

# МНОГОЛУЧЕВОЕ УСИЛЕНИЕ В СИСТЕМАХ СШП СВЯЗИ НА ХАОТИЧЕСКИХ СИГНАЛАХ

Андреев Ю. В., Дмитриев А. С., Клецов А. В.  
 ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН  
 ул. Моховая, 11, корп. 7, в. Москва, 125009 Россия  
 тел.: +7 495 629 7278, e-mail: chaos@cplire.ru

**Аннотация** — В докладе исследуется эффект «многолучевого усиления» в системе связи на хаотических радиоимпульсах. Для диапазона 3–10 ГГц эффект многолучевого усиления начинается с длины импульсов более 20 нс. Оценки показывают величину коэффициента многолучевого усиления от 4 до 13–14 дБ в зависимости от условий распространения. Многолучевое усиление позволяет существенно улучшить характеристики хаотических систем связи.

## I. Основная часть

Анализируя распространение сигнала от передатчика к приемнику, нетрудно заметить, что в многолучевой среде, в принципе, увеличивается количество энергии, поступающей на вход приемника, так как энергия доставляется на вход приемника не только по прямому лучу, но и по другим лучам (правда, с задержкой). Поэтому многолучевую среду можно рассматривать как «систему зеркал», собирающую на входе приемника энергию передатчика, которая иначе была бы рассеяна в пространстве. Следовательно, имеет смысл говорить об усилении сигнала в многолучевой среде и ввести коэффициент многолучевого усиления сигнала  $K_M$ , определив его как отношение мощности полного сигнала на входе приемника  $P_M$  к мощности сигнала  $P_1$ , доставляемого самым сильным лучом:

$$K_M = P_M/P_1.$$

Такое определение имеет смысл и в канале без прямого луча, так как в этом случае приемник обычно настраивают на самый мощный луч из доступных.

Почему же многолучевое распространение считается «неизбежным злом»? Ответ кроется в типе сигналов. Узкополосные сигналы традиционных систем связи, приходящие в приемник с разных направлений, являются коррелированными, и результат их сложения определяется (случайным) соотношением их фаз.

В последние десятилетия в практику массовой радиосвязи вводятся сверхширокополосные (СШП) радиосигналы (например, сверхкороткие импульсы [1], хаотические сигналы [2]), которые обладают особыми свойствами, в частности, малым временем автокорреляции. Такие сигналы, приходя в приемник с разных направлений, оказываются некоррелированными и могут складываться по мощности. Поэтому в СШП системах многолучевое усиление может проявляться.

Для описания процесса распространения сигнала в многолучевой среде от передатчика к приемнику возьмем модель канала в виде фильтра с конечной импульсной характеристикой  $H(t)$ . В данном докладе использованы СШП модели, предложенные Комитетом по стандартизации IEEE 802.15.4a [3].

При оценке коэффициента многолучевого усиления СШП сигнала  $K_M$  следует принять во внимание, что предельные значения коэффициента многолучевого усиления можно получить, если приемник будет собирать энергию всех задержанных лучей. Однако это не всегда возможно.

В современных системах связи цифровая информация кодируется радиоимпульсами. Если дли-

тельность радиоимпульса много меньше длительности характеристики канала  $H(t)$ , то большая часть энергии задержанных лучей не попадает на интервал времени импульса, пришедшего на основном луче. Если увеличить интервал времени, на котором собирается энергия символа, это приведет к пропорциональному ухудшению отношения сигнал/шум.

Таким образом, для коротких и особенно сверхкоротких импульсов многолучевого усиления нет, или оно технически нереализуемо.

Табл. 1. Алгоритм оценки коэффициента многолучевого усиления

Table 1. Algorithm of evaluating of multipath gain

<b>Хаотический радиосигнал</b>
<b>В:</b> реализация $x(t)$
<b>Ч:</b> спектральная плотность мощности $X(f)$
<b>Прямоугольная огибающая радиоимпульса</b>
<b>В:</b> $p(t, T) = \begin{cases} 0, & t < 0, \quad t > T \\ 1, & 0 \leq t \leq T \end{cases}$
<b>Ч:</b> $P(f, T) = 2T \sin(\pi f T) / (\pi f T)$
<b>Формирование хаотического радиоимпульса</b>
<b>В:</b> $x(t) \cdot p(t, T)$
<b>Ч:</b> $X(f) \otimes P(f, T)$
<b>Прохождение радиоимпульса через канал</b>
<b>В:</b> $[x(t) \cdot p(t, T)] \otimes H(t)$
<b>Ч:</b> $[X(f) \otimes P(f, T)] \cdot H(f)$
<b>Усечение радиоимпульса</b>
<b>В:</b> $\{ [x(t) \cdot p(t, T)] \otimes H(t) \} \cdot p(t, T)$
<b>Ч:</b> $\{ [X(f) \otimes P(f, T)] \cdot H(f) \} \otimes P(f, T)$
<b>Вычисление коэффициента усиления <math>K_M</math></b>
<b>В:</b> $E_M = \int_0^T (\{ [x(t) \cdot p(t, T)] \otimes H(t) \} \cdot p(t, T))^2 dt$
<b>Ч:</b> $E_M = \int_{f_1}^{f_2} \{ [X(f) \otimes P(f, T)] \cdot H(f) \} \otimes P(f, T) df$
<b>В:</b> $E_1 = \int_0^T [x(t) p(t, T)]^2 dt \cdot H^2(t_k)$
<b>Ч:</b> $E_1 = \int_{f_1}^{f_2} [X(f) \otimes P(f, T)] df \cdot H^2(t_k)$
<b><math>K_M = E_M/E_1</math></b>

В прямохаотических СШП системах связи информация передается при помощи последовательности хаотических радиоимпульсов [2], которые в настоящее время научились генерировать непосредственно в нужной полосе частот, с заданной шириной спектра и даже с требуемой огибающей спектра мощности [4].

Оценку величины коэффициента многолучевого усиления в зависимости от длительности радиоим-

пульсов  $T$  можно провести как во временной (**В**), так и в частотной (**Ч**) области (см. Табл. 1).

Прежде всего, нужно получить хаотический сигнал в нужной части спектра, затем сформировать радиоимпульс длительностью  $T$ , умножив сигнал на «прямоугольную» огибающую, и пропустить его через два канала: многолучевой канал с характеристикой  $H(t)$  и воображаемый однолучевой канал  $H^1(t)$ , полученный из  $H(t)$  путем обнуления всех откликов кроме максимального  $H(t_k)$ . Расплывшийся в многолучевом канале радиоимпульс необходимо обрезать, чтобы посчитать энергию только на интервале  $T$ .

Результаты расчетов максимального коэффициента многолучевого усиления, полученные в пределе  $T \rightarrow \infty$ , т.е.  $p(t, T) = 1$  (бесконечно длинные импульсы, собирается энергия всех лучей) приведены в Табл. 2.

Табл. 2. Многолучевое усиление в различных моделях СШП канала стандарта IEEE 802.15.4a

Table 2. Multipath gain in various UWB channel models of IEEE 802.15.4a standard

Модель канала	Многолучевое усиление $K_M$ , дБ	
	LOS*	NLOS**
Жилище	5	14
Офис	4	12
Открытое пр-во	5	5
Промзона	8	13

\* LOS – канал с прямым лучом

\*\* NLOS – канал без прямого луча

При уменьшении длительности хаотических радиоимпульсов многолучевое усиление  $K_M$  падает. Для примера на рис. 1 для одной из моделей СШП каналов приведены результаты расчета  $K_M$  (несколько реализаций для данного типа канала).

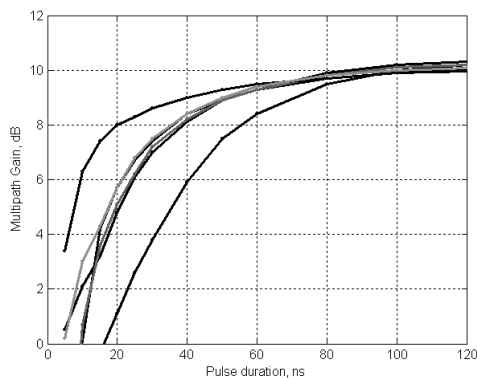


Рис. 1. Зависимость коэффициента многолучевого усиления  $K_M$  от длительности хаотического радиоимпульса  $T$  (модель CM4a Office NLOS).

Fig. 1. Multipath gain  $K_M$  as function of duration of chaotic radio pulse  $T$  (model CM4a Office NLOS)

Как следует из рис. 1, с увеличением длительности хаотического радиоимпульса  $T$  величина  $K_M$  приближается к пределу, приведенному в табл. 2. Начиная с  $T = 80 \dots 100$  нс, величина  $K_M$  практически равна максимальной для данного канала.

При уменьшении длительности хаотического радиоимпульса ниже  $T = 40 \dots 60$  нс величина  $K_M$  резко падает, что говорит о том, что все большая доля дополнительной энергии не попадает на временной интервал  $T$  основного сигнала (падает на защитный интервал) и теряется. Для данного типа СШП каналов многолучевое усиление наблюдается при длительностях импульсов от 10–20 нс.

## II. Заключение

Многолучевое усиление дает выигрыш 5–14 дБ в энергетической эффективности системы связи в зависимости от многолучевой среды, что равносильно увеличению дальности действия системы связи в 2–6 раз при неизменной мощности передатчика.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 09-02-00983-а, № 09-07-92651-ИНД\_а.

## III. Список литературы

- [1] Siwiak K., McKeown D. Ultra-Wideband Radio Technology. Wiley, 2004.
- [2] Прямохаотические схемы передачи информации в сверхвысокочастотном диапазоне / А.С. Дмитриев и др. // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 2. с. 224.
- [3] Molisch A. F. IEEE 802.15.4a Channel Modeling Subcommittee Report Final. URL: <http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/04/15-04-0662-02-004a-channel-model-final-report-r1.pdf> (дата обращения: 20.05.2010).
- [4] Ефремова Е. В. Генераторы хаотических колебаний радио и СВЧ диапазона // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 1, С. 17–31.

## MULTIPATH AMPLIFICATION IN UWB COMMUNICATION SYSTEMS WITH CHAOTIC SIGNALS

Andreyev Yu. V., Dmitriev A. S., Kletsov A. V.  
Kotelnikov Institute of Radio Engineering  
and Electronics of RAS  
Mokhovaya st., 11/7, Moscow, 125009 Russia  
phone: +7 495 629 7278, e-mail: chaos@cplire.ru

**Abstract** — The effect of multipath amplification in the communication system with chaotic radio pulses has been investigated. For 3–10 GHz range the effect develops from the pulse length 20 nsec. The estimates show multipath gain from 4 to 13–14 dB depending on propagation conditions. Multipath amplification substantially improves performance of chaotic communication systems.

## I. Main Part

Multipath environment might be treated as a “system of mirrors” that delivers extra energy of the transmitter to the receiver input; otherwise that energy will be wasted. So, the multipath environment might possibly amplify the receiver signal. We define Multipath Gain  $K_M$  as ratio of signal power delivered by all paths to signal power of the main path.

In the narrowband system the path signals are correlated, so the total signal depends on the phase relations, i.e., it is unpredictable. UWB signals have very small autocorrelation time, so, the signals on different paths are uncorrelated and their powers are summed.

Algorithm for evaluation of Multipath Gain is given (Table 1). Estimates show that for IEEE 802.15.4a UWB channel models the value of Multipath Gain amounts to 4 - 14 dB, depending on the environment (Table 2).

These estimates are valid for sufficiently long radio pulses (e.g., UWB chaotic radio pulses). As the pulse length decreases, the gain decreases rapidly (Fig.1). The effect of multipath amplification is observed for chaotic radio pulses longer than approx. 20 nsec. So, it might not be observed in the case of ultrashort pulses.

## II. Conclusion

In direct chaotic communications, based on chaotic radio pulses, the effect of multipath amplification promises to increase the distance range in 2–6 times for the same transmitter power.