

Распространение и приём сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов в реалистичных каналах связи

Л.В. Кузьмин

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

Рассматривается распространение и приём сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов через реалистичный канал связи, в качестве которого понимается многолучевое распространение и белый шум. Анализируется результат действия этих факторов на приём хаотических радиоимпульсов, и приводятся результаты численного моделирования по определению характеристик прямохаотической схемы связи, в которой хаотические радиоимпульсы являются информационным носителем.

Propagation and receive of chaotic radiopulses in realistic channels are considered. Realistic channels discussed here include multipath propagation and white noise at the receiver. The influence of these factors are analyzed, and results of numerical simulations regarding to the performance of direct chaotic communication systems where chaotic radio pulses are used as information carrier are presented. The multipath ultrawideband channel model of microwave band is used as realistic channel model.

Хаотические радиоимпульсы являются информационным носителем в прямохаотической схеме связи (ПХСС), предложенной и экспериментально апробированной в 2000 г. в ИРЭ им В.А. Котельникова РАН [1]. В данной схеме связи широкополосный или сверхширокополосный хаотический сигнал модулируется и генерируется непосредственно в радиодиапазоне [1–5].

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.

В ПХСС передаваемая информации кодируется последовательностью 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 τ_p на заданной временной позиции, нулевые символы кодируются отсутствием импульса. После каждого импульса предусмотрен защитный интервал длительности τ_g для предотвращения межсимвольной интерференции (рис. 1а).

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.

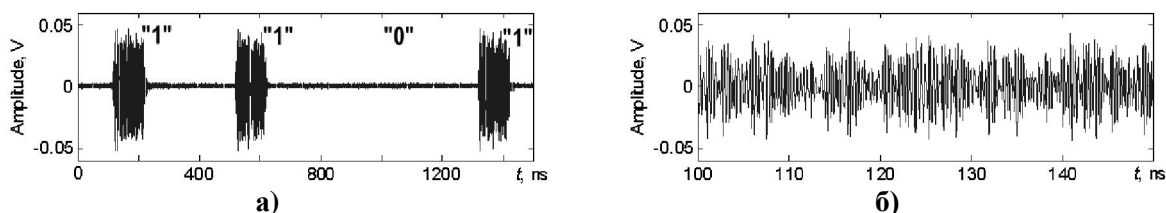


Рис. 1. Поток хаотических радиоимпульсов, излучаемых в эфир (а), соответствующих последовательности «1101», и фрагмент хаотического сигнала в пределах радиоимпульса (б).

Приём хаотических радиоимпульсов осуществляется с помощью детектора огибающей, т.е. на выходе приёмника формируется сигнал

$$i(t) = \int_{t-\tau_p}^t y^2(p) dp, \quad (2)$$

являющийся огибающей хаотических радиоимпульсов. Предполагается, что постоянная времени детектора огибающей согласована с длительностью хаотического радиоимпульса, т.е. приёмник собирает энергию в пределах длительности хаотического радиоимпульса. Выражение (2) можно представить в виде суммы слагаемых

$i'(t) = \varepsilon_p + \varepsilon_{pn} + \varepsilon_n$, где $\varepsilon_p(t) = \int_{t-\tau_p}^t (h(p) \otimes s(p))^2 dp$ – энергия хаотического радиоимпульса

после прохождения канала; $\varepsilon_{pn}(t) = 2 \int_{t-\tau_p}^t (h(p) \otimes s(p))n(p) dp$ – перекрёстный член в

среднем равный нулю в силу некоррелированности СШП хаотического сигнала и белого

шума; и $\varepsilon_n(t) = \int_{t-\tau_p}^t n^2(p) dp$ – энергия белого шума в пределах хаотического импульса.

Рассматриваемая ниже модель $h(t)$ импульсной характеристики отклика канала описывает результат распространения СШП сигналов в диапазоне от 3 до 10 ГГц в помещениях различных типов в беспроводных СШП системах связи (беспроводные персональные сети или сенсорные сети) [8]. Модели каналов [8] описывают девять различных ситуаций распространения сигнала между передатчиком и приёмником: в жилом помещении (СМ1, 2), офисе (СМ3, 4), вне помещений (загородные постройки, СМ5,6), в промышленности (СМ7, 8), на фермах (СМ9) и вблизи человеческого тела. Модели с нечётными номерами описывают ситуации с прямым лучом, с чётными – без прямого луча.

Конкретный вид импульсной характеристики канала $h(t)$ описывается выражением:

$$h^{(i)}(t) = X^{(i)} \sum_{l=0}^L \sum_{k=0}^K \alpha_{k,l}^{(i)} \delta(t - T_l^{(i)} - \tau_{k,l}^{(i)}) \quad (3)$$

где функция отклика $h^{(i)}(t)$ на δ -импульс в i -том канале, соответствующему некоторому взаимному расположению передатчика и приёмника, формируется как сумма лучей с амплитудой $\alpha_{k,l}^{(i)}$ k -го луча внутри l -го кластера и запаздыванием $\tau^{(i)} = T_l^{(i)} + \tau_{k,l}^{(i)}$; $\{T_l^{(i)}\}$ –

задержка первого луча l -го кластера; $\{\tau_{k,l}^i\}$ – задержка k -того луча внутри l -того кластера относительного первого луча того же кластера; X^i – множитель, задающий полную энергию лучей i -го канала.

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 (межимпульсного) интервала τ_g превышает длительность отклика канала (рис. 2а), то межсимвольная интерференция 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.

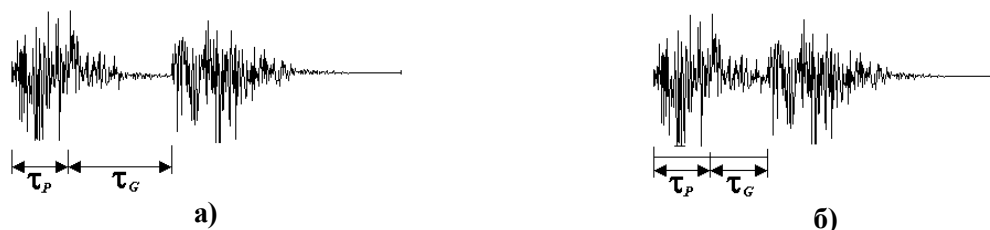


Рис.2. Действие канала на последовательность хаотических радиоимпульсов при длительности защитного интервала больше (а) и меньше (б) длительности отклика канала.

Далее рассматривается ситуация, когда длительность защитного интервала τ_g превышает длительность отклика канала. Проанализируем как изменяется средняя энергия импульса и вероятность ошибки на бит в канале с многолучевым распространением по отношению к каналу только с белым шумом без многолучевого распространения.

Вследствие некогерентного сложения лучей в приёмнике, энергия хаотического радиоимпульса в приёмнике оценивается как произведение средней мощности P_R в пределах импульса на его длительность τ_p : $\langle \varepsilon_p \rangle = \langle P_R \rangle \tau_p$. Средняя мощность лучей, попадающих в приёмник, с учётом модели (2) может быть определена как

$\langle P_R \rangle = \sum_{l=0}^{L_p} \sum_{k=0}^{K_p} (\alpha_{k,l}^{(i)})^2$, где L_p и K_p – число кластеров и лучей, соответственно, попадающих в приёмник в пределах времени τ_p приёма очередного импульса. Величины L_p и K_p фактически определяются соотношением длительности импульса и длительности отклика канала. Для достижения максимального значения средней мощности $\langle P_R \rangle$, длительность импульсов должна быть согласована с длительностью отклика канала.

При условии, что суммарная мощность всех лучей нормирована на единицу $\sum_{l=0}^L \sum_{k=0}^K (\alpha_{k,l}^{(i)})^2 = 1$, величина $\langle P_R \rangle$ является оценкой средних энергетических потерь импульсов в канале. Численная оценка этих потерь приведена на рис. 3 для канала [8].

Энергетические потери уменьшаются с увеличением длительности импульса: для длительности импульса $\tau_p = 10$ нс, в каналах всех типов энергетические потери составляют не более чем 4~дБ по отношению к средней энергии импульса. Использование им-

пульсов длительностью 100 нс позволяет свести к нулю потери средней энергии радиоимпульсов для каналов всех типов.

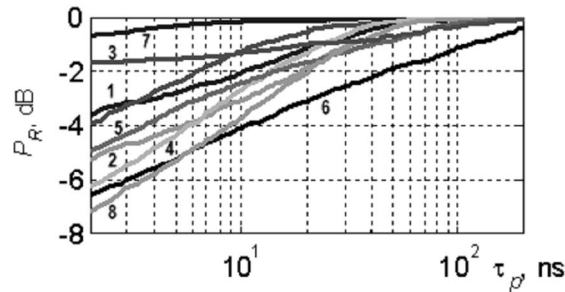


Рис. 3. Средние энергетические потери мощности P_R хаотических радиоимпульсов при прохождении через канал (1).

Вероятность ошибки на бит после прохождения канала будет определяться не только отношением средней мощности импульса в приёмнике к мощности помехи, т.е. отношением $\varepsilon_p / \varepsilon_n$, но и распределением энергии импульсов ε_p и распределением энергии шума ε_n . В канале с белым шумом распределение величины ε_p будет определяться только статистическими свойствами хаотического сигнала. После прохождения канала с многолучевым распространением, дисперсия энергии импульса увеличивается, что приводит к увеличению вероятности ошибки на бит P_B .

Расчёт вероятности ошибки на бит для импульсов различной длительности (5, 10, 20 и 100 нс) проводился путём численного моделирования. Если длительность импульса меньше длительности импульсного отклика канала (в данном случае это импульсы с длительностью меньше 100 нс), дисперсия $\sigma(\varepsilon_p)$ увеличивается по отношению к дисперсии энергии импульса до прохождения канала и вероятность ошибки растёт.

Если длительность импульса согласована с длительностью отклика канала или превышает её, то дисперсия энергии импульса до и после канала практически не меняется. 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.

Таким образом, когда длительность импульса согласована с длительностью отклика канала, характеристики ПХСС в канале с многолучевым распространением будут практически идентичны характеристикам в канале с белым шумом.

В случае, когда длительность импульса меньше длительности отклика канала (~20 нс и менее, что означает потенциально высокие скорости передачи), при расчёте характеристик ПХСС следует учитывать как средние энергетические потери импульсов, так и увеличение вероятности ошибки на бит, вызванное увеличением дисперсии энергии импульса вследствие многолучевого распространения. В реальных каналах характеристики системы при этом ухудшаются на ~5-6 дБ по параметру «нормированное отношение сигнал-шум» E_b / N_0 при сопоставимой вероятности ошибки для канала с белым шумом.

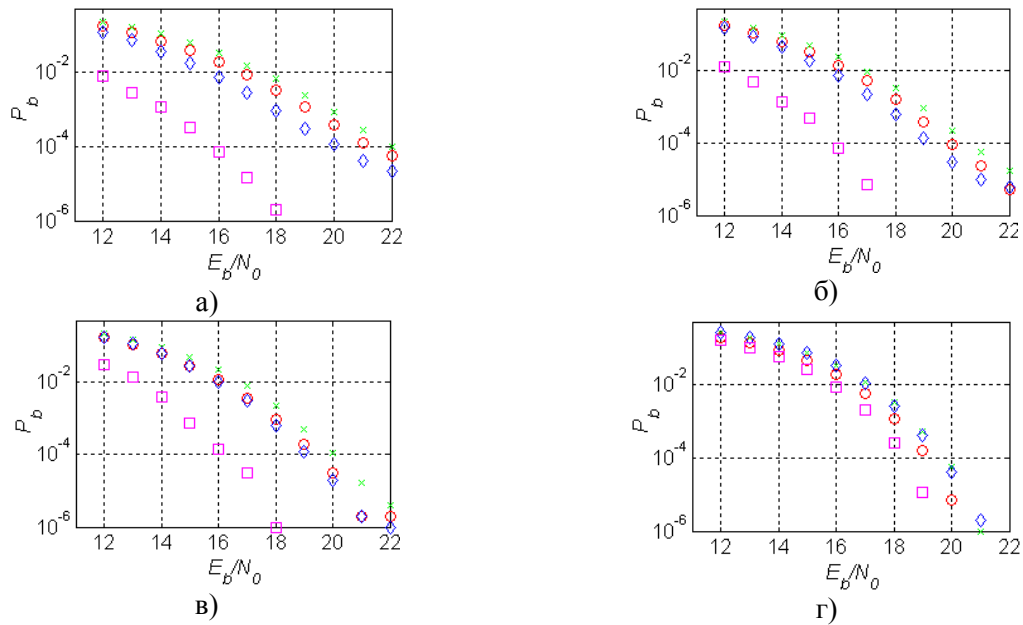


Рис. 4. Вероятность ошибки P_b от E_b/N_0 для каналов СМ1 (окружности), СМ5 (крестики), СМ9 (ромбы) и канала с белым шумом (квадраты) для импульсов длиной: 5 (а), 10 (б), 20 (в) и 100 нс (г).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 09-07-92651-ИНД_a

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. / 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>