

## ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕСПРОВОДНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ НА СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ХАОТИЧЕСКИХ РАДИОИМПУЛЬСАХ В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНЫХ КАНАЛОВ

Кузьмин Л.В.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН  
г. Москва, ул. Моховая, 11/7 lvk@cplire.ru

*Рассматриваются характеристики беспроводной системы связи на сверхширокополосных хаотических радиоимпульсах в условиях реальных каналов, под которыми понимаются реалистичные модели распространения сверхширокополосного сигнала микроволнового диапазона в жилых и промышленных помещениях.*

### 1. Введение

Значительное продвижение в практическом использовании хаотических сигналов в коммуникационных системах связано с прямохаотической схемой связи (ПХСС), предложенной в 2000 г. в ИРЭ им В.А. Котельникова РАН [1], в которой хаотический сигнал модулируется и генерируется непосредственно в микроволновом диапазоне частот [1–5]. Данная схема относится к классу широкополосных или сверхширокополосных (СШП) беспроводных цифровых схем связи, в которой в качестве носителя информации используются СШП хаотические радиоимпульсы с шириной полосы от 500 до 2000 МГц. С использованием одних и тех же принципов, ПХСС позволяет создавать как высокоскоростные системы связи [1–3], так и низкоскоростные [4, 5] в диапазоне частот от 3 до 10 ГГц.

Характеристики ПХСС исследовались в канале белым шумом, для которого определялись достижимые вероятности ошибок на бит в зависимости от нормированного отношения сигнал/шум, и в канале с многолучевым распространением [6, 7], для которого определялись максимально достижимые скорости передачи, когда мощность многолучевой помехи значительно превышает мощность белого шума в приёмнике. Целью этой работы является оценка характеристик ПХСС в условиях совместного действия многолучевой помехи и аддитивного белого шума.

### 2. Модель канала связи

В ПХСС передаваемая информации кодируется в последовательность хаотических радиоимпульсов, излучаемых в эфир [1, 2]. На данный момент наибольшее практическое развитие получила схема модуляции, согласно которой единичные символы передаются путём излучения хаотического радиоимпульса длительности  $\tau_p$  на заданной временной позиции, нулевые символы кодируются отсутствием импульса. После каждого импульса предусмотрен защитный интервал длительности  $\tau_g$  для предотвращения межсимвольной интерференции, таким образом, что в эфир излучается поток импульсов изображённый на рис. 1а. Приём хаотических радиоимпульсов осуществляется с помощью детектора огибающей.

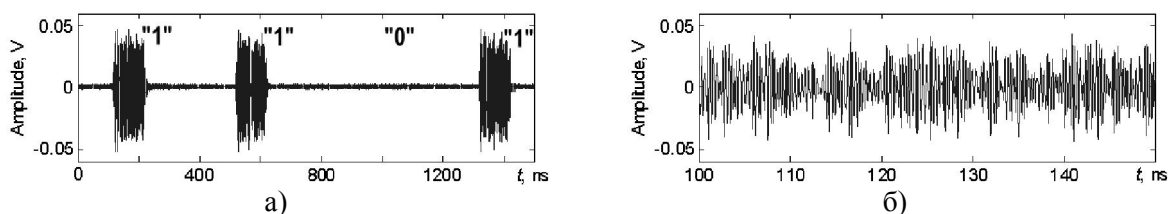


Рис. 1. Поток хаотических радиоимпульсов, излучаемых в эфир (а), соответствующих последовательности «1101», и фрагмент хаотического сигнала в пределах радиоимпульса (б).

Характеристики ПХСС в канале с белым шумом соответствуют характеристикам системы с ортогональной системой сигналов [1,2]. Вместе с тем для определения характеристик системы

в реальном канале следует принимать во внимание не только белый шум, но и многолучевое распространение. Рассматриваемая здесь модель канала имеет вид

$$y(t) = h(t) \otimes s(t) + n(t), \quad (1)$$

где  $s(t)$  – сигнал, излучаемый передатчиком;  $y(t)$  – сигнал, поступающий в приёмник из канала;  $n(t)$  – белый шум, имитирующий тепловой шум приёмника;  $h(t)$  – импульсная характеристика отклика канала, характеризующая многолучевое распространение; знак  $\otimes$  означает операцию свёртки. Конкретный вид импульсной характеристики  $h(t)$  описывается соотношением (2) [8, 9]:

$$h^{(i)}(t) = X^{(i)} \sum_{l=0}^L \sum_{k=0}^K \alpha_{k,l}^{(i)} \delta(t - T_l^{(i)} - \tau_{k,l}^{(i)}) \quad (2)$$

т.е. функция отклика  $h^{(i)}(t)$  на  $\delta$ -импульс в  $i$ -том канале формируется как сумма случайных слагаемых – лучей с амплитудой  $\alpha_{k,l}^{(i)}$  и запаздыванием  $\tau^{(i)} = T_l^{(i)} + \tau_{k,l}^{(i)}$ . Здесь  $i$  – номер канала связи в множестве возможных комбинаций пунктов излучения и приема для данного класса каналов,  $\alpha_{k,l}^{(i)}$  – множитель амплитуды  $k$ -того луча внутри  $l$ -того кластера;  $\{T_l^i\}$  – задержка первого луча  $l$ -го кластера;  $\{\tau_{k,l}^i\}$  – задержка  $k$ -того луча внутри  $l$ -того кластера относительно первого луча того же кластера;  $X^i$  – множитель задающий полную энергию лучей  $i$ -того канала. Под  $i$ -м каналом понимается некоторое взаимное расположение передатчика и приёмника в помещении данного класса.

Статистическое описание многолучевого распространения в виде (2) было получено на основании цикла экспериментальных работ, проведенных несколькими исследовательскими группами, в результате чего были предложены статистически усреднённые (различное взаимное расположения пары источник/приёмник, различные размеры и типы помещений, их геометрия, разнообразная внутренняя планировка) модели многолучевого распространения сигналов, позволяющие оценивать основные характеристики канала связи для различных ситуаций: наличии/отсутствии прямого луча, типичных расстояний, характерных групповых запаздываний и т.д. [8, 9].

Семейство моделей каналов [8] для высокоскоростных систем связи (беспроводных пикосетей, в которых скорости передачи могут достигать 480 Мб/с) классифицирует четыре ситуации: модель СМ1 соответствует наличию прямого луча, расстояние между передатчиком и приёмников до 4 м; СМ2 – прямого луча нет, расстояние до 4 метров; СМ3 и СМ4 – прямого луча нет, расстояние от 4 до 10 м, и СМ4 характеризуется большим среднеквадратичным разбросом по времени прихода первого луча.

Для низкоскоростных беспроводных СШП систем связи (беспроводные персональные сети или сенсорные сети), модели каналов [9] описывают девять различных ситуаций распространения сигнала между передатчиками приёмником на расстоянии до 30 м: в жилом помещении (СМ1, 2), офисе (СМ3, 4), вне помещений (загородные постройки СМ5,6), в промышленности (СМ7, 8), на сельскохозяйственных фермах (СМ9) и вблизи человеческого тела. Модели с нечётными номерами описывают ситуации с прямым лучом, с чётными – без прямого луча. В данной модели канала также определяется степень затухание сигнала с расстоянием, полученная на основе экспериментальных измерений для помещений различных типов и наличии/отсутствии прямого луча.

### 3. Действие канала на поток хаотических радиоимпульсов

Для анализа характеристик системы в канале (1) рассмотрим, как он действует на хаотические радиоимпульсы. При передаче через канал последовательности хаотических радиоимпульсов можно выделить две качественно различные ситуации: если длительность защитного интервала  $\tau_g$  превышает длительность отклика канала (рис. 2а), то межсимвольная интерфе-

рентия не имеет места и вероятность ошибки на бит в приёмнике определяется отношением мощности белого шума к мощности хаотических импульсов, прошедших канал. Если же длительность защитного интервала меньше длительности отклика канала (рис. 2б), то на текущую позицию хаотического радиоимпульса может накладываться сигнал последствия от предшествующего импульса, и в этом случае вероятность ошибки будет определяться отношением средней мощности импульсов к суммарной мощности белого шума и реверберационной помехи.



Рис.2. Действие канала на последовательность хаотических радиоимпульсов при длительности защитного интервала больше (а) и меньше (б) длительности отклика канала.

Рассмотрим ситуацию, когда длительность защитного интервала  $\tau_g$  превышает длительность отклика канала.

Предполагается, что постоянная времени детектора огибающей согласована с длительностью хаотического радиоимпульса, т.е. приёмник собирает энергию в пределах длительности хаотического радиоимпульса. Вследствие некогерентного сложения лучей в приёмнике, мощность в импульсе может быть оценена как сумма мощности лучей, попадающих в пределах временного интервала  $\tau_p$  длительности импульса, т.е. мощность принимаемого сигнала  $P_S$

может быть оценена как  $P_S = \sum_{l=0}^{L_p} \sum_{k=0}^{K_p} (\alpha_{k,l}^{(i)})^2$ , где  $L_p$  и  $K_p$  – число кластеров и лучей, соответ-

ственно, попадающих в приёмник в пределах времени  $\tau_p$  приёма очередного импульса. Величины  $L_p$  и  $K_p$  фактически определяются соотношением длительности импульсов и длительности отклика канала. Таким образом, для достижения максимального значения средней мощности  $P_S$  сигнала, прошедшего многолучевой канал, длительность импульсов должна быть согласована с длительностью отклика канала.

Отношение величины  $P_S$  к полной мощности импульсной характеристики канала является оценкой средних энергетических потерь хаотических импульсов в канале. Численная оценка этих потерь приведена на рис. 3. для моделей канала IEEE 802.15.3a (рис.3а) и IEEE 802.15.4a (рис. 3б).

Как видно из приведённых данных, энергетические потери уменьшаются с увеличением длительности импульса: для длительности импульса  $\tau_p = 10$  нс, для каналов всех типов энергетические потери составляют не более чем 4~дБ по отношению к средней энергии импульса. Для канала с прямым лучом модели IEEE 802.15.3a эти потери составляют около 0~дБ. Использование импульсов длительностью 100 нс позволяет свести к нулю потери в средней энергии радиоимпульсов для каналов всех типов.

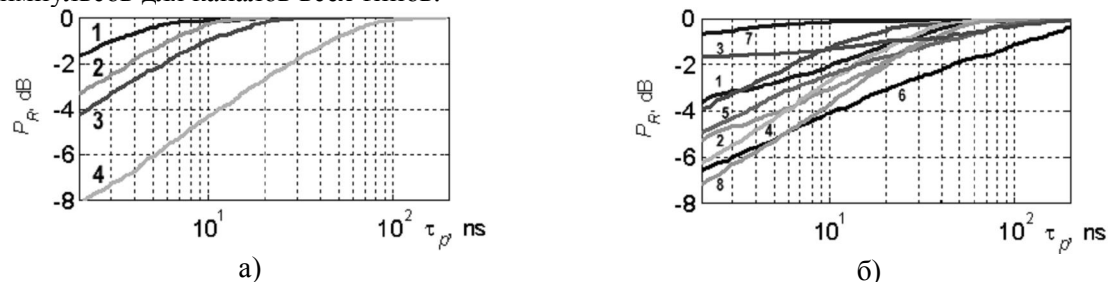


Рис. 3. Средние энергетические потери мощности  $P_S$  хаотических радиоимпульсов при прохождении через канал (1).

#### 4. Вероятность ошибки на бит

Энергетические оценки средней мощности импульсов после прохождения канала ничего не позволяют сказать о вероятности ошибки на бит, т.к. вероятность ошибки будет определяться не только отношением средней мощности импульса в приёмнике к мощности помехи, но и дисперсией энергии импульса  $\sigma_S$ .

В случае, если длительность импульса меньше длительности импульсного отклика канала (в данном случае это импульсы с длительностью 5, 10 и 20 нс), имеем  $L_p < L$  и  $K_p < K$ , дисперсия  $\sigma_S$  увеличивается по отношению к дисперсии энергии импульса для канала в котором действует только белый шум и вероятность ошибки растёт.

Если длительность импульса согласована с длительностью отклика канала или превышает её, то  $L_p = L$  и  $K_p = K$ , дисперсия энергии импульса равна его для канала с белым шумом. В этом случае можно ожидать, что характеристики ПХСС будут идентичны её характеристикам в канале с белым шумом, что и подтверждается прямыми расчётами, результаты которых приведены на рис. 4. для каналов СМ1,5,9, где показаны зависимость вероятности ошибки от нормированного отношения сигнал/шум  $E_b/N_0$  в приёмнике при длительностях импульсов 5, 10, 20 и 100 нс.

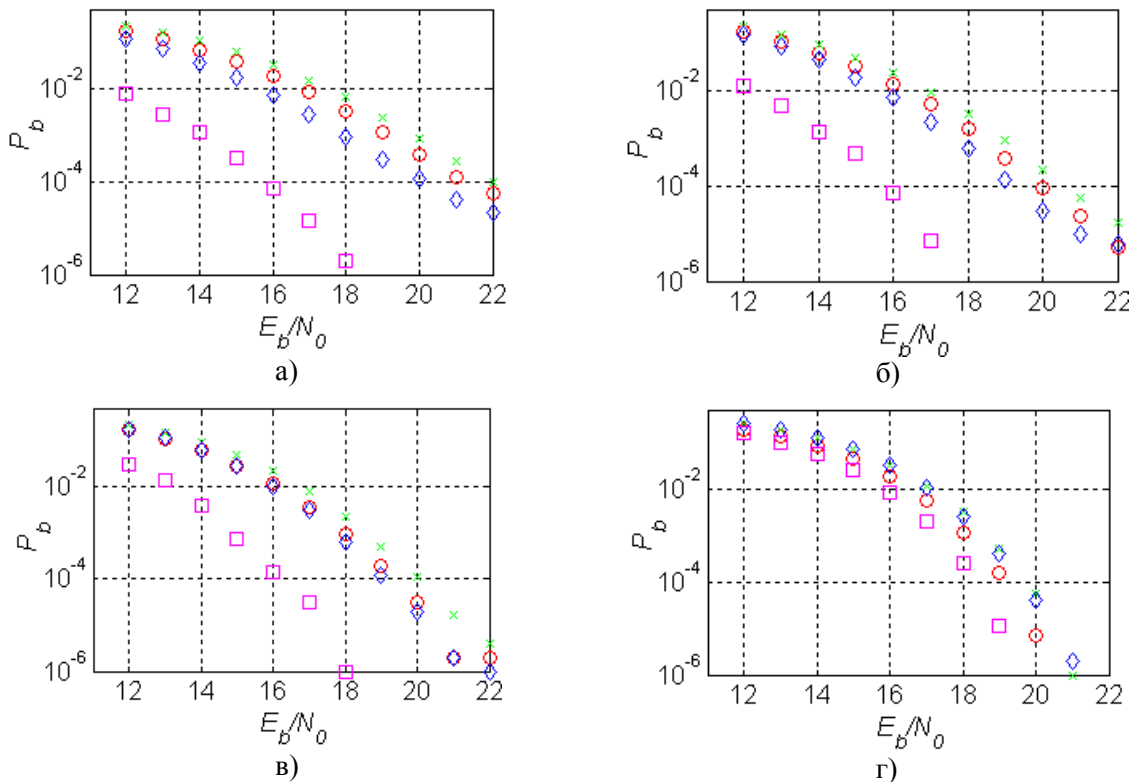


Рис. 4. Вероятность ошибки  $P_b$  от  $E_b/N_0$  для каналов СМ1 (окружности), СМ5 (крестики), СМ9 (ромбы) и канала с белым шумом (квадраты) для импульсов длиной: 5 (а), 10 (б), 20 (в) и 100 нс (г).

Таким образом, когда длительность импульса согласована с длительностью отклика канала, расчёт энергетического бюджета канала связи будет аналогичен расчёту бюджета канала для свободного пространства, у которого показатель затухания имеет значение, определяемое конкретными условиями распространения сигнала. Это, в частности, верно для низкоскоростных СШП систем связи на хаотических радиоимпульсах, в которых скорость передачи между приёмников и передатчиком составляет единицы мегабит в секунду.

В случае, когда длительность импульса меньше длительности отклика канала, при расчёте бюджета канала связи следует учитывать как энергетические потери в импульсах, так и увели-

чение вероятности ошибки на бит, вызванное увеличением дисперсии энергии импульса вследствие многолучевого распространения.

Это свидетельствует о том, что осуществлять высокоскоростную прямохаотическую передачу не целесообразно, когда мощность реверберационной помехи, мощность белого шума и мощность хаотических радиоимпульсов сопоставимы между собой. В этом случае практически и физически имеет смысл рассматривать ситуацию, когда мощность импульсов в приёмнике намного больше мощности белого шума  $P_S \gg P_N$  (т.е., например, для коротких расстояний между передатчиком и приёмником) и основную роль в формировании ошибки играет многолучевая помеха, т.е. когда  $P_M \gg P_N$ . В этом случае вероятность ошибки на бит уже полностью будет определяться многолучевой помехой, защитный интервал может быть сравним с длительностью отклика канала и физически целесообразно оценивать максимально достижимые скорости передачи, для которых в случае использования энергетического приёмника достижимыми являются скорости порядка 30 Mbps [7] при вероятности ошибки на бит  $P_b = 10^{-4}$ . Использование же специальных алгоритмов позволит достигать скорости передачи до 100 Мб/с при сопоставимой вероятности ошибки [6].

## 5. Заключение

Показано, что энергетические характеристики ПХСС и вероятность ошибки на бит в реальных каналах связи практически идентичны аналогичным характеристикам ПХСС в канале с белым шумом при длительности импульсов, согласованной с длительностью отклика канала, что позволяет рассчитывать бюджет канал связи ПХСС таким же образом, как и в случае канала с белым шумом. Для более коротких импульсов (~20 нс и менее, что означает потенциально высокие скорости передачи) в реальных каналах характеристики системы ухудшаются на ~5-6 дБ по параметру «нормированное отношение сигнал-шум»  $E_b/N_0$  при сопоставимой вероятности ошибки для канала с белым шумом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Максимов Н.А. и др. «Перспективы создания прямохаотических систем связи в радио и СВЧ диапазонах», Радиотехника, 2000, № 3, с.9-20.
2. Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Панас А.И. и др., «Прямохаотические схемы передачи информации в сверхвысокочастотном диапазоне», РиЭ, 2001, Т. 46, № 2, 224-233.
3. Dmitriev A.S., Kyarginsky B.Ye., Panas A.I., and Starkov S.O., “Experiments on ultra wideband direct chaotic information transmission in microwave band”, Int. J. Bifurcation & Chaos, 2003, vol. 13, No. 6, pp. 1495–1507.
4. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Клецов А.В., Кузьмин Л.В., Лактюшкин А.М., Юркин В. Ю. "Сверхширокополосная беспроводная связь и сенсорные сети", РиЭ, 2008, т. 53, №10, с. 1278–1289.
5. Andreyev Yu.V., Dmitriev A.S., Efremova E.V. et al. “Qualitative theory of dynamical systems, chaos and contemporary communications”, Int. J. Bifurcation and Chaos, 2005, vol. 15, No. 11, pp. 3639–3651.
6. Кузьмин Л.В., Морозов В.А., Старков С.О., Хаджи Б.А. «Анализ помехоустойчивости приема сверхширокополосных хаотических сигналов в условиях многолучевого распространения внутри помещений», РиЭ, 2006, Т. 51, №11, с. 1360–1367.
7. Кузьмин Л.В., Морозов В.А. «Статистические характеристики ансамбля сверхширокополосных линий связи в условиях многолучевого распространения внутри помещений», РиЭ, 2009, т. 54, №3, С. 329–338.
8. Channel Modeling Sub-committee Report Final. November 2002. IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs). [http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/2002/Nov02/02490r0P802-15\\_SG3a-Channel-Modeling-Subcommittee-Report-Final.zip](http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/2002/Nov02/02490r0P802-15_SG3a-Channel-Modeling-Subcommittee-Report-Final.zip)
9. Channel Modeling Sub-committee Report Final. / IEEE P802.15.4a Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs), Dec. 2004. <http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/04/15-04-0662-02-004a-channel-model-final-report-r1.pdf>