

Эксперименты по исследованию распространения сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов в помещениях

Ю.В. Андреев, А.С. Дмитриев, В.А. Лазарев, А.И. Рыжов

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 125009, г. Москва, ул. Моховая, д. 11, стр. 7, chaos@cplire.ru

В ходе экспериментальных исследований распространения сверхширокополосных (СШП) хаотических радиоимпульсов в помещениях наблюдается практическое отсутствие интерференции, меньшее (чем для узкополосных сигналов) затухание СШП хаотических сигналов в стенах зданий, а также ранее теоретически исследованное явление многолучевого усиления при сложении отраженных лучей СШП хаотического сигнала. Выявлены условия, при которых наблюдаются эти явления. Проведен сравнительный анализ СШП сигналов на предмет возможности данных эффектов.

Experimental study of UWB chaotic radio pulse indoor propagation revealed practical absence of interference, lower (in comparison with narrowband signals) attenuation of UWB chaotic signals in building walls, and confirmed existence of earlier theoretically investigated effect of multipath amplification when adding paths of UWB chaotic signal. Conditions for these effects are found. Various types of UWB signals are analyzed in view of these effects.

В докладе исследуются особенности распространения сверхширокополосных (СШП) хаотических радиоимпульсов, в основе которых лежит, по мнению авторов, такое свойство хаотических сигналов, как быстроспадающая автокорреляционная функция [1]. Малое время автокорреляции СШП хаотических сигналов приводит к тому, что в многолучевой среде помещений они распространяются иначе, чем узкополосные сигналы. Отраженные или преломленные лучи, приходящие в приемник с разных направлений, оказываются некоррелированными и могут складываться по мощности. Поэтому при многолучевом распространении СШП хаотических радиоимпульсов наблюдаются такие явления, как почти полное отсутствие интерференции и многолучевое усиление.

Отсутствие интерференции при многолучевом распространении СШП хаотических радиоимпульсов

Как известно, при распространении узкополосных сигналов в помещении возникает сложная интерференционная картина, связанная с когерентным сложением отраженных лучей [2]. В узкополосных системах связи эта картина проявляется в замираниях сигнала и в резком изменении качества связи при незначительном изменении положения приемника относительно передатчика [3] (см. рис. 1). Как видно из рисунка 1, вместо постепенного ослабления сигнала приемника с увеличением расстояния наблюдаются быстрые высокоамплитудные колебания мощности. В то время как средняя мощность при изменении расстояния от 14 до 28 м уменьшается на графике примерно на 6 дБ, размах быстрых колебаний достигает 25 дБ.

Необходимость компенсации потерь качества связи вследствие интерференции в многолучевой среде вынуждает разработчиков узкополосных систем передачи информации обеспечивать запас по мощности передатчика не менее 10 дБ и применять схемы приема, компенсирующие большой динамический диапазон сигнала.

Характер распространения сверхширокополосных хаотических сигналов внутри помещений совершенно иной. На рис. 2 приведен типичный график затухания сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов с полосой частот 3–5 ГГц при увеличении расстояния между передатчиком и приемником. Измерения проведены в узком высоком и длинном помещении, коридоре ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН шириной 3 м,

высотой 4,5 м, длиной 40 м, в условиях прямой видимости. Передатчик в эксперименте перемещался вдоль помещения, приемник оставался неподвижным. Передатчик и приемник располагались на высоте около 80 см от пола напротив друг друга, смещенные на 0,5 м относительно оси помещения. Антенны передатчика и приемника всенаправленные. Приемник хаотических радиоимпульсов, построенный на логарифмическом приемнике AD8317, в связке с цифровым запоминающим осциллографом TektronixDPO 4104 позволяет оценивать относительные изменения мощности сигнала на входе приемника с точностью порядка 0,5 дБ. В диапазоне расстояний 0,1 – 10 м измерения проводились с шагом 10 см, а в диапазоне 10 – 35 м – с шагом 20 см. Значения мощности сигнала приемника на графике нормированы так, что на расстоянии $d_0 = 1$ м мощность равна $P(d_0) = 0$ дБ.

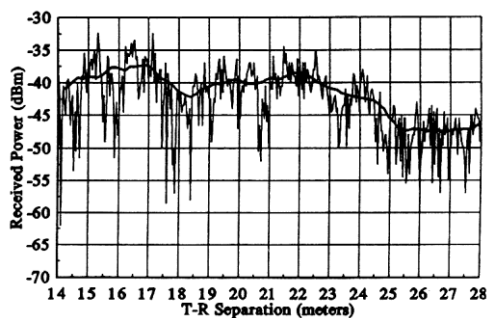


Рис. 1. Колебания мощности сигнала приемника узкополосного сигнала системы мобильной связи диапазона 1–2 ГГц [3].

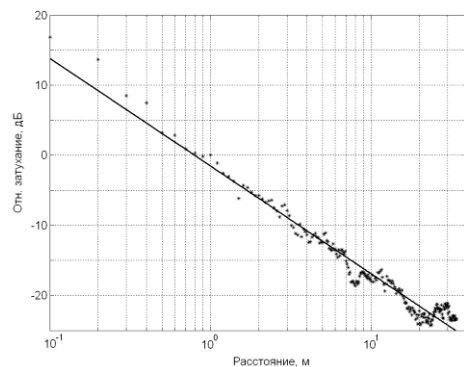


Рис. 2. Зависимость мощности сигнала на входе приемника СШП хаотических радиоимпульсов от расстояния в помещении.

Как следует из рис. 2, ослабление СШП хаотического сигнала с расстоянием происходит гораздо более гладко. Сложение СШП сигнала с отраженными лучами не приводит к возникновению интерференции. Это связано с тем, что автокорреляционная функция хаотических сигналов является быстроспадающей [1], и отраженные лучи оказываются некоррелированными при относительной задержке, превышающей время автокорреляции сигнала τ . Как следует из теоремы Винера–Хинчина [4], для СШП хаотического сигнала с шириной полосы частот ΔF время автокорреляции равно $\tau = 1/\Delta F$.

Для СШП хаотического сигнала с полосой частот 3–5 ГГц время автокорреляции составляет около $\tau = 1/2$ ГГц = 0,5 нс, поэтому лучи с относительным сдвигом по времени более $\tau = 0,5$ нс (или относительным набегом более $l = c\tau = 15$ см) оказываются некоррелированными. На входе приемника лучи складываются по мощности и замираний сигнала практически не наблюдается.

Как следует из рис. 2, СШП хаотический сигнал затухает по степенному закону $P(d) \propto d^{-n}$, причем показатель степени n для данного помещения равен $n \approx 1,5$. Это свидетельствует о том, что сигнал в многолучевой среде затухает медленнее, чем в свободном пространстве, где $n = 2$. Это объясняется тем, что, как упоминалось выше, при сложении отраженных откликов сверхширокополосных сигналов с сигналом прямого луча складываются мощности лучей. Кроме того, замирания здесь не наблюдаются, а колебания мощности сигнала приемника невелики. Сравнивая график на рис. 2 с графиком на рис. 1, видим, что, в то время как размах колебаний мощности сигнала приемника в случае узкополосных сигналов может достигать 25 дБ, в случае СШП сигналов он не превышает 3 дБ, т.е. на 2 порядка меньше.

Экспериментальные измерения многолучевого усиления хаотических радиопульсов

Как показано выше, при распространении в многолучевой среде СШП хаотические сигналы затухают медленнее, чем в свободном пространстве. Более того, как было ранее показано теоретически, при этом наблюдается многолучевое усиление СШП сигналов, в основе которого лежит также малое время автокорреляции [5].

Заметим, что в многолучевой среде энергия передатчика доставляется на вход приемника не только по прямому лучу, но и по другим лучам. Многолучевую среду можно рассматривать как «систему зеркал», собирающую на входе приемника энергию передатчика, которая иначе была бы рассеяна в пространстве. Поэтому коэффициент многолучевого усиления сигнала K_M можно определить как *отношение мощности полного сигнала на входе приемника P_M мощности сигнала P_1 , доставляемого самым сильным лучом:*

$$K_M = P_M/P_1. \quad (1)$$

Такое определение имеет смысл и в канале с прямым лучом, и в канале без прямого луча (в этом случае, приемник обычно настраивают на самый мощный луч из доступных).

В традиционных системах связи, лучи, приходящие в приемник с разных направлений, коррелированы, и результат их сложения определяется в общем случае случайным соотношением фаз. В системе связи с СШП хаотическими сигналами лучи на входе приемника некоррелированы и складываются по мощности [5].

Для того чтобы проверить на практике эти рассуждения, проведен ряд экспериментов в помещениях различного типа с помощью СШП прямохаотических приемопередатчиков ППС-40А (описание приемопередатчиков см. в [6]).

Как следует из введенного выше определения (1), для того чтобы измерить многолучевое усиление, требуется измерить и сравнить мощность сигнала на входе приемника в свободном пространстве P_1 и в многолучевой обстановке P_M при одном и том же взаимном расположении передатчика и приемника. Для эксперимента выбраны три помещения с разным характером распространения сигнала. Так как при перемещении стенда внутри помещения уровень мощности сигнала на входе приемника может варьироваться, в каждом помещении проводилась серия измерений мощности – в центре, в углах, у стены и т.д.

Схема экспериментального стенда приведена на рис. 3. Передатчик и приемник жестко закреплены на длинной деревянной рейке на расстоянии $d = 2$ м напротив друг друга, так что при перемещении рейки в пространстве относительное положение приемопередатчиков сохраняется. Передатчик излучает непрерывную последовательность хаотических радиопульсов диапазона 3–5 ГГц длительностью 100 нс. Дальность действия пары приемопередатчиков около 10–12 м.

Приемник хаотических радиопульсов представляет из себя детектор огибающей, построенный на логарифмическом детекторе. Радиопульсы принимаются антенной, усиливаются в малощумящем усилителе и поступают на логарифмический детектор, напряжение на выходе $V_{\text{вых}}$ которого пропорционально логарифму мощности входного сигнала $P_{\text{вх}}$, т.е.

$$V_{\text{вых}} = S \cdot \log(P_{\text{вх}}). \quad (2)$$

В эксперименте использован логарифмический детектор AD8317ACPZ, имеющий крутизну $S = 22$ мВ/дБ [7].

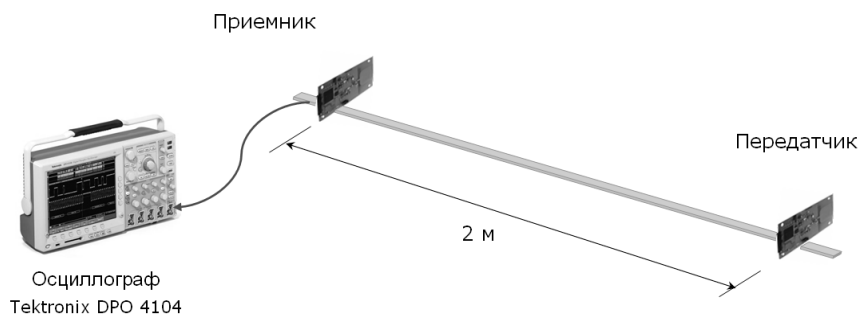


Рис. 3. Схема измерительного стенда.

Сигнал с выхода логарифмического детектора V_{out} (огнивающая хаотических радиоимпульсов) подавался на цифровой запоминающий осциллограф Tektronix DPO 4104 (частота оцифровки 2,5 Гсэмпл/с). Сигнал огнивающей хаотических радиоимпульсов оцифровывался, запоминался и далее обрабатывался на ПК. При помощи программы в среде MatLab выделялись импульсы и оценивалась их средняя амплитуда (усреднение по 100 импульсам). По изменениям средней амплитуды импульсов делались выводы об изменении мощности сигнала на входе приемника.

По оценкам, описанная экспериментальная установка позволяет зафиксировать изменение мощности с точностью не хуже 0,5 дБ.

Эксперименты проходили в трех помещениях: в конференц-зале, в коридоре и на складе. Конференц-зал имеет размеры 11 × 19 × 4,5 м (Ш × Д × В), коридор 3 × 45 × 4,5 м, склад 5,5 × 6,5 × 2,4 м. По классификации Комитета по США моделям для стандарта IEEE802.15.4a [8], коридор можно, по-видимому, отнести к помещениям офисного типа, а склад, на котором имеется большое количество металлических предметов и поверхностей – к среде промышленного типа. Амплитуда импульсов сигнала огнивающей в конференц-зале принималась за опорное значение (приближение «свободного пространства») и относительно него оценивалось изменение мощности в помещениях с выраженным многолучевым распространением.

Результаты измерений в помещениях трех данных типов приведены на рис. 4. Каждая кривая соответствует одному из положений экспериментального стенда внутри соответствующего помещения.

Как видно из рис. 4, в каждом помещении наблюдается разброс амплитуды импульса на выходе логарифмического детектора при перемещении измерительного стенда по помещению. Для зала и коридора этот разброс составляет около 60 мВ, что соответствует около 3 дБ для мощности сигнала на входе приемника; на складе разброс составляет около 100 мВ (соответственно, около 4,5 дБ по мощности). Однако, что более важно, при переходе из зала в коридор или на склад, как и ожидалось, мощность сигнала на входе приемника ощутимо увеличивается: на 7–9 дБ в коридоре и на 7–14 дБ на складе.

Таким образом, при переходе от среды, близкой к «свободному пространству», к многолучевой среде распространения мощность хаотических радиоимпульсов на входе приемника заметно возрастает, что приводит к увеличению выходного сигнала приемника. Это подтверждает существование эффекта многолучевого усиления. Из сравнения результатов экспериментов в коридоре и на складе следует, что с усилением многолучевого характера распространения сигнала многолучевое усиление увеличивается.

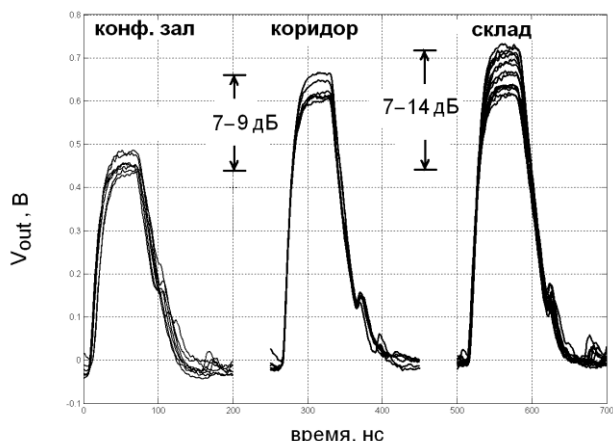


Рис. 4. Огибающие хаотических радиоимпульсов в помещениях разных типов.

Следует также отметить, что экспериментальные значения коэффициента многолучевого усиления довольно близки к теоретическим оценкам, полученным ранее численно при помощи сверхширокополосных моделей многолучевого распространения IEEE [5].

Заключение

В ходе экспериментальных исследований распространения СШП хаотических радиоимпульсов в многолучевой среде обнаружено практическое отсутствие интерференции и подтверждено наличие ранее теоретически исследованного явления многолучевого усиления при сложении отраженных лучей сверхширокополосного хаотического радиосигнала.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН «Современные проблемы радиофизики».

Литература

1. Шустер Г. Детерминированный хаос. - М.: Мир, 1988.
2. Proakis J. Digital Communications. 4th ed. McGraw-Hill. 2000.
3. Rappaport T.S. Wireless Communications – Principles & Practice, IEEE Press, 1996, p. 71.
4. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Ч.1. Случайные процессы. - М.: Наука, 1966.
5. Андреев Ю.В., Дмитриев А.С., Клецов А.В. Усиление хаотических радиоимпульсов в многолучевой среде распространения // Радиотехника и электроника, 2007, т. 52, №7, с. 838–846.
6. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Клецов А.В., Кузьмин Л.В., Лактюшкин А.М., Юркин В.Ю. Сверхширокополосная беспроводная связь и сенсорные сети // Радиотехника и электроника, 2008, т. 53, №10, с. 1278-1289.
7. Техническая документация на ИС AD8317ACPZ // www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8317.pdf.
8. Molisch A.F. IEEE 802.15.4a Channel Modeling Sub-committee Report Final. 2005 // <http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/04/15-04-0662-02-004a-channel-model-final-report-r1.pdf>.