

УДК 537.876; 537.874; 621.372; 621.374

# Эффект «волновода» при распространении сверхширокополосных сигналов в помещении<sup>1</sup>

<sup>1,2</sup> Андреев Ю. В., <sup>1</sup> Петросян М. М.

<sup>1</sup> *Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН  
ул. Моховая, д. 11, корп. 7. г. Москва, ГСП-3, 125009, Российская Федерация  
andreev.iuv@mipt.ru*

<sup>2</sup> *Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)  
Институтский пер., 9, г. Долгопрудный МО, 141700, Российская Федерация*

Получено: 19 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

**Аннотация:** Показан эффект «волновода» при распространении сверхширокополосного сигнала внутри помещений, заключающийся в отсутствии интерференционного фактора ослабления сигнала независимо от расстояния. В отличие от открытой местности при распространении в многолучевой среде помещений характер затухания сигнала с расстоянием близок к среде свободного пространства. Эффект возникает вследствие отражения волны от парных поверхностей, расположенных друг против друга: пол — потолок, параллельные стены. Благодаря этому дальность сверхширокополосных систем связи в помещении оказывается заметно выше, чем на открытой местности. Эффект иллюстрируется с помощью трехлучевой интерференционной модели.

**Ключевые слова:** сверхширокополосный сигнал, распространение сигналов, двухлучевая модель, формула Введенского, хаотический сигнал.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008):** Андреев Ю. В., Петросян М. М. Эффект «волновода» при распространении сверхширокополосных сигналов в помещении // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 3. С. 304—317.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018):** Андреев, Ю. В. Эффект «волновода» при распространении сверхширокополосных сигналов в помещении / Ю. В. Андреев, М. М. Петросян // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 3. — С. 304—317.

---

<sup>1</sup> Работа выполнена по Государственному заданию.

## 1. Введение

Одним из параметров среды распространения, определяющим дальность системы связи, является скорость затухания  $n$  мощности сигнала  $P$  с расстоянием  $r$  (затухание описывается степенной зависимостью  $P \sim r^{-n}$ ). В свободном пространстве показатель  $n = 2$ , однако на открытой местности на достаточном удалении от передатчика мощность сигнала в точке приема затухает примерно как  $r^{-4}$  [1]. Такая скорость затухания сигнала характерна как для узкополосных [2—4], так и для сверхширокополосных (СШП) сигналов. Это явление объясняется интерференцией в точке приема прямой волны и волны, отраженной от поверхности раздела сред «воздух — земля», и хорошо описывается т. н. двухлучевой (интерференционной) моделью [1].

В то же время в моделях СШП канала для стандартов *IEEE* 802.15.3a и 802.15.4a, построенных на основе большого экспериментального массива измерений, для каналов связи с прямым лучом (*LOS*) внутри помещений различного типа (офисных, жилых, промышленных) используются значения показателя затухания в диапазоне  $n = 1,4—2$  [5]. Для того чтобы объяснить разрыв значений между показателями затухания  $n$  на открытой местности и в помещениях, в данном докладе распространение СШП сигнала исследуется в простой модели, учитывающей парный характер основных отражений сигнала в помещении.

## 2. Модель с парными отражениями

При распространении радиоволны над поверхностью Земли поле в точке приема формируется путем суммирования прямой и отраженной волн. На больших расстояниях  $r$ , т. е. при углах падения волны  $\theta$ , близких к  $90^\circ$ , волна отражается от земли с коэффициентом  $R \approx 1$ , а фаза волны поворачивается на  $180^\circ$ , поэтому прямая и отраженная волны оказываются практически равны по амплитуде и противоположны по фазе, поэтому в линейном приближении гасят друг друга (см. рис. 1а). Учет членов более высокого порядка дает зависимость интерференционного множителя  $V$  от расстояния как  $1/r$  для амплитуды и  $1/r^2$  для мощности [1], что и обеспечивает итоговый показатель затухания  $n = 4$ .

В отличие от открытой местности, распространение радиоволны в помещении сопровождается большим числом отражений, причем во многих случаях основными отражающими поверхностями являются конструктивные плоскости помещения, т. е. стены, пол и потолок. Поэтому в точке приема прямая волна суммируется не с одной отраженной волной, а с волнами, отраженными от параллельных поверхностей: пол — потолок, про-

тивоположные стены. Таким образом, в каждой плоскости отражения имеется пара отраженных волн, образованных отражением от пары плоских поверхностей, как показано на рис. 1б.

Интуитивно понятно, что в этом случае при больших углах падения ( $\theta \approx 90^\circ$ ) прямая и одна из двух отраженных волн также гасят друг друга, однако остается вторая отраженная волна с амплитудой, практически равной амплитуде прямой волны (и фазой, отличающейся на  $180^\circ$ ). Таким образом, в точке приема не происходит дополнительного ослабления волны вследствие интерференции, поэтому показатель затухания  $n$  на больших расстояниях в помещении должен быть не хуже, чем в свободном пространстве, т. е.  $n \leq 2$ .

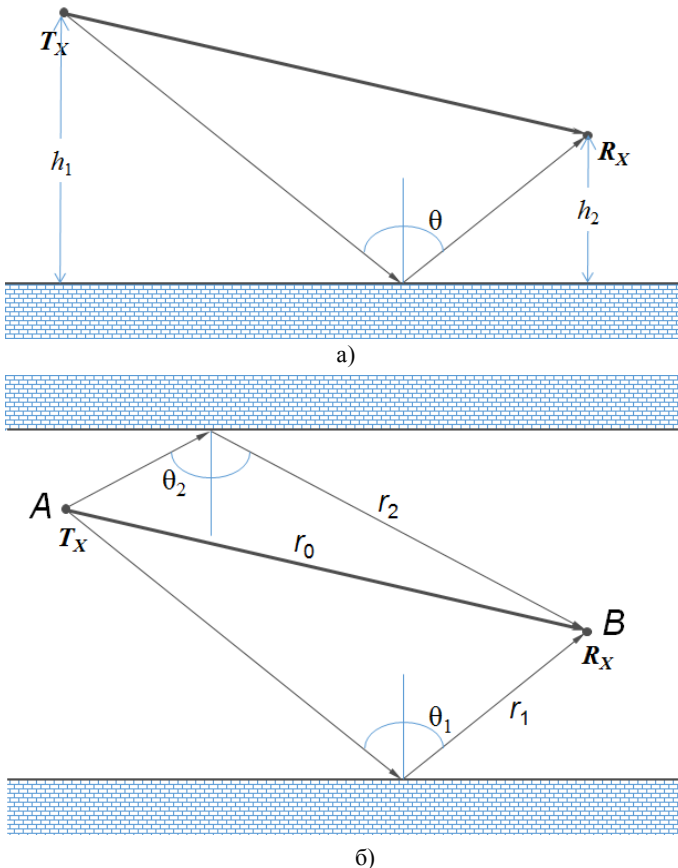


Рис. 1. Модели распространения радиоволны: а) над поверхностью Земли; б) в помещении.

Fig. 1. Models of radio wave propagation: a) over the Earth's surface; b) indoors

Подкреем эти качественные рассуждения моделью на рис. 1б, описывающей взаимодействие прямой волны с парой отраженных волн. Для этого вычислим (подобно тому, как это делается в классической двухлучевой модели [1]) интерференционный множитель  $V$ , который связывает комплексную амплитуду электрического поля в точке приема  $\dot{E}$  с комплексной амплитудой поля в свободном пространстве  $\dot{E}_{m0}$

$$\dot{E} = \dot{E}_{m0} \cdot \dot{V}, \tag{1}$$

Выведем сначала выражение для гармонической электромагнитной волны некоторой фиксированной частоты.

Запишем комплексную амплитуду напряженности поля прямой волны  $\dot{E}_{m0}$  в виде

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

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,  $\alpha_0$  — угол направления на точку В из точки А (см. рис. 1б),  $\omega$  — угловая частота падающей волны,  $r_0$  — длина прямого луча,  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число,  $\lambda$  — длина волны излучения:

Напряженность поля отраженных волн определяется формулами

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

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

где  $R$  и  $\beta$  — модуль и фаза коэффициента отражения  $\dot{R}(\theta_s)$ ,  $\theta_s$  — угол падения,  $r_1$  и  $r_2$  — длины отраженных лучей.

Результирующее поле в точке приема имеет вид

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

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

$$\begin{aligned} \dot{V} &= 1 + \dot{R}_1(\theta_{1s}) \exp(i(k\Delta r_1 + \beta_1(\theta_{1s}))) + \dot{R}_2(\theta_{2s}) \exp(i(k\Delta r_2 + \beta_2(\theta_{2s}))). \quad (6) \\ V^2 &= 1 + (R_1(\theta_{1s}))^2 + (R_2(\theta_{2s}))^2 + 2R_1(\theta_{1s}) \cos(k\Delta r_1 + \beta_1(\theta_{1s})) + 2R_2(\theta_{2s}) \times \\ &\times \cos(k\Delta r_2 + \beta_2(\theta_{2s})) + 2R_1(\theta_{1s})R_2(\theta_{2s}) \cos(k(\Delta r_1 + \Delta r_2) + \beta_1(\theta_{1s}) + \beta_2(\theta_{2s})). \quad (7) \end{aligned}$$

В сверхширокополосном случае интерференционный множитель  $V_{UWB}$  можно определить через отношение мощностей СШП волны в точке приема в многолучевом и однолучевом случаях:

$$P = P_0 \cdot V_{UWB}^2, \quad (8)$$

где  $P_0$  — мощность волны в точке приема в свободном пространстве, а  $P$  — мощность в точке приема в системе с несколькими лучами. Будем считать, что СШП сигнал имеет полосу частот  $[\omega_{lo}, \omega_{up}]$ .

Нетрудно показать, что для хаотического сигнала с идеально ровной спектральной характеристикой  $S(\omega) \equiv 1$ ,  $\omega \in [\omega_{lo}, \omega_{up}]$ , выражение для интерференционного множителя  $V_{UWB}$  принимает следующий вид

$$V_{UWB}^2 = \frac{\int_{\omega_{lo}}^{\omega_{up}} |V(\omega)|^2 d\omega}{(\omega_{up} - \omega_{lo})}, \quad (9)$$

т. е. интерференционный множитель  $V_{UWB}^2$  равен среднему по частоте значению мощности интерференционного множителя  $V^2(\omega)$ , рассчитанного на частоте  $\omega$  по формуле (7).

### 3. Численное моделирование

Применим модель для исследования конкретного примера. Ранее в работе [6] изучалось распространение СШП хаотических радиоимпульсов внутри зданий. На рис. 2 воспроизведен график изменения мощности СШП хаотической волны  $P(r)$  при перемещении излучателя вдоль коридора. Как видно из рис. 2, кривая затухания с точностью около 1,5—2 дБ аппроксимируется прямой линией с показателем  $n \approx 1,5$ .

В физическом эксперименте размеры помещения составляли 3 м (Ш)  $\times$  4,8 м (В)  $\times$  40 м (Д); эксперимент проводился с СШП хаотическим сигналом с полосой частот  $f = 3$ —5 ГГц; длина волны на средней частоте  $\lambda = 7,5$  см; передатчик и приемник были установлены посередине между стенами на высоте  $h = 0,8$  м от пола, волна распространялась вдоль коридора параллельно стенам [6].

Чтобы иметь базу для сравнения, выполним сначала расчет интерференционного множителя  $V_{USB}(r)$  согласно двухлучевой модели (рис. 1а),

которая описывает распространение СШП сигнала на открытой местности. Это эквивалентно учету отражения радиоволны только от пола данного помещения. Результаты расчета приведены на рис. 3.

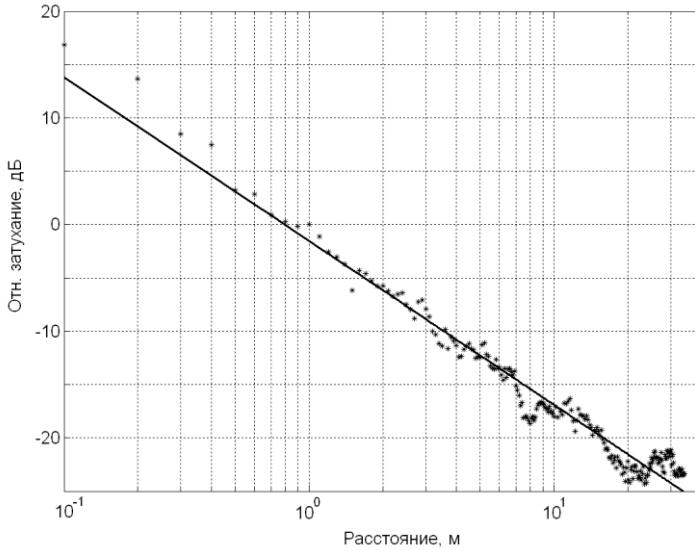


Рис. 2. Экспериментальный график затухания мощности хаотических радиоимпульсов в помещении [6].

Fig. 2. Experimental graph of the attenuation of the power of chaotic radio pulses in a room [6]

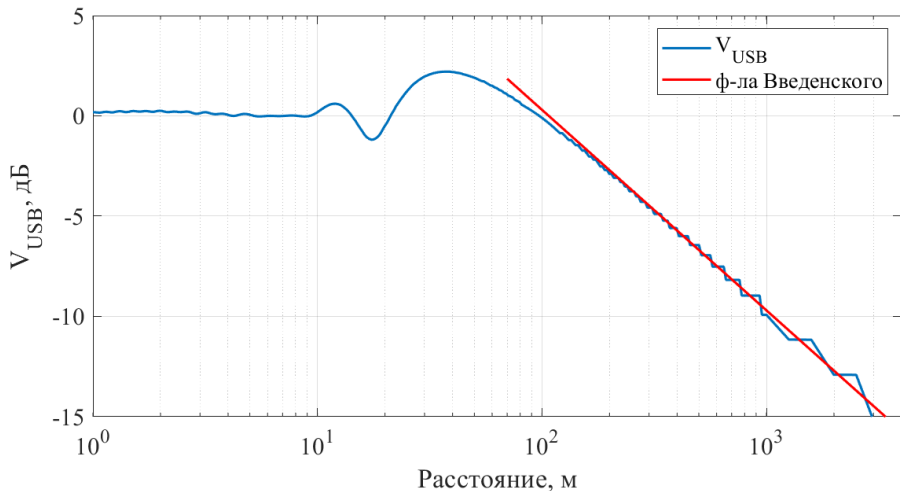


Рис. 3. Интерференционный множитель  $V_{USB}(r)$  в двухлучевой модели.

Fig. 3. Interference factor  $V_{USB}(r)$  in the two-ray model

Как видно на рис. 3, на начальном участке графика нет значительных (десятки децибел) колебаний, характерных для узкополосных сигналов, так как такие колебания возникают вследствие интерференции прямой и отраженных волн. В случае сверхширокополосных сигналов, для которых характерно малое время автокорреляции  $\tau$ , прямая и отраженная волны оказываются некоррелированными в точке приема и складываются по мощности. Незначительная остаточная корреляция проявляется в виде мелкой ряби на графике  $V_{\text{USB}}(r)$ .

По мере роста  $r$  разность хода  $\Delta r$  между прямой и отраженной волнами уменьшается, и когда  $\Delta r$  становится сравнима с длиной автокорреляции  $l_{\text{AK}} = c\tau$ , где  $c$  — скорость света, прямая и отраженная волны оказываются коррелированными, и происходит их интерференция, что проявляется на графике  $V_{\text{USB}}(r)$  в виде двух интерференционных максимумов и одного минимума. Время автокорреляции шумоподобного сверхширокополосного сигнала  $\tau$  обратно пропорционально ширине полосы частот:  $\tau = 1/\Delta f$  [7]. В нашем случае,  $\Delta f = 2$  ГГц,  $\tau = 0,5$  нс,  $l_{\text{AK}} = 2\lambda = 15$  см (здесь эта разность хода лучей достигается на расстоянии около  $r = 8$  м).

В области расстояний  $r > 100$  м интерференционный множитель  $V_{\text{USB}}(r)$  выходит на прямую, соответствующую формуле Введенского

$$V_{\text{Введ}} \approx \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda r}, \quad (10)$$

что обеспечивает дополнительное затухание мощности волны со скоростью  $\sim 1/r^2$ , и общее затухание со скоростью  $\sim 1/r^4$ .

Теперь исследуем данную задачу с помощью введенной выше трехлучевой модели (рис. 1б).

Выполним моделирование распространения волны в коридоре, сначала принимая в расчет только отражение от стен, что можно трактовать как распространение волны между двумя бесконечными параллельными плоскостями. Расстояние между плоскостями (стенами)  $W = 3$  м. Поляризация волны, падающей на стену, горизонтальная, как в физическом эксперименте [6].

На рис. 4 приведен расчетный график интерференционного множителя  $V^2_{\text{USB}}(r)$ . Прежде всего следует отметить, что  $V^2_{\text{USB}}(r) \geq 1$ , т. е. во всем диапазоне расстояний мощность волны в точке приема  $P(r)$  больше, чем мощность волны  $P_0(r)$  в свободном пространстве на этом же расстоянии  $r$ , т. е. данная многолучевая среда не вносит дополнительного ослабления.

На начальном участке графика ( $1 \text{ м} \leq r \leq 13 \text{ м}$ ) значение множителя  $V^2_{\text{USB}}$  довольно монотонно увеличивается, что можно объяснить ростом ко-

эффицента отражения  $|R|$ . На этом интервале расстояний график множителя можно аппроксимировать отрезком прямой с наклоном приблизительно 5 дБ мощности на 10 дБ расстояния, т. е.  $V_{\text{USB}}^2(r) \sim r^{0.5}$ . Это обеспечивает суммарное затухание СШП сигнала на этом интервале  $P(r) \sim r^{-2} \cdot r^{0.5} = r^{-1.5}$ , что совпадает с экспериментальными данными.

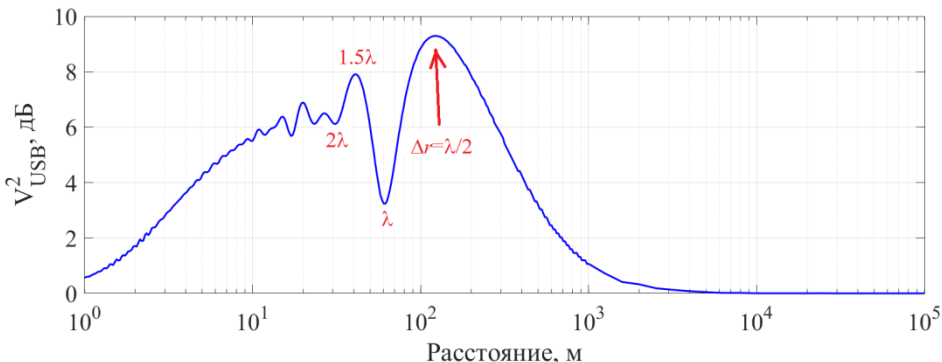


Рис. 4. Моделирование задачи распространения СШП сигнала вдоль коридора.

Fig. 4. Modeling the problem of UWB signal propagation along the corridor

Однако по мере роста  $r$  разность хода  $\Delta r$  между прямой и отраженными волнами уменьшается, и когда она становится меньше длины автокорреляции  $l_{\text{AK}}$  (в данном случае начиная с расстояния  $r = 30$  м), на графике наблюдаются несколько интерференционных экстремумов (в диапазоне расстояний  $20 \text{ м} \leq r \leq 130 \text{ м}$ ), которые отвечают разностям хода прямой и отраженных волн  $\Delta r$ , кратным  $\lambda/2$  (половине длины волны на средней частоте). Максимальное значение  $V_{\text{USB}}^2 \approx 9,3$  дБ достигается, когда прямая волна  $s(t)$  складывается с двумя одинаковыми отраженными волнами  $u(t)$ , смещенными на  $\lambda/2$  относительно падающей, но домноженными на коэффициент отражения  $R = |R|e^{i\beta} = 0.987 \cdot e^{i\pi} \approx -1$ , т. е.  $u(t) \approx -s(t)$ . Итоговая волна  $s(t) + 2u(t) \approx 3s(t)$ , а ее мощность близка к  $P_{\Sigma} = 9$  (9,5 дБ). При моделировании мощность падающей волны принималась  $P = 1$ .

В области  $r > 130$  м на открытой местности (т. е. с одной отраженной волной) интерференционный множитель находился бы на прямой линии, описываемой формулой Введенского (см. рис. 3), однако в данной модели этого не происходит, и при  $r \rightarrow \infty$  график  $V_{\text{USB}}(r)$  быстро сходится к  $V_{\text{USB}} = 1$  (0 дБ). Другими словами, в этой области расстояний волна распространяется как в свободном пространстве. Очевидно, это обусловлено наличием поверхностей, ограничивающих волну, что и дало повод говорить здесь о «волноводном» эффекте.



При смещении приемника и передатчика от центральной линии к одной из стен характер поведения  $V_{\text{USB}}(r)$  усложняется, так как отраженные волны становятся разными и начинают «конкурировать» (рис. 5). Области расстояний  $r$ , в которых волны становятся коррелированными с другими волнами, расходятся по шкале расстояний, что дает более сложную картину экстремумов, а также уменьшение размаха колебаний  $V_{\text{USB}}(r)$ . Однако, графики на рис. 4 имеют то общее свойство, что при  $r \rightarrow \infty$  они ожидаемо сходятся к асимптоте  $V_{\text{USB}} = 1$  (0 дБ).

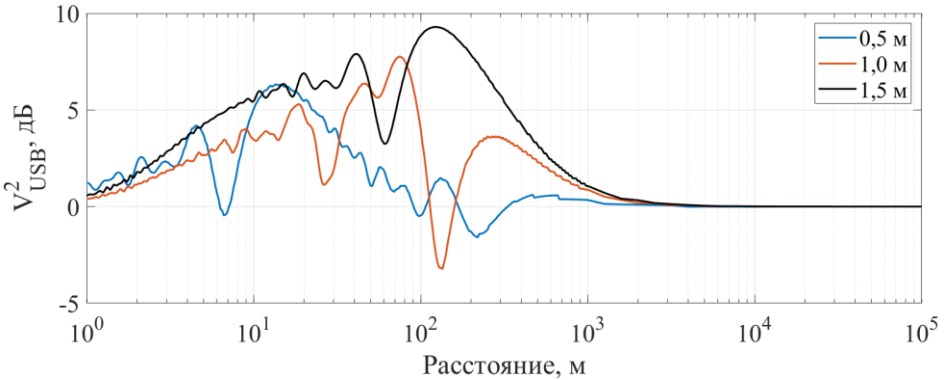


Рис. 5. Интерференционный множитель  $V^2_{\text{USB}}(r)$  при отражении от стен. Кривые соответствуют позиции приемника и передатчика относительно от одной из стен.

Fig. 5. Interference factor  $V^2_{\text{USB}}(r)$  when reflected from walls.

The curves correspond to the position of the receiver and transmitter relative to one of the walls

Отражение этой же СШП волны от пары поверхностей «пол — потолок» происходит аналогично (рис. 6). Поляризация падающей волны здесь, соответственно, вертикальная. Так как «высоты» расположения антенн передатчика и приемника относительно пола и потолка сильно различаются, области расстояний на графике, в которых наблюдаются колебания, соответствующие интерференции прямой и одной из отраженных волн, заметно разошлись. Интерференционные колебания, соответствующие отражению от пола, наблюдаются в области  $r = 10$ — $50$  м, а отражению от потолка — в области  $r = 100$ — $1000$  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).

Одновременный учет отражений от пола-потолка и стен дает график  $V^2_{\text{USB}}(r)$  на рис 7.

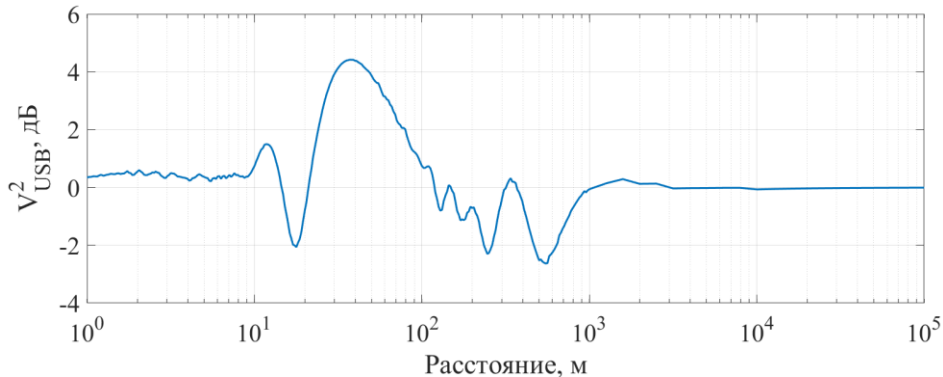


Рис. 6. Интерференционный множитель  $V^2_{USB}(r)$ . Отражение от пола ( $h = 0,8$  м) и потолка ( $h = 4,0$  м).

Fig. 6. Interference factor  $V^2_{USB}(r)$ . Reflection from the floor ( $h = 0.8$  m) and ceiling ( $h = 4.0$  m)

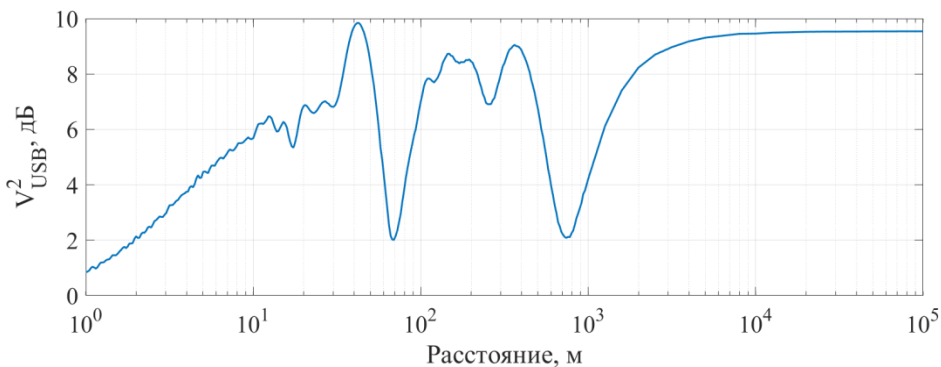


Рис. 7. Интерференционный множитель  $V^2_{USB}(r)$ . Отражение от пола, потолка и стен.

Fig. 7. Interference factor  $V^2_{USB}(r)$ . Reflection from the floor, the ceiling and the walls

Главное отличие кривой на рис. 7 то, что на больших расстояниях график выходит на асимптоту  $V^2_{USB}(r) = 9$  (9,5 дБ), а не  $V^2_{USB}(r) = 1$  (0 дБ), Это связано с тем, что при суммировании прямой волны  $s(t)$  и четырех отраженных  $u(t)$ , равных ей по амплитуде и противоположных по знаку (при суммировании не учитывалась поляризация), суммарный сигнал равен  $-3u(t)$ , что и дает множитель по амплитуде  $V_{USB}(r) = 3$  (4,8 дБ), а по мощности  $V^2_{USB}(r) = 9$  (9,5 дБ) (см. рис. 7). Этот результат еще раз подтверждает, что многолучевая среда позволяет собрать больше энергии в точке приема, чем свободное пространство. Однако, так как  $V_{USB}(r) = const$ , скорость затухания мощности волны на больших расстояниях такая же, как в свободном пространстве,  $n = 2$ .

Таким образом, в рамках данной модели интерференционный множитель  $V_{\text{USB}}(r)$  можно аппроксимировать зависимостью  $V_{\text{USB}}(r) = \text{const}$ , за исключением небольших по размаху колебаний (несколько децибел) на малых расстояниях. Благодаря этому расчетный показатель затухания  $n$  всегда не хуже, чем в свободном пространстве, т. е.  $n \leq 2$ , а формула Введенского в помещении не работает. Физический механизм данного явления заключается, по-видимому, в том, что распространение волны ограничивается объемом помещения, поэтому энергия волны не теряется так, как это происходит на открытой местности, где волна рассеивается на бесконечности.

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

### 3. Заключение

В докладе исследован вопрос распространения сверхширокополосной волны в помещении. Предложено обобщение классической двухлучевой модели, учитывающее парный характер основных отражений волны в помещении от параллельных поверхностей типа «пол — потолок», противоположные стены. Путем численного моделирования показано, что, в отличие от открытого пространства, в помещении не происходит дополнительного затухания мощности волны, более того, в многолучевой среде на входе приемника собирается больше энергии, чем в свободном пространстве, поэтому в случае прямой видимости показатель затухания мощности волны всегда  $n \leq 2$ .

Это объясняется тем, что на открытой местности прямая волна в точке приема гасится волной, отраженной от земли, так как при отражении фаза волны меняется на  $\pi$  (что эквивалентно изменению знака для СШП волны). В то же время в помещении в точку приема кроме прямой волны приходят, минимум, две отраженные волны (в каждой плоскости отражения), поэтому после суммирования волн остается минимум одна отраженная волна. По всей видимости, важно не столько то, чтобы отражения были парными, сколько то, чтобы имелись два или более отраженных лучей.

Таким образом, проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

1. По скорости затухания мощности сверхширокополосного сигнала среда помещения приближается к свободному пространству.

2. Открытая местность и помещения представляют собой очень разные среды распространения, поэтому прямое сравнение характеристик систем связи в этих средах неоправдано.

3. Предельная дальность действия *сверхширокополосных* систем связи в помещении (в условиях прямой видимости, *LOS*) должна быть выше, чем на открытой местности.

### Список литературы

1. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. 4-е изд. М. : Связь, 1972. 336 с.
2. Aguiar A., Gross J. Wireless Channel Models. Technical Report TKN-03-007. Berlin : April 2003.
3. Jodalen V., Pugh J., Vigneron P. Wideband propagation characteristics at 312 MHz in Eastern Norway and impact on waveform requirements // Proc. 2015 IEEE Mil. Comm. Conf. (MILCOM 2015). 2015. P. 1673—1678.
4. Tuset-Peiró P., Anglès-Vazquez A. et al. On the suitability of the 433 MHz band for M2M low-power wireless communications: propagation aspects // Trans. Emerging Tel. Tech. 2013. Vol. 25, no. 12. P. 1154—1168.
5. Molisch A. F. Wireless Communications. 2<sup>nd</sup> ed. Wiley, 2010.
6. Экспериментальное исследование распространения сверхширокополосных хаотических сигналов в помещениях / Ю. В. Андреев и др. // Успехи совр. радиоэлектроники. 2013. № 3. С. 55—66.
7. Рытов С. М. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 1. Случайные процессы. М. : Наука, 1966.

### Информация об авторах

**Андреев Юрий Вениаминович**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, заведующий лабораторией беспроводных технологий Московского физико-технического института, Российская Федерация.

**Петросян Манвел Мгерович**, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Российская Федерация.

# “Waveguide” Effect of Ultrawideband Signal Indoor Propagation

Yu. V. Andreyev<sup>1,2</sup> and M. M. Petrosyan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Radio Engineering and Electronics n. a. V. A. Kotelnikov RAS  
11, bldg. 7 Mokhovaya st., Moscow, GSP-3, 125009, Russian Federation  
andreev.iuv@mipt.ru*

<sup>2</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology (national research university)  
9, Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russian Federation*

Received: May 19, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

**Abstract:** “Waveguide” effect that occurs by indoor propagation of ultrawideband signals is shown. The effect exhibits itself in the absence of interference factor of signal dissipation at any distance. Unlike outdoor propagation, the signal attenuation in multipath indoor environment is similar to free space. The effect occurs due to reflections of the incident wave from paired opposite surfaces, e.g., floor – ceiling, parallel walls. As a result, the distance range of indoor ultrawideband communications is essentially higher than outdoors. The effect is simulated in a three-ray reflection model.

**Keywords:** ultrawideband, signal propagation, two-ray reflection model, Vvedensky formula, chaotic signal.

**For citation (IEEE):** Yu. V. Andreyev and M. M. Petrosyan, ““Waveguide” Effect of Ultrawideband Signal Indoor Propagation,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 3, pp. 304–317, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.3.22. (In Russ.).

## References

- [1] M. P. Dolukhanov, *Propagation of radio waves*. 4<sup>th</sup> ed. Moscow: Svyaz’, 1972. (In Russ.).
- [2] A. Aguiar and J. Gross, *Wireless Channel Models*, Technical Report TKN-03-007, Berlin, April 2003.
- [3] V. Jodalen, J. Pugh, and P. Vigneron, “Wideband propagation characteristics at 312 MHz in Eastern Norway and impact on waveform requirements,” *Proc. 2015 IEEE Mil. Comm. Conf. (MILCOM 2015)*, pp. 1673–1678, 2015.
- [4] P. Tuset-Peiró, A. Anglès-Vazquez, J. López-Vicario, and X. Vilajosana-Guillén, “On the suitability of the 433 MHz band for M2M low-power wireless communications: propagation aspects,” *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 25, no. 12, pp. 1154–1168, Jul. 2013, doi: 10.1002/ett.2672.
- [5] A. F. Molisch, *Wireless Communications*, 2<sup>nd</sup> ed. Wiley, 2010.
- [6] Yu. V. Andreev, A. S. Dmitriev, V. A. Lazarev, and A. I. Ryzhov, “Experimental study of the propagation of ultra-wideband chaotic signals in rooms,” *Uspekhi sovr. radioelectron.*, no. 3, pp. 55–66, 2013. (In Russ.).

- [7] S. M. Rytov, *Introduction to statistical radiophysics. Part 1. Random processes*, Moscow: Nauka, 1966. (In Russ.).

### **Information about the authors**

**Yuri V. Andreyev**, Dr.Sci., senior researcher of the Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, head of Wireless technology lab of the Moscow Institute of Physics and Technology, Russian Federation.

**Manvel M. Petrosyan**, C.Sci., researcher of the Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Russian Federation.