запишем комплексную амплитуду напряженности поля прямой волны $\dot{E}_{m0}$ в виде

$$\dot{E}_{m0} = \frac{\sqrt{60PG_0}}{r_0} F(\alpha_0) \exp(ikr_0), \quad (2)$$

где P — мощность излучения, $G_0 F^2(\alpha_0)$ — коэффициент усиления антенны с учетом диаграммы направленности, $F(\theta, \varphi, \omega)$ — диаграмма направленности по полю, α_0 — угол направления на точку B из точки A (рис. 1б), ω — угловая частота падающей волны, r_0 — длина прямого луча, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, λ — длина волны излучения [1].

Напряженность электрического поля отраженных волн равна

$$\dot{E}_{m1} = \frac{\sqrt{60PG_0}}{r_1} F(\alpha_1) \dot{R}_1(\theta_{1s}) \exp(i(kr_1 + \beta_1(\theta_{1s}))), \quad (3)$$

$$\dot{E}_{m2} = \frac{\sqrt{60PG_0}}{r_2} F(\alpha_2) \dot{R}_2(\theta_{2s}) \exp(i(kr_2 + \beta_2(\theta_{2s}))), \quad (4)$$

где R и β — модуль и фаза коэффициента отражения $\dot{R}(\theta_s)$, θ_s — угол падения, r_1 и r_2 — длины отраженных лучей; индексы 1 и 2 относятся к соответствующим отраженным волнам.

Результирующее поле в точке приема принимает вид

$$\begin{aligned} \dot{E}_{m\Sigma} = \\ = \dot{E}_{m0} \left[1 + \frac{F(\alpha_1)}{F(\alpha_0)} \dot{R}_1(\theta_{1s}) \exp(i(k\Delta r_1 + \beta_1(\theta_{1s}))) + \right. \\ \left. + \frac{F(\alpha_2)}{F(\alpha_0)} \dot{R}_2(\theta_{2s}) \exp(i(k\Delta r_2 + \beta_2(\theta_{2s}))) \right], \end{aligned} \quad (5)$$

где $\Delta r_1 = r_1 - r_0$, $\Delta r_2 = r_2 - r_0$. В случае слабонаправленных антенн с $F(\alpha) \approx 1$ получим упрощенное выражение для интерференционного множителя $\dot{V}$ и его модуля по мощности V^2 :

$$\begin{aligned} \dot{V} = 1 + \dot{R}_1(\theta_{1s}) \exp(i(k\Delta r_1 + \beta_1(\theta_{1s}))) + \\ + \dot{R}_2(\theta_{2s}) \exp(i(k\Delta r_2 + \beta_2(\theta_{2s}))). \end{aligned} \quad (6)$$

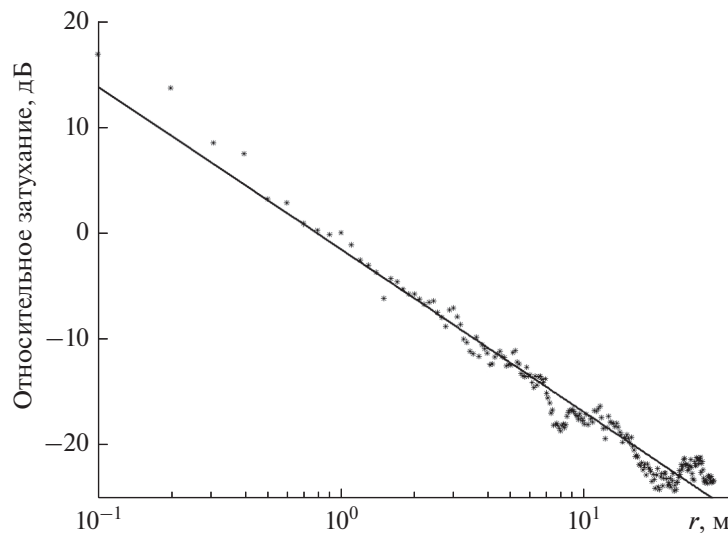


Рис. 2. Экспериментальный график затухания мощности хаотических радиоимпульсов в помещении [7].

$$\begin{aligned}
 V^2 = & 1 + (R_1(\theta_{1s}))^2 + (R_2(\theta_{2s}))^2 + \\
 & + 2R_1(\theta_{1s})\cos(k\Delta r_1 + \beta_1(\theta_{1s})) + \\
 & + 2R_2(\theta_{2s})\cos(k\Delta r_2 + \beta_2(\theta_{2s})) + \\
 & + 2R_1(\theta_{1s})R_2(\theta_{2s})\cos(k(\Delta r_1 + \Delta r_2) + \\
 & + \beta_1(\theta_{1s}) + \beta_2(\theta_{2s})).
 \end{aligned} \quad (7)$$

Теперь, зная $V(\omega)$, обобщим данный подход на сверхширокополосный случай. Определим “интерференционный” множитель для СШП-волны $V_{\text{СШП}}$ через отношение мощностей СШП-волны в точке приема в многолучевом и однолучевом случаях:

$$P = P_0 V_{\text{СШП}}^2, \quad (8)$$

где P_0 — мощность волны в точке приема в свободном пространстве, P — мощность в точке приема в системе с несколькими лучами.

Будем считать, что СШП-сигнал ограничен полосой частот $[\omega_n, \omega_b]$. Нетрудно показать, что для СШП-сигнала с постоянной спектральной характеристикой вида $S(\omega) = 1$, $\omega \in [\omega_n, \omega_b]$, выражение для интерференционного множителя $V_{\text{СШП}}$ имеет следующий вид:

$$V_{\text{СШП}}^2 = \frac{\int_{\omega_n}^{\omega_b} |V(\omega)|^2 d\omega}{(\omega_b - \omega_n)}, \quad (9)$$

т.е. множитель $V_{\text{СШП}}^2$ равен среднему по частоте значению мощности интерференционного множителя $V^2(\omega)$, рассчитанного по формуле (7) (более подробно вывод формул см. в [4]).

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Чтобы продемонстрировать возможности предложенной модели и указать на основные закономерности и факторы, влияющие на показатель затухания СШП-волны в помещении, опишем с помощью представленной выше модели физический эксперимент с известными условиями проведения и сравним экспериментальные данные с результатами моделирования. В качестве примера возьмем работу [7], в которой проводились измерения затухания хаотических СШП-радиоимпульсов внутри здания. На рис. 2 воспроизведен график изменения мощности хаотической СШП-волны $P(r)$ при перемещении излучателя вдоль коридора с размерами 3 м (ш) $\times$ 4.8 м (в) $\times$ 40 м (д). Эксперимент проводился с хаотическим СШП-сигналом с полосой частот $f = 3 \dots 5$ ГГц; длина волны на средней частоте $\lambda = 7.5$ см; передатчик и приемник установлены посередине между стенами (расстояние от каждой стены 1.5 м) на высоте 0.8 м от пола; волна распространялась вдоль коридора; антенны излучателя и приемника — типа монополь; поляризация излучаемой волны вертикальная [7]. Как видно на рис. 2, кривая затухания мощности с точностью около 1.5...2 дБ аппроксимирована прямой линией с показателем $n = 1.5$.

Моделирование задачи затухания мощности СШП-сигнала в данном помещении будем выполнять во временной области (подробнее об алгоритме моделирования см. [4]). Выражение для интерференционного множителя для двух отраженных лучей записывается следующим образом

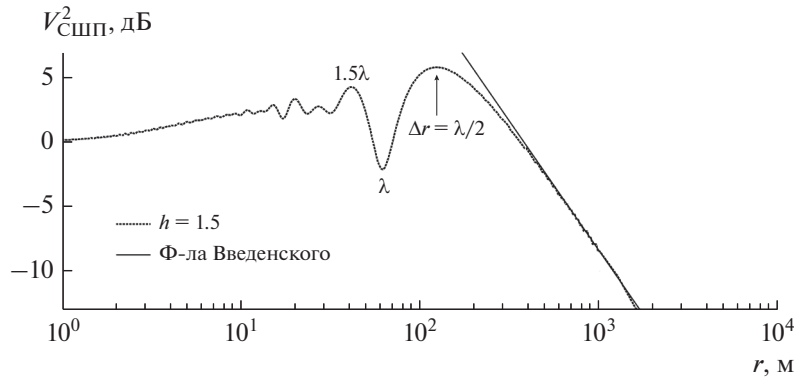


Рис. 3. Интерференционный множитель $V_{\text{СШП}}^2(r)$ при отражении от одной стены (в двухлучевой модели).

$$V_{\text{СШП}}^2 = \frac{\int_0^T \left(x(t) + \frac{r_1}{r_0} \frac{F(\alpha_1)}{F(\alpha_0)} x(t - \Delta r_1/c) |R_1| \cos(\beta_1) + \frac{r_2}{r_0} \frac{F(\alpha_2)}{F(\alpha_0)} x(t - \Delta r_2/c) |R_2| \cos(\beta_2) \right)^2 dt}{\int_0^T x^2(t) dt}, \quad (10)$$

где $x(t)$ — СШП хаотический радиоимпульс длительности T , c — скорость света; остальные обозначения совпадают с обозначениями формул (3)–(7).

Для простоты, антенны излучателя и приемника представим диполями, расположенными вертикально.

В данной задаче имеются две основные плоскости отражений — горизонтальная и вертикальная. Сначала рассмотрим отражение волны в этих плоскостях по отдельности, а затем объединим результаты.

2.1. Отражение в горизонтальной плоскости

Для вертикально направленной антенны дипольного типа горизонтальная плоскость является азимутальной, диаграмма направленности в этой плоскости $F(\varphi) = 1$. Электрический вектор падающей волны параллелен отражающей поверхности (стене).

Чтобы иметь базу для сравнения, в качестве первого шага рассмотрим отражение волны только от одной из стен (рис. 3). Такая ситуация эквивалентна распространению волны на открытой местности (см. рис. 1а), поэтому расчет соответствующего интерференционного множителя $V_{\text{СШП}}(r)$ выполнен с помощью двухлучевой модели.

Как видно из рис. 3, на начальном участке графика $V_{\text{СШП}}(r)$ нет значительных (размахом десятки децибел) колебаний, характерных для узкополосных сигналов, возникающих вследствие интерференции прямой и отраженной волн. В случае СШП-сигналов, для которых характерно малое время автокорреляции τ , прямая и отра-

женная волны оказываются практически некоррелированными в точке приема и складываются по мощности. Незначительная остаточная корреляция проявляется в виде мелкой ряби на графике $V_{\text{СШП}}(r)$.

По мере роста расстояния r разность хода Δr между прямой и отраженной волнами уменьшается, и, когда Δr становится сравнима с длиной автокорреляции $l_{\text{кор}} = c\tau$ (c — скорость света, τ — время автокорреляции), корреляция и интерференция прямой и отраженной волн проявляется на графике $V_{\text{СШП}}(r)$ в виде нескольких интерференционных экстремумов, которые отвечают разностям хода Δr кратным $\lambda/2$ (λ — длина волны излучения на средней частоте).

Выполним оценки. Как известно, время автокорреляции шумоподобного СШП-сигнала τ обратно пропорционально ширине полосы частот: $\tau = 1/\Delta f$ [8]. В данном случае $\Delta f = 2$ ГГц, $\tau = 0.5$ нс, $l_{\text{кор}} = 15$ см, т.е. здесь $l_{\text{кор}} = 2\lambda$. Учитывая, что

$$\Delta r \approx \frac{2h_{\text{Tx}}h_{\text{Rx}}}{r}$$

и что высоты передающей и приемной антенн над плоскостью раздела сред (т.е. стеной) $h_{\text{Tx}} = h_{\text{Rx}} = 1.5$ м, разность хода $\Delta r = l_{\text{кор}}$ достигается на расстоянии около $r = 30$ м.

В области расстояний $r > 300$ м расчетный интерференционный множитель $V_{\text{СШП}}(r)$ выходит на прямую, соответствующую формуле Введенского

$$V_{\text{В}}(r) \approx \frac{4\pi h_{\text{Tx}}h_{\text{Rx}}}{\lambda r}, \quad (11)$$

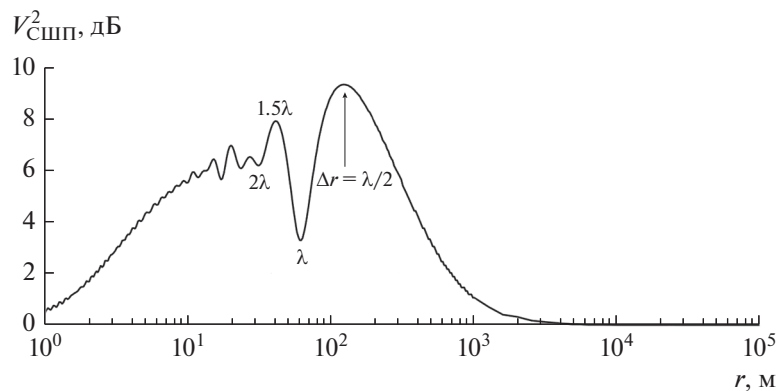


Рис. 4. Отражение в горизонтальной плоскости (от двух стен).

что обеспечивает дополнительное затухание мощности $\sim 1/r^2$, и общее затухание мощности СШП волны $P(r) \sim 1/r^4$.

Теперь исследуем данную задачу с помощью введенной выше трехлучевой модели (см. рис. 1б) и учтем отражение от обеих противоположных стен. Такую ситуацию можно трактовать как распространение волны между двумя бесконечными параллельными плоскостями.

На рис. 4 приведен расчетный график множителя $V_{\text{СШП}}^2(r)$. Прежде всего следует отметить, что повсюду $V_{\text{СШП}}^2(r) > 1$ (0 дБ), т.е. во всем диапазоне расстояний мощность волны $P(r)$ в точке приема больше, чем мощность волны $P_0(r)$ в свободном пространстве, т.е. данная многолучевая среда не вносит дополнительного ослабления.

На начальном участке графика ($1 \text{ м} \leq r \leq 13 \text{ м}$) значение множителя $V_{\text{СШП}}^2$ довольно последовательно увеличивается, что можно объяснить ростом коэффициента отражения $|R|$. Рост множителя $V_{\text{СШП}}^2$ означает, что на данном интервале расстояний показатель затухания мощности волны меньше, чем в свободном пространстве, т.е. $n < 2$.

По мере увеличения расстояния r разность хода Δr между прямой и отраженными волнами уменьшается и, когда она становится меньше длины автокорреляции $l_{\text{кор}}$ (начиная с расстояния $r \approx 30 \text{ м}$), на графике наблюдаются несколько интерференционных экстремумов, как на рис. 3.

Максимальное значение множителя $V_{\text{СШП}}^2 = 9.3 \text{ дБ}$ достигается, когда разность хода волн составляет $\Delta r = \lambda/2$. При этом коэффициент отражения равен $R \approx -1$, т.е. каждая отраженная волна $u(t)$ примерно равна по амплитуде падающей волне $s(t)$ с обратным знаком, но смещена относительно падающей на $\lambda/2$ (на полпериода), т.е. $u(t) = -s(t - T_{\text{ср}}/2)R$, где $T_{\text{ср}}$ — средний период колебаний. Нетрудно видеть, что в этом случае $u(t) \approx s(t)$.

Суммирование прямой волны $s(t)$ с двумя одинаковыми отраженными $u(t)$ дает итоговую волну $y(t) = s(t) + 2u(t) \approx 3s(t)$, мощность которой близка к $P_{\Sigma} = 9$ (9.5 дБ) (при моделировании мощность падающей волны в точке приема принималась $P = 1$).

В области $r > 300 \text{ м}$ в ситуации с одной отраженной волной интерференционный множитель находился бы на прямой линии, описываемой формулой Введенского (11), как на рис. 3, однако в модели с двумя отраженными волнами при $r \rightarrow \infty$ график $V_{\text{СШП}}(r)$ быстро сходится к $V_{\text{СШП}} = 0 \text{ дБ}$. Другими словами, в этой области расстояний среда распространения не вносит дополнительного затухания и мощность волны затухает как в свободном пространстве. Очевидно, данная особенность распространения обусловлена наличием двух отраженных волн в точке приема. Физический смысл этого явления, по-видимому, заключается в том, что отражающие поверхности ограничивают волну, не давая ей рассеиваться на бесконечности, поэтому уместной представляется аналогия с “волноводом”.

При смещении излучателя и приемника от центральной оси помещения к одной из стен характер поведения графика $V_{\text{СШП}}(r)$ усложняется, так как отраженные волны уже не являются одинаковыми. Области расстояний, в которых отраженные волны становятся коррелированными с падающей волной и друг с другом, расходятся по шкале дальности, что дает более сложную картину экстремумов, а также уменьшение размаха колебаний $V_{\text{СШП}}(r)$. Однако и в этом случае при $r \rightarrow \infty$ график $V_{\text{СШП}}(r)$ сходится к горизонтальной асимптоте $V_{\text{СШП}} = 0 \text{ дБ}$.

2.2. Отражение в вертикальной плоскости

Для антенны дипольного типа вертикальная плоскость является угломестной; диаграмма направленности в этой плоскости $F(\theta) = \cos(\theta)$.

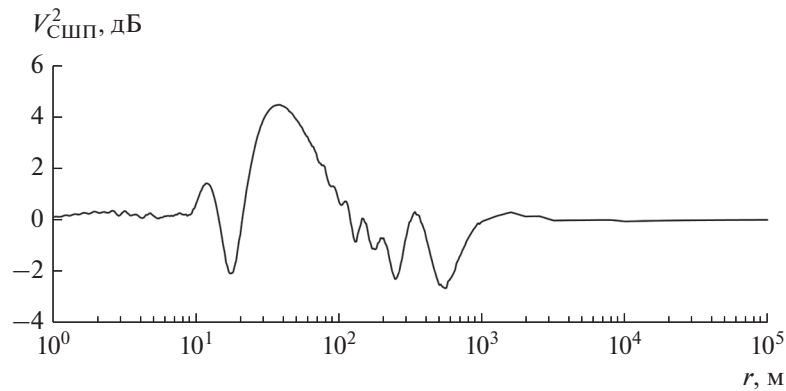


Рис. 5. Отражение в вертикальной плоскости (от пола и потолка).

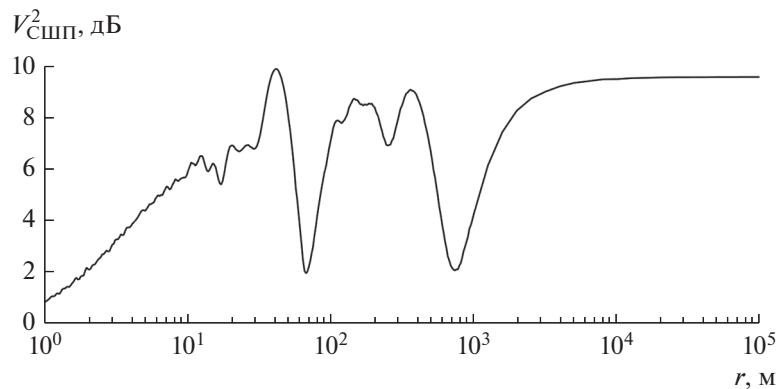


Рис. 6. Отражение от пола, потолка и стен.

Отражение СШП-волны от пары поверхностей “пол–потолок” (рис. 5) происходит примерно так же, как и в горизонтальной плоскости (за исключением того, что электрический вектор падающей волны перпендикулярен отражающей плоскости, поэтому коэффициенты отражения рассчитываются по формулам для другой поляризации [1]). Так как “высоты” расположения антенн передатчика и приемника относительно пола и потолка сильно различаются ($h_{\text{пол}} = 0.8$ м, $h_{\text{потолок}} = 4.0$ м), области расстояний на графике $V_{\text{СШП}}^2(r)$, в которых наблюдаются экстремумы, соответствующие интерференции прямой и одной из отраженных волн, находятся далеко друг от друга на шкале расстояний. Интерференционные экстремумы, соответствующие отражению от пола, наблюдаются в области $r = 10 \dots 50$ м, а отражению от потолка – в области $r = 100 \dots 1000$ м. Так, максимум на расстоянии около $r = 35$ м соответствует разности хода $\Delta r = \lambda/2$ прямой волны и волны, отраженной от пола ($h = 0.8$ м), а минимум на расстоянии около $r = 550$ м – разности хода $\Delta r = \lambda$ прямой волны и волны, отраженной от потолка ($h = 4.0$ м). Однако при $r \rightarrow \infty$ графики $V_{\text{СШП}}(r)$ все равно сходятся к горизонтальной линии $V_{\text{СШП}} = 0$ дБ, а это означает, что в этой области расстояний СШП-

волна затухает с тем же показателем, что и в свободном пространстве.

2.3. Отражение в двух плоскостях

Вычислим теперь суммарный интерференционный множитель с учетом отражений в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Поскольку поляризация волны при этих отражениях не меняется, в точке приема прямая волна суммируется с четырьмя отраженными, что дает объединенный график $V_{\text{СШП}}^2(r)$ на рис. 6.

Анализ графика показывает, что на его начальном участке ($1 \text{ м} \leq r \leq 13 \text{ м}$) значение множителя $V_{\text{СШП}}^2$ растет с показателем около 5.5 дБ мощности на 10 дБ расстояния, т.е. $V_{\text{СШП}}^2(r) \sim r^{0.55}$. Этот рост обеспечивает суммарное затухание мощности СШП-сигнала на этом интервале расстояний $P(r) \sim r^{-2} r^{0.55} = r^{-1.45}$, т.е. с показателем $n = 1.45$, что близко к экспериментальным данным. Это является проявлением “многолучевого усиления”, заключающегося в некогерентном суммировании СШП-волн, приходящих в точку приема с разных направлений, и в заметном увеличении мощности сигнала на входе приемника в много-

лучевой среде по отношению к свободному пространству [9].

Главное отличие кривой на рис. 6 от кривых на рис. 4 и 5 то, что на больших расстояниях ($r \rightarrow \infty$) график выходит на асимптоту $V_{\text{сшп}}^2(r) = 9$ (9.5 дБ), а не $V_{\text{сшп}}^2(r) = 1$ (0 дБ). Это связано с тем, что при суммировании прямой волны $s(t)$ и четырех отраженных волн $u(t) = Rs(t) \approx -s(t)$ суммарный сигнал равен $y(t) \approx -3u(t)$, что дает множитель $V_{\text{сшп}}(r) = 3$ (4.8 дБ) по амплитуде и $V_{\text{сшп}}^2(r) = 9$ (9.5 дБ) по мощности. Этот результат еще раз подтверждает, что многолучевая среда позволяет собрать больше энергии в точке приема, чем свободное пространство. Так как при этом $V_{\text{сшп}}(r) = \text{const}$, показатель затухания мощности СШП-волны на больших расстояниях такой же, как в свободном пространстве, т.е. $n = 2$.

Однако нельзя не заметить, что кривая $V_{\text{сшп}}(r)$ на рис. 4–6 выходит на асимптоту $V_{\text{сшп}}(r) = \text{const}$ на расстояниях, которые в рассмотренной задаче не имеют большого смысла, поскольку трудно говорить о помещениях с линейными размерами много больше 100 м. Поэтому практическую ценность имеет только начальная область графиков $V_{\text{сшп}}(r)$, где на относительно малых расстояниях происходит эффективное накопление мощности за счет некогерентного сложения прямой и отраженных волн и наблюдается многолучевое усиление сигнала по отношению к свободному пространству [7, 9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследования распространения сверхширокополосной волны в помещении предложено обобщение классической двухлучевой модели, учитывающее парный характер основных отражений волны от параллельных поверхностей типа “пол–потолок” и противоположные стены. Показано, что в отличие от свободного пространства в помещении не происходит дополнительного затухания мощности СШП-волны вследствие интерференции, более того, в многолучевой среде помещений в точке приема собирается больше энергии, чем в свободном пространстве, поэтому в случае прямой видимости показатель затухания мощности СШП-волны всегда $n \leq 2$.

Показано, что именно наличие множества отраженных лучей является фактором, обеспечивающим меньшее затухание мощности СШП-волны в помещении. По всей видимости, не так важно, чтобы отражения были парными, как то, что их должно быть много (два и более). По этой же причине параллельность отражающих поверхностей также не является необходимым условием.

Как следует из модели, для узкополосных сигналов в пределе больших расстояний $r \rightarrow \infty$ приведенные рассуждения также должны быть спра-

ведливы. Однако на практически значимых расстояниях, $0 < r < r_{2-4}$ (где r_{2-4} — точка срыва в двухлучевой модели, в окрестности которой показатель затухания меняется с $n = 2$ на $n = 4$), падающая узкополосная волна интерферирует с отраженными волнами, что приводит к значительным (на десятки децибел) колебаниям мощности при движении вдоль шкалы расстояний (“замирания”). Так как показатель затухания мощности фактически является производной функции $\lg P(\lg r)$, значения показателя n также испытывают значительные осцилляции, поэтому для узкополосных сигналов невозможно принять для расчетов фиксированное значение показателя затухания $n \leq 2$.

Для сверхширокополосных сигналов с помощью предложенной модели сделаны следующие общие выводы.

1. По показателю затухания мощности СШП-сигнала среда помещения близка к свободному пространству.
2. Открытая местность и помещения представляют собой среды с очень разными условиями распространения, поэтому прямое сравнение характеристик систем связи в этих средах неоправданно.
3. Предельная дальность действия СШП-систем связи в помещении (в условиях прямой видимости) должна быть выше, чем на открытой местности.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. М.: Связь, 1972.
2. Sato S., Kobayashi T. // 8th IEEE Int. Symp. Spread Spectrum Techniques & Applications Sydney. 30 Aug.–02 Sept. 2004. N.Y.: IEEE, 2004. P. 488.
3. Maw M.M., Rankhamrat B., Promwong S. // Proc. Reg. Conf. Comp. & Inf. Eng. (RCCIE-2013). Bangkok, Aug. 22–23, 2013. P. 87.
4. Андреев Ю.В., Петросян М.М. // РЭ. 2023. Т. 68. № 11. С. 1056.
5. Molisch A.F., Balakrishnan K., Cassioli D. et al. IEEE 802.15.4a Channel Modeling Sub-committee Report Final. IEEE 802.15-04-0662-02-004a. 2005. P. 3681.
6. Molisch A.F. Wireless Communications. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2010.
7. Андреев Ю.В., Дмитриев А.С., Лазарев В.А., Рыжов А.И. // Успехи совр. радиоэлектроники. 2013. № 3. С. 55.
8. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 1. Случайные процессы. М.: Наука, 1966.
9. Андреев Ю.В., Дмитриев А.С., Клецов А.В. // РЭ. 2007. Т. 52. № 7. С. 838.