

УДК 621.391

Передача данных ортогональными хаотическими сигналами

*Лю Вэнькуй, студент
кафедры «Информационные системы и телекоммуникации»,
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Выхованец В.С., д.т.н.
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
iu3@bmstu.ru*

1. Введение

Современный период развития связи связан с поиском и использованием новых широкополосных шумоподобных сигналов [1]. Одной из актуальных проблем в этой области является синтез больших по мощности ансамблей широкополосных шумоподобных сигналов с хорошими корреляционными и групповыми свойствами [2]. Другая проблема – сложность выделения компонентов из смеси нескольких широкополосных шумоподобных сигналов в условиях шума, а также трудности воспроизведения формы таких сигналов при корреляционном приеме [3].

Работы по использованию широкополосных шумоподобных сигналов в связи проводились еще в 80-годы прошлого века, однако интенсивные исследования по передаче данных с помощью таких сигналов стартовали в начале 90-х годов после открытия возможности использования динамического хаоса для передачи данных [4].

Динамический хаос представляет собой сложные непериодические колебания, порождаемые нелинейными динамическими системами. Эти колебания могут возникать при отсутствии внешних шумов и полностью определяются свойствами самой динамической системы. Динамический хаос обладает многими свойствами случайных процессов: сплошным спектром мощности, экспоненциально спадающей корреляционной функцией, непредсказуемостью на больших интервалах времени. Вместе с тем ему свойственны такие чисто динамические свойства, как чрезвычайно высокая чувствительность к начальным условиям, связанное с ней экспоненциальное в среднем разбегание близких траекторий и др. [5].

Статья посвящена автокорреляционному приему широкополосных хаотических сигналов. Рассматриваемый метод близок относительноному методу передачи данных при использовании шумовых сигналов [6], однако отличается от последнего тем, что ортогонализация сигнала осуществляется не кратным сдвигом фаз векторов мгновенных значений сигнала одной и той же реализации, а ортогонализацией векторов различных реализаций сигнала методом Грамма-Шмидта.

2. Ортогонализация хаотических сигналов

Пусть задано множество из N хаотических последовательностей длины N :

$$(1) \quad \chi_i(t) \quad (i = \overline{0, N-1}, \quad t = \overline{0, N-1}),$$

полученные при различных начальных значениях $\chi_i(0)$. Рассмотрим векторное пространство [7], образованное векторами (1), в котором заданы:

– операция сложения двух векторов x и y :

$$(2) \quad z = x + y, \quad z(t) = x(t) + y(t) \quad (t = \overline{0, N-1}),$$

– операция умножения вектора x на константу α ,

$$(3) \quad z = \alpha x, \quad z(t) = \alpha \times x(t) \quad (t = \overline{0, N-1}),$$

– скалярное произведение векторов x и y :

$$(4) \quad (x, y) = \sum_{t=0}^{N-1} x(t) \times y(t),$$

– норма вектора x :

$$(5) \quad \|x\| = \sqrt{(x, x)},$$

где операции сложения, умножения и извлечение корня выполняются в некотором поле F .

Нетрудно показать, что операция сложения векторов (2) имеет обратную операцию, коммутативна и ассоциативна, а операция умножения вектора на константу (3) дистрибутивна относительно операции сложения (2). В свою очередь скалярное произведение векторов (4) и норма вектора (5) задают в рассматриваемом векторном пространстве метрику и норму.

Выполним ортогонализацию хаотических сигналов (1) в заданном векторном пространстве, используя процедуру ортогонализации Грамма-Шмидта [8]:

$$(6) \quad \gamma_i = \chi_i - \sum_{j=0}^{i-1} \frac{(\chi_i, \chi_j)}{(\chi_j, \chi_j)} \chi_j \quad (i = \overline{0, N-1}),$$

где используются операции сложения векторов (2) и умножения вектора на константу (3), скалярное произведение векторов (4), деление осуществляется в поле F , а операция минус является обратной операцией сложения векторов (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**).

Ортогональные векторы (6) не являются нормальными. Для получения ортонормированного базиса φ_i выполним процедуру нормализации векторов γ_i , которая сохраняет их ортогональность,

$$(7) \quad \varphi_i = \frac{1}{\|\gamma_i\|} \gamma_i \quad (i = \overline{0, N-1}).$$

Необходимо заметить, что для автокорреляционного приема и обнаружения хаотических сигналов (7) необходимо иметь их копии на стороне приемника, что при использовании реальных генераторов хаоса практически нереализуемо.

3. Ортохаотический передатчик

Выходной сигнал передатчика для передачи N бит данных $\rho_i \in \{-1, 1\}$ ($i = \overline{1, N}$) сформируем в соответствии со следующими рекуррентными уравнениями:

$$(8) \quad \begin{cases} \gamma_0 = 0; \\ \rho_0 = 0, \end{cases} \quad \gamma_{i+1} = \chi_i + \rho_i \times \frac{(\chi_i, \gamma_i)}{(\gamma_i, \gamma_i)} \gamma_i, \quad \varphi_{i+1} = \frac{1}{\sqrt{(\gamma_{i+1}, \gamma_{i+1})}} \gamma_{i+1} \quad (i = \overline{0, N}),$$

где φ_i – выходные ортонормированные хаотические импульсы, γ_i – ортогональные хаотические импульсы, χ_i – хаотические импульсы, получаемые от генератора хаоса.

Из рекуррентных уравнений (8) следует, что взаимная энергия текущего φ_{i+1} и предыдущего φ_i выходного импульса передатчика будет равна их скалярному произведению $(\varphi_{i+1}, \varphi_i)$,

$$(9) \quad \alpha \times (\varphi_{i+1}, \varphi_i) = (\chi_i, \gamma_i) + \rho_i \times (\chi_i, \gamma_i), \quad \alpha = \sqrt{(\gamma_{i+1}, \gamma_{i+1}) \times (\gamma_i, \gamma_i)},$$

где α – некоторая константа. Независимость процесса ортогонализации и коллинеаризации хаотических импульсов от значения константы α позволяет при передаче хаотических сигналов не заботиться о нормировании коэффициента усиления приемо-передающего тракта.

Из (9) находим, что при $\rho_i = -1$ хаотический импульс φ_{i+1} будет ортогонален хаотическому импульсу φ_i , а при $\rho_i = 1$ – коллинеарен ему. Иными словами взаимная энергия двух соседних хаотических импульсов при передаче минус единицы будет обнуляться, а при передаче единицы – удваиваться.

Структурная схема ортохаотического передатчика, реализующего формулы (8), приведена на рис. 1.

Для синхронизации приемника и передатчика используется линия задержки и инвертор \neg (рис. 1), обеспечивающие изменение знака взаимной энергии соседних хаотических импульсов:

$$\chi(t) = \sigma \times \xi(t) \quad (t \in [0, \infty)),$$

где $\xi(t)$ – сигнал от генератора хаоса, σ – инвертирующий множитель, $\chi(t)$ – синхронизованный шумовой сигнал такой, что взаимная энергия соседних импульсов изменяет свой знак на каждом тактовом интервале.

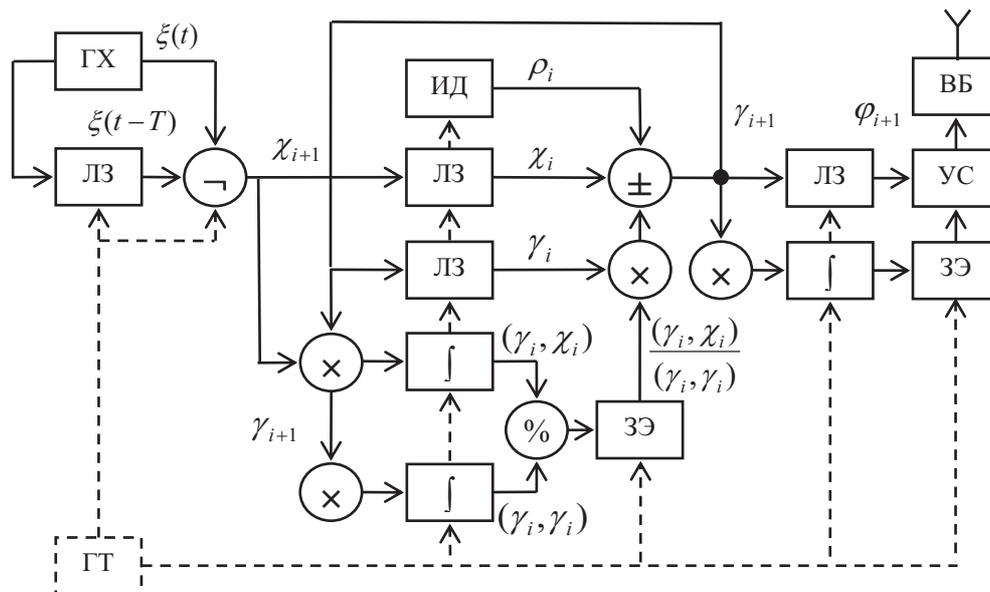


Рис. 1. Ортохаотический передатчик: ИД – источник данных, ГХ – генератор хаоса, ГТ – генератор тактов, ЛЗ – линия задержки, ЗЭ – запоминающий элемент, УС – нормирующий усилитель, ВБ – выходной блок, \pm – управляемый сумматор-вычитатель, \times – умножитель, $\%$ – делитель, \ominus – синхронизатор, \int – интегратор со сбросом

4. Ортохаотический приемник

Переданные данные $\rho_i \in \{-1, 1\}$ ($i = \overline{1, N}$) на приемной стороне определяются так:

$$(10) \quad \rho_i = \begin{cases} -1, & |(\varphi_i, \varphi_{i+1})| < \frac{\varepsilon}{2} \times (\varphi_i, \varphi_i); \\ +1, & |(\varphi_i, \varphi_{i+1})| \geq \frac{\varepsilon}{2} \times (\varphi_i, \varphi_i), \end{cases} \quad t_i : \frac{d}{dt}(\varphi_i, \varphi_{i+1}) = \pm \Delta \quad (i = \overline{1, N}),$$

где φ_{i+1} (φ_i) – текущий (предыдущий) хаотический импульс, t_i – моменты тактовой синхронизации, Δ – порог детектирования изменения сигнала синхронизации, ε – минимальное значение модуля относительной взаимной энергии соседних хаотических импульсов χ_i ,

$$\varepsilon = \min_{i=0}^N |(\chi_i, \chi_{i+1})| / (\chi_i, \chi_i).$$

Структурная схема ортохаотического приемника, соответствующая формулам (10), приведена на рис. 2, а графики, поясняющие выделение тактового сигнала в условиях шума, – на рис. 3.

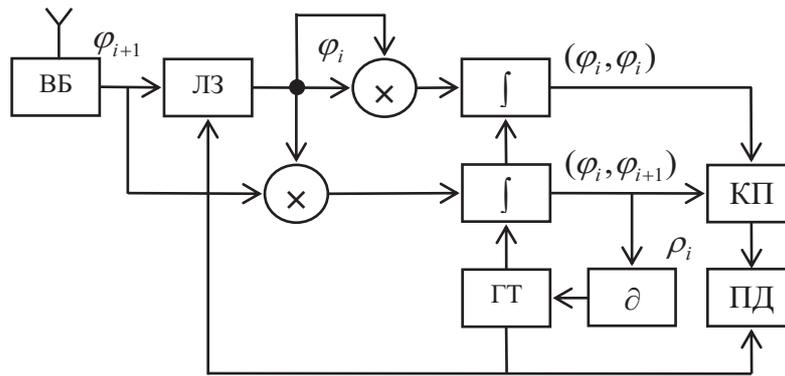


Рис. 2. Ортохаотический приемник: ВБ – входной блок, ЛЗ – линия задержки, ГТ – генератор тактов, КП – компаратор, ПД – получатель данных, \times – умножитель, \int – интегратор со сбросом, ∂ – фильтр нижних частот и дифференциатор

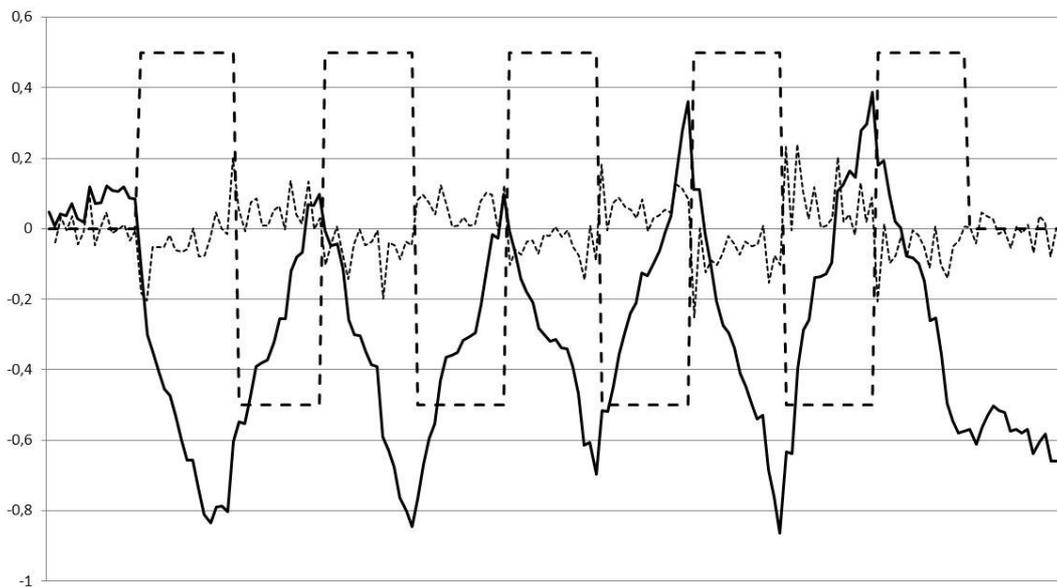


Рис. 3. Взаимная энергия прямого и задержанного хаотического сигнала (сплошная кривая), первая производная от взаимной энергии (пунктирная кривая) и восстановленный тактовый сигнал (штриховая кривая) при отношении энергии сигнала к спектральной плотности шума 6 дБ

5. Заключение

Хорошие корреляционные, спектральные и статистические свойства хаотических сигналов позволяют эффективно использовать эти сигналы в современных системах связи. Во многих практических случаях прием хаотических сигналов должен осуществляться при малых отношениях сигнал-шум в силу ограниченной мощности передатчиков.

Результаты вычислительного эксперимента по определению помехозащищенности ортохаотической передачи данных показаны на рис. 4. Из графика видно, что предложенный метод автокорреляционного приема ортохаотических сигналов обеспечивает достоверную передачу данных при достаточно малых значениях отношения сигнал-шум.

При выполнении вычислительного эксперимента в качестве генератора хаоса использовался хаотический источник с дискретным временем, задаваемый логистической последовательностью [Ошибка! Источник ссылки не найден.], а в качестве генератора шума – генератор псевдослучайных чисел с равномерным законом распределения. Зависимость вероятности ошибочного приема одного бита от отношения энергии сигнала к спектральной плотности шума рассчитывалась путем подсчета числа ошибочно принятых бит при передаче 10000 посылок длиной 8 бит.

Не видится никаких препятствий в применении описанного выше метода передачи данных при использовании вместо генераторов хаоса генераторов шума, порождающих действительно шумовые широкополосные сигналы. При этом используемые в передатчике линейные преобразования исходных хаотических или шумовых сигналов существенным образом не сказываются на их статистические и корреляционные характеристики.

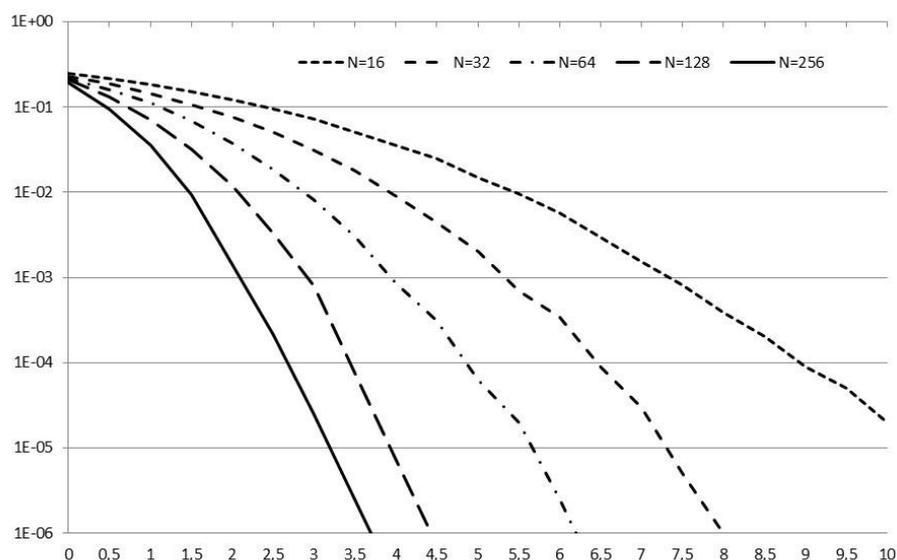


Рис. 1. Зависимость вероятности ошибочного приема одного бита от отношения энергии сигнала к спектральной плотности шума в дБ при различных длительностях хаотических импульсов

Список литературы

1. Калмыков В.В., Федоров И.Б., Юдачев С.С. Системы сотовой и спутниковой радиосвязи / Под ред. И.Б. Федорова. М.: Рудомино, 2010. 280 с.
2. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
3. Пестряков В.Б., Афанасьев В.П., Гурвиц В.И. и др. Шумоподобные сигналы в системах передачи информации / под ред. В.Б. Пестрякова. М.: Советское радио, 1973. 424 с.
4. Кислов В.Я., Динамический хаос и его использование в радиоэлектронике для генерирования, приема и обработки колебаний и информации // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38, № 10. С. 1783–1815.
5. Дмитриев А.С., Панас АИ. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 252 с.
6. Петрович Н.Т., Размахнин М.К. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Советское радио, 1969. 232 с.
7. Теория электрической связи: Учебник для вузов / под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 1999. 432 с.
8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973. 831 с.
9. Ахромеева Т.С., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Парадоксы мира нестационарных структур. Компьютеры и нелинейные явления: Информатика и современное естествознание / Авт. предисл. А.А. Самарский. М.: Наука, 1988. 192 с.