

УДК 621.391

КОГЕРЕНТНАЯ ПЕРЕДАЧА ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ С M-АРНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ХАОТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Т. И. Мохсени¹, А. М. Кикот²

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
125009, Москва, ул. Моховая, 11-7

² Московский физико-технический институт (государственный университет)
141700, Долгопрудный, Институтский пер., 9

Статья поступила в редакцию 20 июня 2017 г.

Аннотация. В работе предложен метод когерентного приема и передачи информационной последовательности элементов M-арного алфавита на основе хаотических сигналов. Основную особенность предложенного метода составляет использование в качестве несущих заранее записанных в память в цифровом виде фрагментов хаотического сигнала. Представлена схема приема и передачи, которая позволяет реализовать предложенный метод, где в качестве базовых функций использовались два ортогональных фрагмента хаотического сигнала. В соответствии с представленной схемой в работе выполнено моделирование, а также проведена экспериментальная апробация.

Ключевые слова: хаотический сигнал, система связи, программно-конфигурируемое радио, когерентный прием.

Abstract. A method for coherent reception and transmission of an information sequence based on chaotic signals is proposed. Information sequence consists of elements of the M-ary alphabet. The main feature of the proposed method is the use of pre-recorded in memory in digital form chaotic signal fragments as carriers. Digital implementation of transmitter and receiver allows the use of the same copies of carrier chaotic signal and synchronization of these copies in time for establishing a correlation reception. The implementation of this approach corresponds to the concept of Software Defined Radio (SDR). According to SDR concept basic

parameters of transceiver components are determined by software rather than hardware configuration as it arranged in analog systems.

The scheme of reception and transmission which allows the implementation of the proposed method is presented. In the scheme two orthogonal fragments of chaotic signal were used as basic functions. In accordance with the presented scheme modeling and experimental approbation were carried out.

Key words: chaotic signal, communication system, software defined radio, coherent detection.

1. Введение

Вопрос использования динамического хаоса для передачи информации исследуется уже более 20 лет. В первой половине 90-х годов был опубликован ряд работ, в которых были продемонстрированы схемы по передаче данных с помощью динамического хаоса, такие как: хаотическая маскировка [1-3], переключение хаотических режимов [4-6], нелинейное подмешивание [7]. Эти результаты показали возможность использования явления динамического хаоса в качестве носителя информации в приемеопередающих системах. Большинство предложенных на тот момент схем по передаче информации с помощью хаотических сигналов базировалось на явлении хаотической синхронизации [8, 9]. Однако ко второй половине 90-х годов было показано, что создание системы связи, использующей хаотическую синхронизацию возможно, но сопряжено с некоторыми трудностями. Свойствами систем такого типа является ухудшение качества выделяемого информационного сигнала на приемнике при наличии шумов и искажений в канале, а также при несовпадении параметров хаотических модулей на приемнике и передатчике [10, 11]. Последующие исследования, посвященные анализу этих свойств, привели к созданию устойчивых к шумам и искажениям схем, использующих динамический хаос, но не использующих хаотическую синхронизацию: дифференциальное переключение хаотических режимов (Differential chaotic shift keying) [12] и прямохаотическая система связи (ПХСС) [13]. Первая из них использовала

метод относительной антиподальной модуляции, вторая, разработанная в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), основывалась на энергетическом приеме хаотических радиоимпульсов.

Использование хаотической синхронизации в системах связи на основе динамического хаоса позволяет получить идентичные копии сигнала на приемной и передающей стороне. Однако практическая невозможность построения идентичных хаотических систем на обеих сторонах системы связи, использующей хаотическую синхронизацию, делает сложной передачу данных даже в условиях идеального канала. Системы связи, у которых есть копии сигнала на обеих сторонах, либо согласованный фильтр называются когерентными. В принципе наиболее эффективными являются системы когерентного приема, которые значительно устойчивее по отношению к шумам и искажениям в канале, чем системы с энергетическим приемом. Задача данной статьи состоит в том, чтобы показать, как такую систему связи можно реализовать с использованием динамического хаоса.

Вопрос об идентичности хаотического сигнала в передатчике и приемнике может быть решен путем цифровой реализации хаотических модулей на приемной и передающей стороне. В этом случае возможно использование одинаковых копий несущего хаотического сигнала и синхронизация этих копий во времени с помощью внешних средств. Тогда введение информации на передающей стороне может осуществляться стандартными методами модуляции, применяемыми в системах связи, использующих когерентный прием. В работе предлагается использование заранее рассчитанных фрагментов хаотических сигналов, записываемых в память приемника и передатчика, так как время извлечения фрагментов из памяти значительно меньше, чем время их расчета. Вместо длинной хаотической последовательности используются достаточно короткие фрагменты хаотических сигналов, которые выступают в качестве системы ортогональных сигналов.

Реализация описываемого подхода соответствует концепции программно-конфигурируемого радио (ПКР) [14], согласно которой базовые параметры компонентов приемо-передающего устройства определяются именно программным обеспечением, а не аппаратной конфигурацией, как это устроено в аналоговых системах. Данная концепция позволяет реализовать хаотические модули передатчика и приемника системы связи в цифровом виде.

Такой подход уже рассматривался авторами работы в [15], где описана и реализована когерентная система цифровой передачи «точка-точка» с одной базовой функцией в виде фрагмента хаотического сигнала, обеспечивающая когерентный прием. В этой системе двоичная информация передается путем модуляции информационного сигнала идентичными эталонными фрагментами хаотического сигнала фиксированной длины полярности «+1» и «-1», что аналогично методу модуляции BPSK [16].

В настоящей работе этот подход обобщается для случая приемо-передающей системы с N базовыми функциями в виде фрагментов хаотического сигнала. В качестве примера для системы с двумя базовыми функциями в виде ортогональных фрагментов хаотического сигнала производится моделирование, а также проводится серия экспериментов с макетом системы связи на основе аппаратуры компании National Instruments.

2. Когерентная система цифровой передачи с N базовыми функциями в виде фрагментов хаотического сигнала

Рассмотрим классическую модель системы передачи цифровой информации по каналу с ограниченной полосой при помощи нескольких базовых функций. Она состоит из: источника сообщений, который порождает один символ каждые T секунд, где символы принадлежат алфавиту из M символов, и обозначаются через $m_1, m_2 \dots m_M$; кодера передаваемого сигнала, который преобразует выходные сигналы источника g_i (соответствующие $m_1, m_2 \dots m_M$) в сигнальные векторы s , состоящие из N реальных физических элементов, и модулятора. Число N меньше или равно M . Имея s_i на входе, модулятор

производит определенный сигнал $s_i(t)$ длительностью T секунд в качестве представления символа m_i , генерируемого источником. Сигналы $s_i(t)$ имеют ограниченную энергию:

$$E_i = \int_0^T s_i^2(t) dt, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

В данной работе эта схема бралась за основу, но в качестве базовых функций использовались фрагменты хаотических сигналов.

В системе передачи с N базовыми функциями в виде фрагментов хаотических сигналов, базовые функции выбираются взаимно-ортогональными:

$$\int_0^T s_i(t) \cdot s_k(t) dt = 0, \quad \forall i \neq k, \quad i, k = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

Пусть $\varphi_1(t), \varphi_2(t) \dots \varphi_N(t)$ – нормированные базовые функции – фрагменты хаотического сигнала. При когерентном способе передачи и приема в системе связи могут быть также использованы антиподальные сигналы [16], тогда сигнальные векторы для каждой базовой функции определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} s_{i1}(t) &= \sqrt{E_i} \varphi_i(t) \\ s_{i2}(t) &= -\sqrt{E_i} \varphi_i(t), \end{aligned} \quad (3)$$

где $0 \leq t \leq T$.

Когерентная система передачи с N базовыми функциями в виде фрагментов хаотических сигналов характеризуется N -мерным пространством сигналов с созвездием сигналов, состоящим из $2N$ точек-сообщений. Таким образом, исходная информационная последовательность, состоящая из символов $m_1, m_2 \dots m_M$, может быть представлена в виде $m_{11}, m_{12}, m_{21}, m_{22} \dots m_{N1}, m_{N2}$, где каждой базовой функции соответствует 2 символа M -арного алфавита.

Согласно (3) координаты точек сообщений имеют вид:

$$\begin{aligned} s_{i11} &= \int_0^T s_{i1}(t) \varphi_i(t) dt = +\sqrt{E_i} \\ s_{i12} &= \int_0^T s_{i2}(t) \varphi_i(t) dt = -\sqrt{E_i}, \quad i = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (4)$$

Рассмотрим схему передатчика. Для генерации сигнала с M -арной модуляцией фрагментов хаотических сигналов нужно подать входную последовательность символов $g_i = \{g_1, g_2 \dots g_R\}$, где, $g_i \in \{m_1 \dots m_M\}$, $i = 1, 2 \dots R$ на модулятор, который в зависимости от значения приходящего символа производит хаотический сигнал $s_{ik}(t)$, где $i = 1, 2 \dots N$, $k = 1, 2$, $N = M/2$ длительности T . На выходе модулятора получается нужная расширяющая хаотическая последовательность, сформированная в соответствие с входной информационной. Блок-схема передатчика представлена на рис. 1.

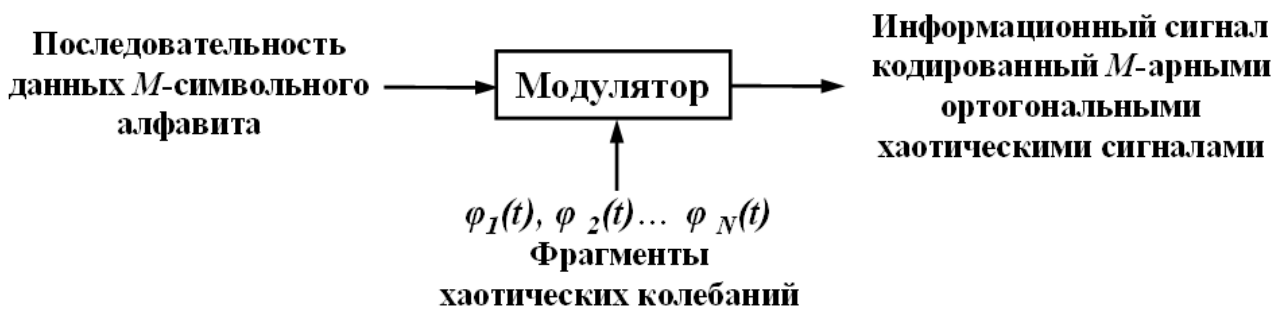


Рис.1. Блок-схема передатчика системы когерентной передачи информации с M -арной модуляцией хаотического сигнала

Для детектирования исходной информационной последовательности, состоящей из символов « m_1 », « m_2 » и « m_M » в зашумленном сигнале $x(t) = s(t) + \eta(t)$ используется N корреляторов. На второй вход каждого коррелятора подается локально сгенерированный опорный хаотический сигнал $\varphi_i(t)$, $i = 1, 2 \dots N$. Выходной сигнал каждого коррелятора x_i , $i = 1, 2 \dots N$, а также антиподальный ему $-x_i$ сравниваются друг с другом по величине. Выбирается выходной сигнал i -го коррелятора или антиподальный ему x_{ik} , $k = 1, 2$, оказавшийся максимальным. Так приемник решает, что поступил символ, соответствующий символу « m_{ik} » алфавита, передаваемому с помощью фрагмента хаотического сигнала, получаемого из базовой функции $\varphi_i(t)$ полярности «+1» или «-1». Блок-схема приемника представлена на рис. 2.

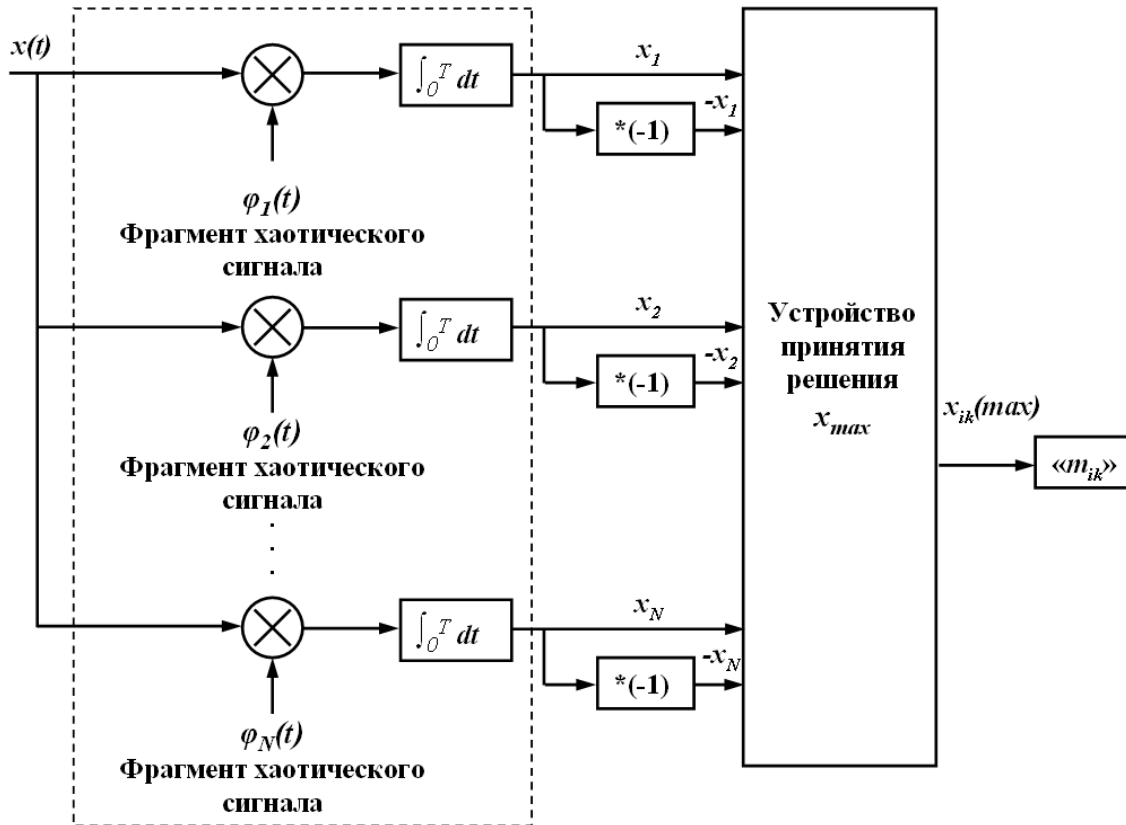


Рис. 2. Блок-схема приемника системы когерентной передачи информации с M -арной модуляцией хаотического сигнала

А. Когерентная система цифровой передачи с двумя базовыми функциями в виде фрагментов хаотического сигнала

Рассмотрим описанную выше систему передачи для случая $N=2$ и положим, что производимые модулятором сигналы $s_i(t)$ обладают равной энергией:

$$E_1 = \int_0^T (\pm \sqrt{E_1})^2 \varphi_1^2(t) dt = \int_0^T (\pm \sqrt{E_2})^2 \varphi_2^2(t) dt = E_2 = E_c, \quad (5)$$

Согласно (3) сигнальные векторы рассматриваемой системы будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} s_{i1}(t) &= \sqrt{E_c} \varphi_i(t) \\ s_{i2}(t) &= -\sqrt{E_c} \varphi_i(t), \end{aligned} \quad (6)$$

где $i=1,2; 0 \leq t \leq T$.

Тогда ее можно охарактеризовать двухмерным пространством сигналов с созвездием сигналов, состоящим из 4 точек-сообщений (т.е. $M=4$), как показано на рис. 3. Правило принятия решения заключается в выборе принадлежности вектора принятого сигнала к областям $z1$, $z2$, $z3$ или $z4$ (рис. 3). Этот вид модуляции аналогичен квадратурной фазовой модуляции (QPSK), используемой в узкополосных системах, сигналы которой представляются комбинацией антиподальных и ортогональных членов [16]. Таким образом, в нашей приемо-передающей системе на основе хаоса можно использовать стандартные методы демодуляции, применяемые в узкополосных системах.

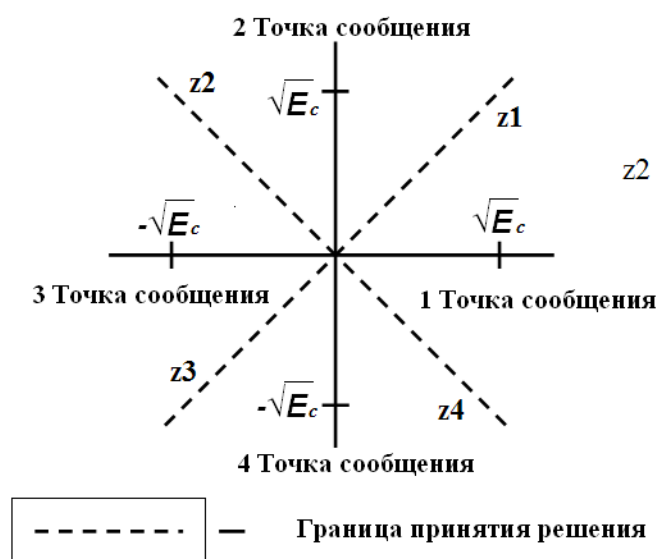


Рис. 3. Диаграмма пространства сигналов для когерентной системы передачи информации с квадратурной модуляцией хаотического сигнала

3. Выбор ортогональных эталонных фрагментов хаотического сигнала

В качестве базовых функций φ_1 и φ_2 для системы взяты два разных фрагмента хаотического сигнала одинаковой длины. Свойством динамического хаоса является быстроспадающая автокорреляционная функция, поэтому два произвольных фрагмента хаотического сигнала одинаковой длины практически не коррелированы друг с другом, т.е. эти два фрагмента практически ортогональны [17]. В качестве первой базовой функции выбирался произвольный фрагмент φ_1 длины T . Вторая базовая функция φ_2 представляла

собой фрагмент хаотического сигнала длины T , сдвинутый относительно первого на время большее времени корреляции (Рис. 4).

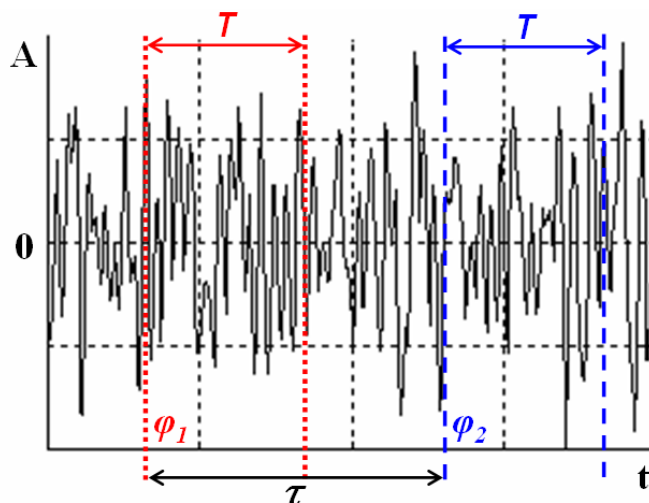


Рис. 4. Выбор ортогональных фрагментов хаотического сигнала для системы когерентной передачи информации с квадратурной модуляцией хаотического сигнала (T – длительность эталонного фрагмента хаотического сигнала, τ – длина сдвига второго эталонного фрагмента относительно первого).

В качестве источника хаотического сигнала для системы цифровой передачи с двумя базовыми функциями в виде фрагментов хаотического сигнала, был выбран кольцевой автогенератор с полутора степенями свободы [18]. Реализация хаотических модулей системы на передающей и принимающей стороне осуществлялась в цифровом виде. В роли базовых функций системы выступала пара эталонных фрагментов хаотического сигнала. В качестве источника хаотического сигнала была использована модель кольцевого автогенератора в среде Matlab. Фрагменты одинаковой фиксированной длины брались из временной реализации значения напряжения на выходе фильтра нижних частот 1-го порядка автогенератора.

На рис. 5а, 5б изображена пара ортогональных фрагментов с хаотической динамикой, выступающих в роли базовых функций системы, выбранная методом, описанным в предыдущем разделе. Эти ортогональные эталонные фрагменты хаотического сигнала выбирались с длительностью, достаточной

для получения непрерывного спектра сверхширокополосного (СШП) сигнала (длительность фрагмента должна быть много больше длительности одного квазипериода). Величина свертки ортогональных фрагментов друг с другом более чем на 2 порядка ниже свертки фрагментов самих с собой.

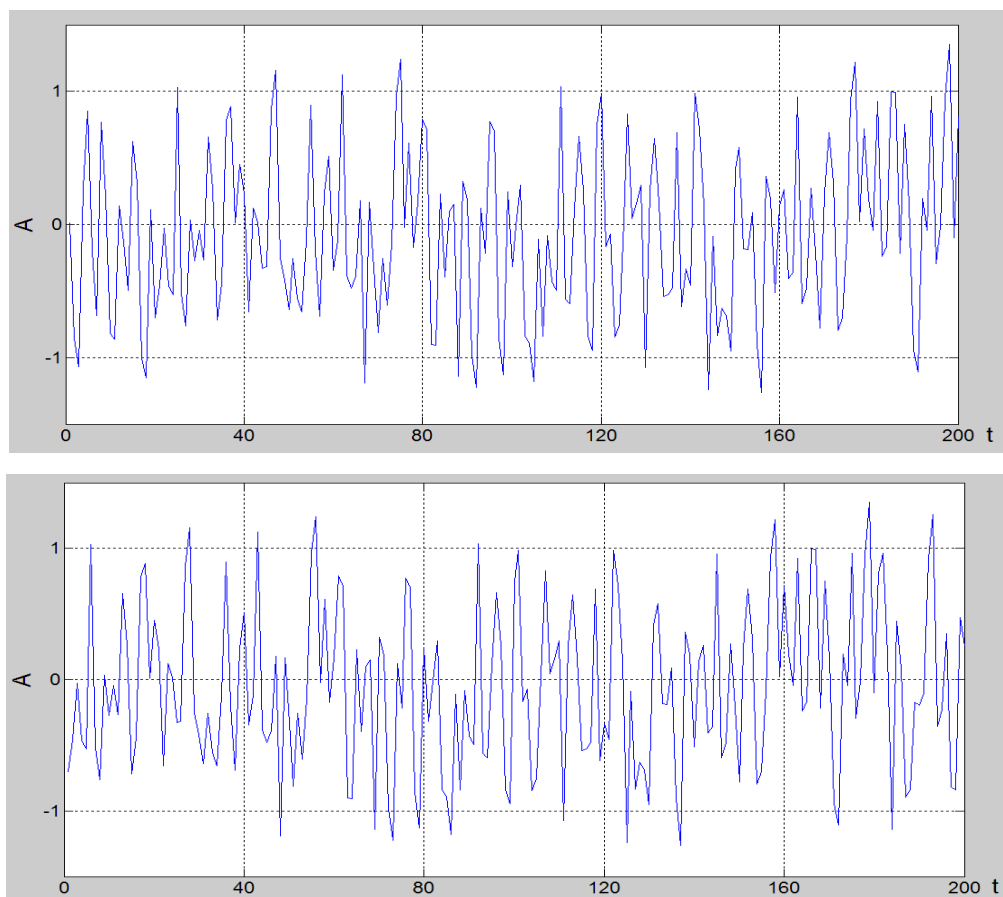


Рис. 5а,б. Пара ортогональных эталонных фрагментов хаотического сигнала, выступающих в роли базовых функций системы когерентной передачи информации с квадратурной модуляцией хаотического сигнала

На рис. 6 изображен спектр временной реализации напряжения на выходе фильтра нижних частот первого порядка кольцевого автогенератора с полутора степенями свободы. На рис. 7 изображен фазовый портрет хаотического аттрактора автогенератора.

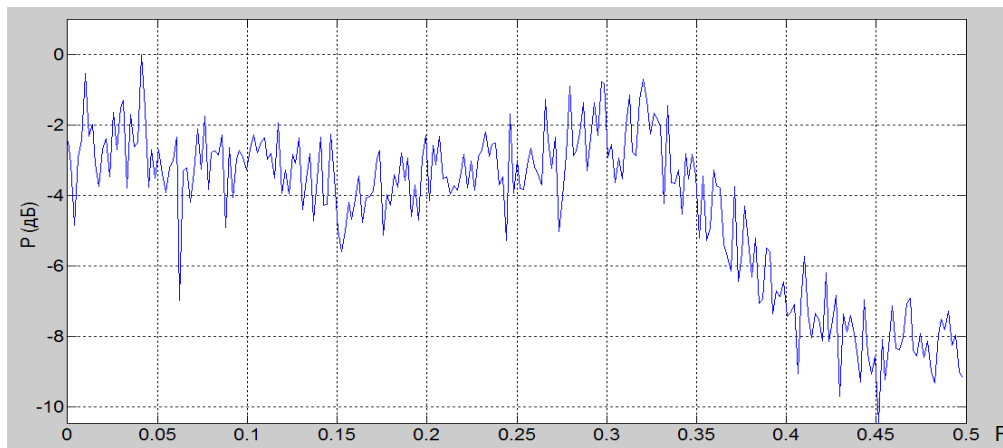


Рис. 6. Спектр мощности эталонного фрагмента хаотического сигнала

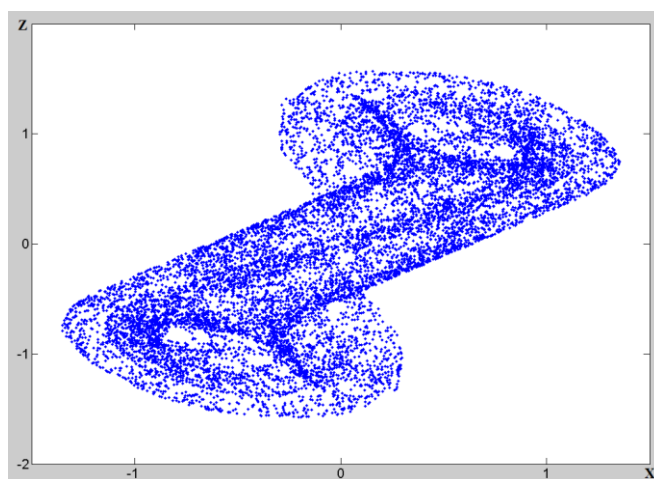


Рис. 7. Фазовый портрет эталонного фрагмента хаотического сигнала

4. Программно-конфигурируемая радиосистема

Практическая реализация рассматриваемой в работе схемы осуществлялась на основе концепции ПКР.

Согласно концепции ПКР [19,20] практически весь объем работ по обработке сигнала перекладывается на программное обеспечение. ПКР представляет собой радиокommunikационный комплекс, в котором основные аппаратные компоненты (фильтры, усилители, модуляторы, демодуляторы) реализованы программным способом. Так как аппаратные компоненты приемопередающих систем, основанных на концепции ПКР, полностью настраиваются программными средствами, появляется возможность

модификации таких систем без каких-либо значительных изменений в аппаратной конфигурации. При использовании систем ПКР программное обеспечение, которое осуществляет практически весь объем работ, выполняется на цифровых сигнальных процессорах (ЦСП) или на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС). Цель такого подхода – создавать системы, которые могут принимать и передавать практически любые радиосигналы с любыми типами аналоговой и цифровой модуляции.

Такой подход позволяет использовать в качестве носителя информации радиосигнал, записанный в цифровом виде в памяти приемника и передатчика радиокommunikационной системы. В нашем случае таким носителем является хаотический сигнал. Ниже представлены схемы приемника и передатчика ПКР, которые были использованы для создания системы связи на основе хаотических сигналов, описываемой в работе.

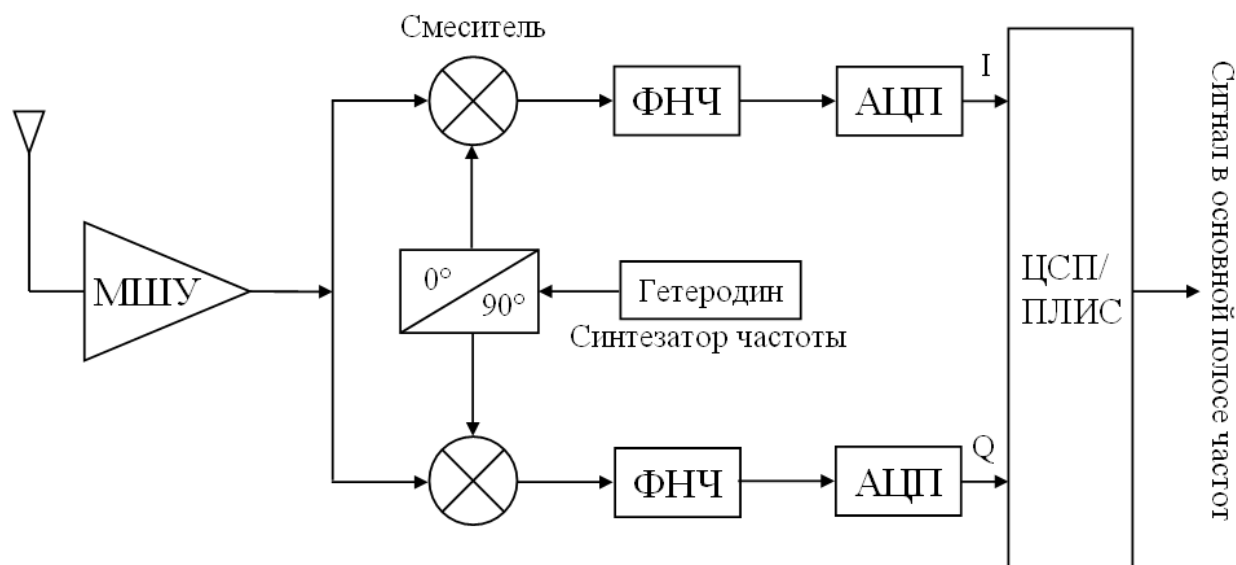


Рис. 7. Схема приемника программно-конфигурируемой радиосистемы

Схема приемника ПКР показана на рис. 7. Входной сигнал, несущий модулированную информацию, усиливается малошумящим усилителем (МШУ) и разделяется на синфазную и квадратурную компоненты (I и Q соответственно) путем смешивания с опорным сигналом гетеродина из синтезатора частот. Для получения квадратурной компоненты сигнал

гетеродина смещается на 90° . Для выделения компонент I и Q сигнал гетеродина подстраивается под частоту входного сигнала. Смешивание двух сигналов в смесителе приводит к созданию двух новых частот, одна из которых является суммой частот входного сигнала и сигнала гетеродина, а другая разностью. В приемниках ПКР используется опорный гетеродин, точно синхронизированный с несущей частотой входного сигнала, для того, чтобы прямо преобразовать его в основные частоты. После фильтрации сигналов основной полосы в фильтре низких частот (ФНЧ) они оцифровываются в паре АЦП. Затем сигнал поступает на ЦСП/ПЛИС для дальнейшей цифровой обработки. Цифровым методом выполняются следующие функции: фильтрация, модуляция, демодуляция, операции со спектром.

В передатчиках ПКР ЦСП/ПЛИС разделяет передаваемые данные на I и Q компоненты и передает их на ЦАП. Сигнал фильтруется и поступает в смеситель для повышения частоты до частоты передачи. Затем сигнал усиливается и передается на антенну. Схема передатчика ПКР изображена на рис. 8.

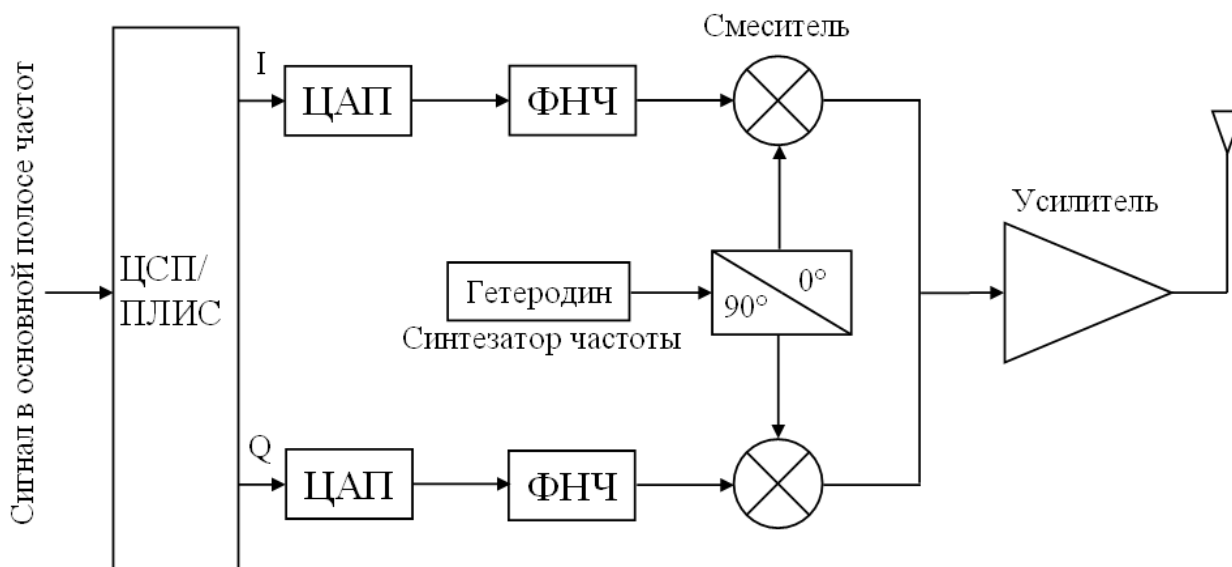


Рис. 8. Схема передатчика программно-конфигурируемой радиосистемы

5. Схема когерентной системы цифровой передачи с квадратурной модуляцией хаотического сигнала

В данном разделе описывается схема когерентной системы цифровой передачи с двумя базовыми функциями в виде фрагментов хаотического сигнала. Система состоит из передатчика и приемника и функционирует в режиме «точка-точка».

Схема передатчика изображена на рис. 9. Входная последовательность символов $g_i = \{g_1, g_2 \dots g_R\}$, где, $g_i \in \{m_1 \dots m_4\}$, $i = 1 \dots 4$ подается на модулятор передатчика системы. В память приемника и передатчика системы связи записывается два заранее выбранных ортогональных эталонных фрагмента хаотического сигнала одинаковой фиксированной длительности в цифровом виде, используемых в качестве базовых функций. Модулятор в зависимости от значения информационного символа производит один из двух эталонных фрагментов хаотического сигнала полярности «+1» или «-1», извлекаемых из памяти. Сформированный хаотический сигнал переводится в аналоговый вид при помощи ЦАП, фильтруется ФНЧ и поступает на блок переноса частоты вверх, где осуществляется его смещение в РЧ диапазон. Сформированный таким образом сигнал усиливается и передается на приемник.

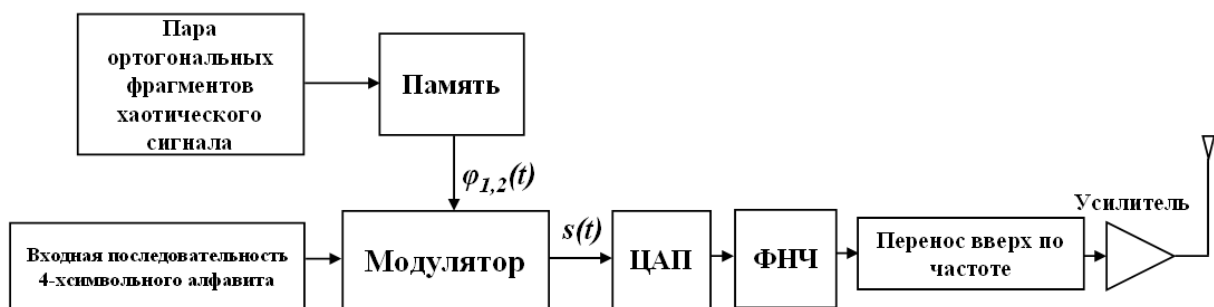


Рис. 9. Схема передатчика

Схема приемника изображена на рис. 10. На входе приемника полученный сигнал усиливается МШУ, а затем попадает на блок переноса частоты вниз. После смещения вниз по частоте до основной полосы сигнал фильтруется ФНЧ,

оцифровывается и поступает на блок корреляции. С учетом синхронизации по времени с момента начала приема сигнал, поступающий на блок корреляции, разбивается на отрезки длительностью эталонного фрагмента хаотического сигнала. Затем в блоке корреляции по отдельности осуществляется свертка получаемых отрезков принимаемого сигнала, содержащих информационный символ, с каждым из эталонных фрагментов хаотического сигнала, извлекаемых из памяти приемника системы. Каждый из двух эталонных или антиподальных им фрагментов хаотического сигнала, соответствуют одному из 4-х символов алфавита передаваемой информационной последовательности. Решение о значении соответствующего полученного символа принимается по максимальному значению свертки принимаемого сигнала с одним из эталонных фрагментов или антиподальным ему.

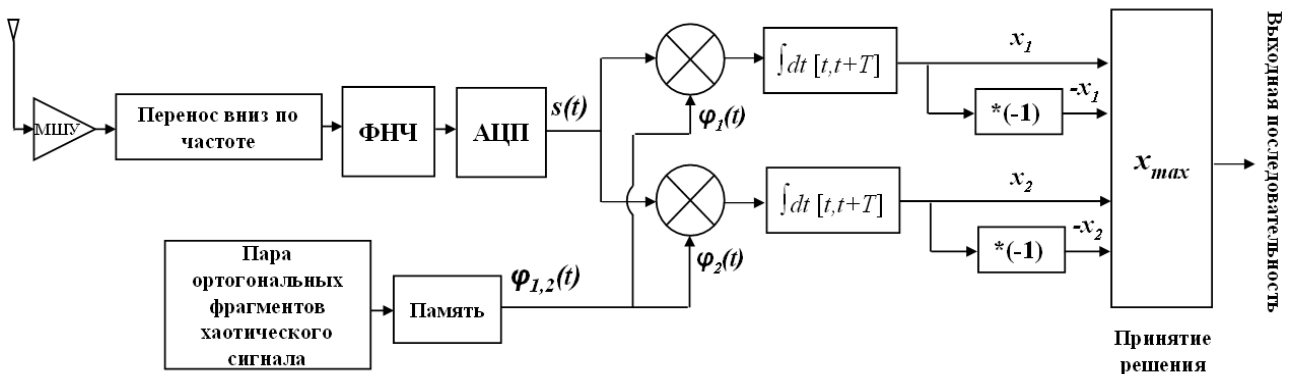


Рис. 10. Схема приемника

6. Моделирование

Целью моделирования являлась обработка алгоритмов системы для последующей физической реализации. Была построена модель описанной выше системы приема-передачи, функционирующая в режиме «точка-точка».

Моделирование произведено в программном пакете LabVIEW. Схема моделирования представлена на рис. 11.

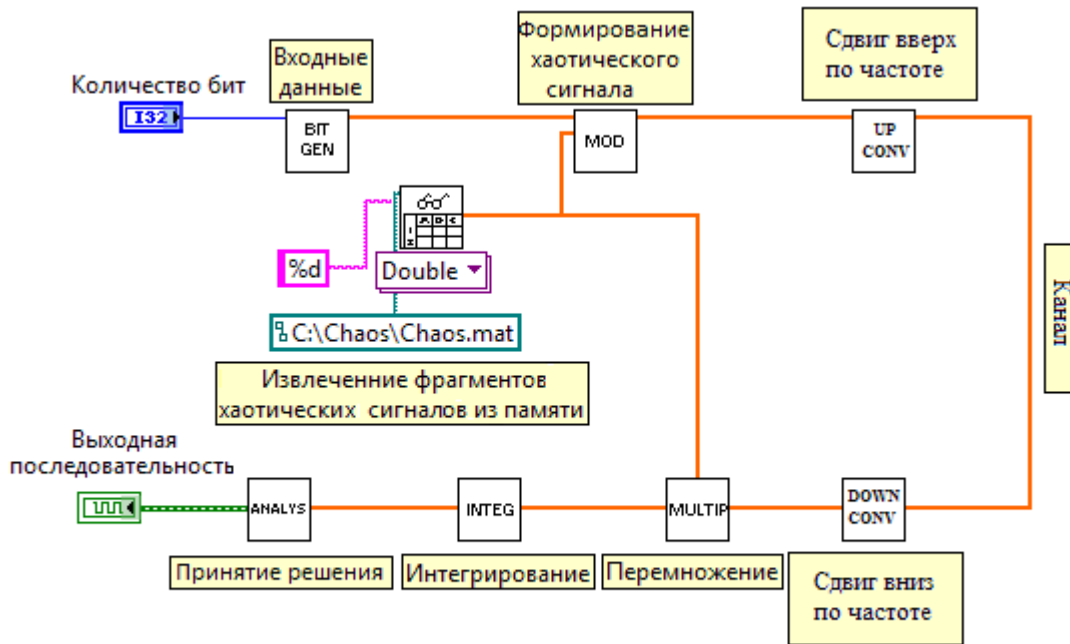


Рис. 11. Схема модели когерентной системы передачи цифровой информации с квадратурной модуляцией хаотического сигнала в среде LabVIEW

На вход системы поступала последовательность элементов 4-х символьного алфавита. Сформированный согласно рассмотренной схеме передатчика (рис. 9), хаотический сигнал, содержащий информационную последовательность, поступал на блок переноса частоты вверх, где смещался в РЧ диапазон и передавался на приемник по каналу с белым шумом. На приемнике полученный сигнал смещался вниз по частоте до основной полосы, затем с учетом синхронизации по времени осуществлялась его корреляция с извлекаемыми из памяти приемника эталонными фрагментами хаотического сигнала. В результате на выход системы поступала информационная последовательность элементов 4-х символьного алфавита.

На рис. 12а представлена последовательность хаотических импульсов, формируемых модулятором передатчика в соответствие с входной информационной последовательностью (значения символов подписаны цифрами сверху). Прохождение сигнала по радиоканалу моделировалось при помощи добавления аддитивного шума. На рис. 12б приведен сигнал на

приемнике с шумовой составляющей после смещения до основной частоты. Информационный сигнал на выходе приемника, получаемый после прохождения через блок корреляции, совпадал с информационным сигналом на входе передатчика.

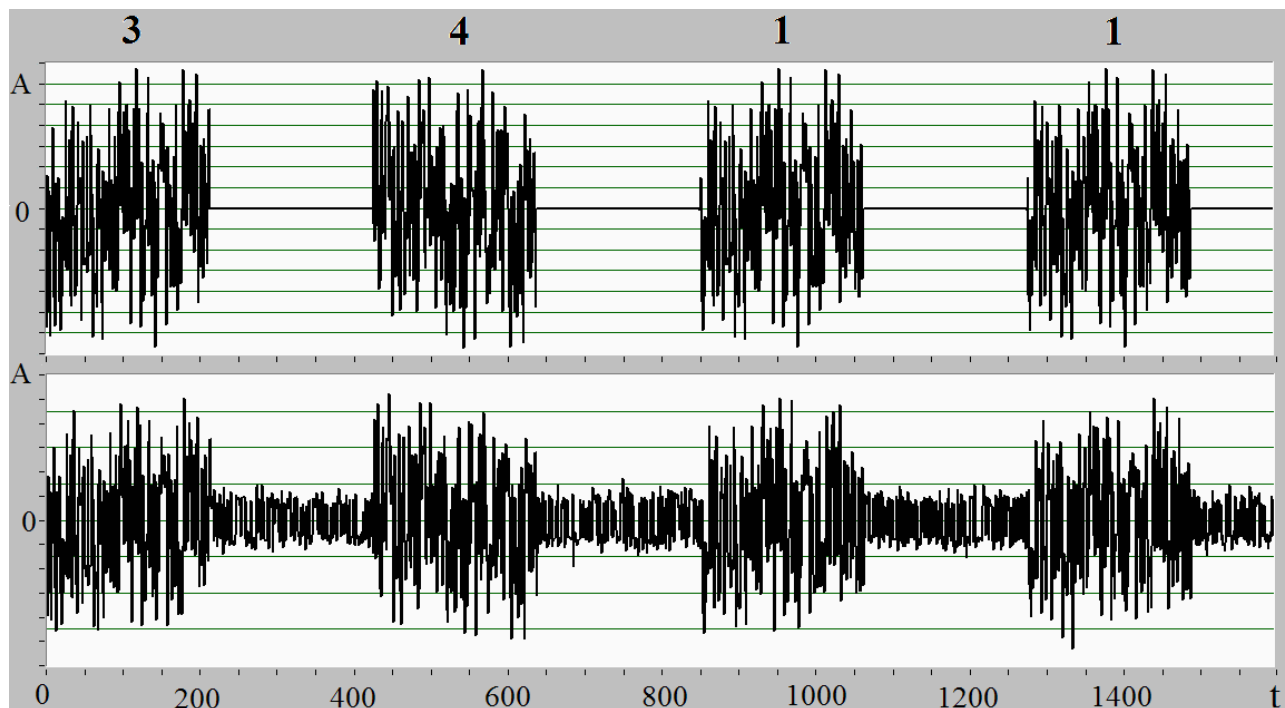


Рис. 12. а) Хаотический сигнал на выходе модулятора передатчика. б) Хаотический сигнал в приемнике после смещения до основной частоты.

7. Эксперимент

После проведенного моделирования был поставлен физический эксперимент.

На базе схемы, описанной в разделе 5, были созданы экспериментальные макеты приемника и передатчика.

Схема передатчика изображена на рис. 13. Передатчик системы состоял из следующих блоков: ПК (персональный компьютер), ПЛИС, передающий блок ПКР. Блок ПК состоял из источника информации и модулятора. В блоке ПК осуществлялась обработка сигнала в основной полосе частот. Входная информационная последовательность 4-х символьного алфавита подавалась на модулятор. В память ПК записывалось два заранее выбранных эталонных фрагмента хаотического сигнала, используемых в качестве базовых функций

системы при передаче информации. Модулятор в зависимости от значения информационного символа производил один из двух эталонных фрагментов хаотического сигнала полярности «+1» или «-1», извлекаемых из памяти. Сигнал с выхода модулятора поступал на блок ПЛИС. Данный блок обеспечивал связь между цифровой и аналоговой частями системы, а также настройку параметров компонент аппаратной части. С выхода ПЛИС сигнал поступал на передающий модуль ПКР. В передающем модуле ПКР сигнал переводился в аналоговый вид при помощи ЦАП, фильтровался ФНЧ, смещался вверх на частоту 2,47 ГГц с помощью квадратурного умножителя частоты и усиливался. Далее сигнал излучался в эфир.

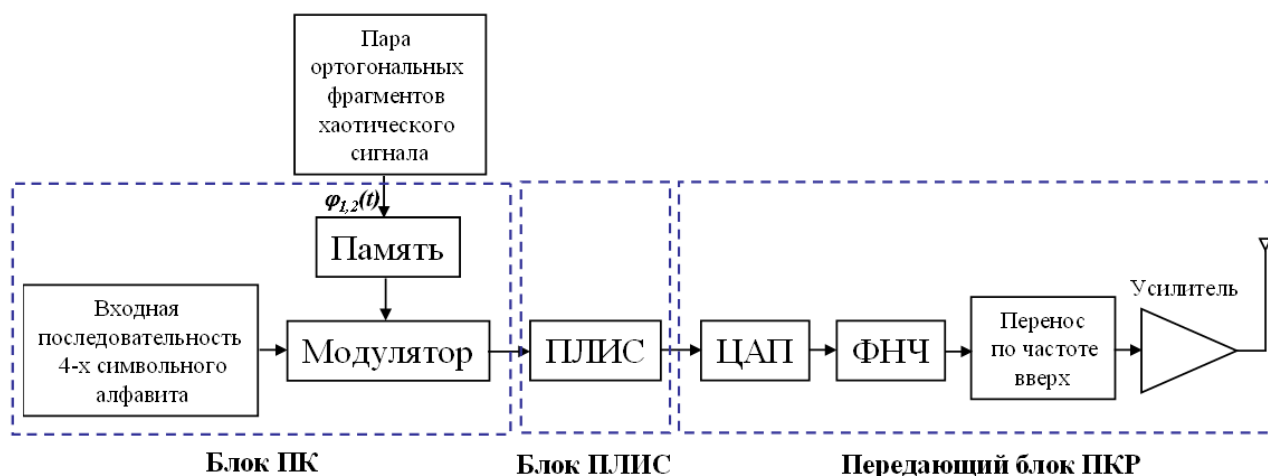


Рис. 13. Схема экспериментального макета передатчика

Схема приемника изображена на рис. 14. Из эфира сигнал поступал на приемник. Приемник состоял из следующих блоков: приемный блок ПКР, ПЛИС, ПК. Принимаемый сигнал поступал на антенну приемного модуля ПКР. Затем сигнал усиливался МШУ, смещался вниз по частоте до основной полосы, фильтровался ФНЧ и оцифровывался АЦП. С выхода АЦП сигнал поступал на блок ПЛИС, обеспечивавший связь между цифровой и аналоговой частями приемника. С выхода ПЛИС сигнал передавался на блок ПК, где производилась его окончательная обработка. В блоке ПК сигнал поступал на коррелятор, где разбивался на отрезки длительности T , равные длительности эталонных фрагментов хаотических сигналов, выступающих в роли базовых функций системы. Затем с учетом синхронизации по времени, производимой при

помощи специальной преамбулы (заранее определенная последовательность информационных символов, передаваемая перед началом любой посылки данных в системе), осуществлялась свертка каждого отрезка принимаемого сигнала с извлекаемыми из памяти приемника эталонными фрагментами хаотического сигнала. Далее результаты свертки сравнивались друг с другом. Выбирался символ соответствующий базовой функции, свертка которой с принимаемым сигналом оказалась максимальной. В результате на выход системы поступала информационная последовательность элементов 4-х символьного алфавита.

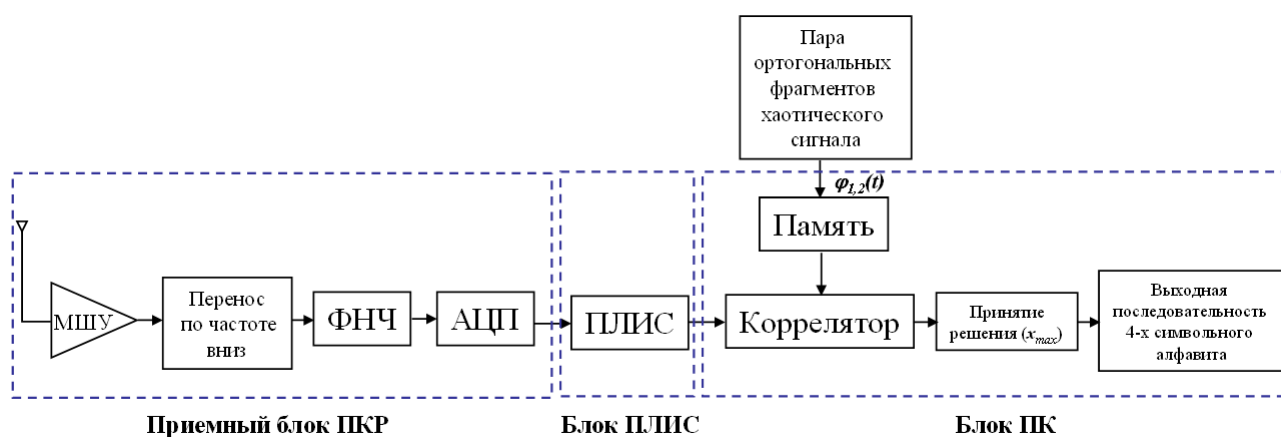


Рис. 14. Схема экспериментального макета приемника

Макеты приемника и передатчика описываемой радиокommunikационной системы на основе хаоса были собраны с использованием модульного оборудования PXI [21] от компании National Instruments. В качестве блоков ПК и приемника, и передатчика использовались системные контроллеры NI 8133 с операционной системой Windows. В качестве блока ПЛИС и приемника, и передатчика использовались адаптерные модули NI FlexRIO. Контроллер NI 8133 соединялся с модулем FlexRIO по шине передачи данных PXI и на приемнике, и на передатчике. В качестве и приемного, и передающего блоков ПКР в системе выступали совместимые с модулем NI FlexRIO приемопередающие модули для беспроводной связи NI 5791, к которым присоединялась антенна. Использованные модули предназначены для создания систем ПКР и полностью удовлетворяют требованиям схемы

приемопередающей системы на основе хаотических сигналов, описанной в разделе 5.

Реализация модулей блоков ПК передатчика (модулятор) и модулей блока ПК приемника (коррелятор) системы осуществлялось в среде программирования LabVIEW. Также в LabVIEW производилось управление параметрами аналоговых компонент передающего и приемного блоков ПКР.

На рис. 15 представлены типичные результаты одного из экспериментов, производимых с установкой. На рис. 15а представлена последовательность хаотических импульсов, формируемых модулятором передатчика в соответствие с входной информационной последовательностью. На рис. 15б приведен результирующий сигнал на приемнике с шумовой составляющей, возникающей при прохождении канала, после смещения до основной частоты. Затем этот сигнал детектировался на блоке ПК, в результате чего была получена выходная информационная последовательность, соответствовавшая входной.

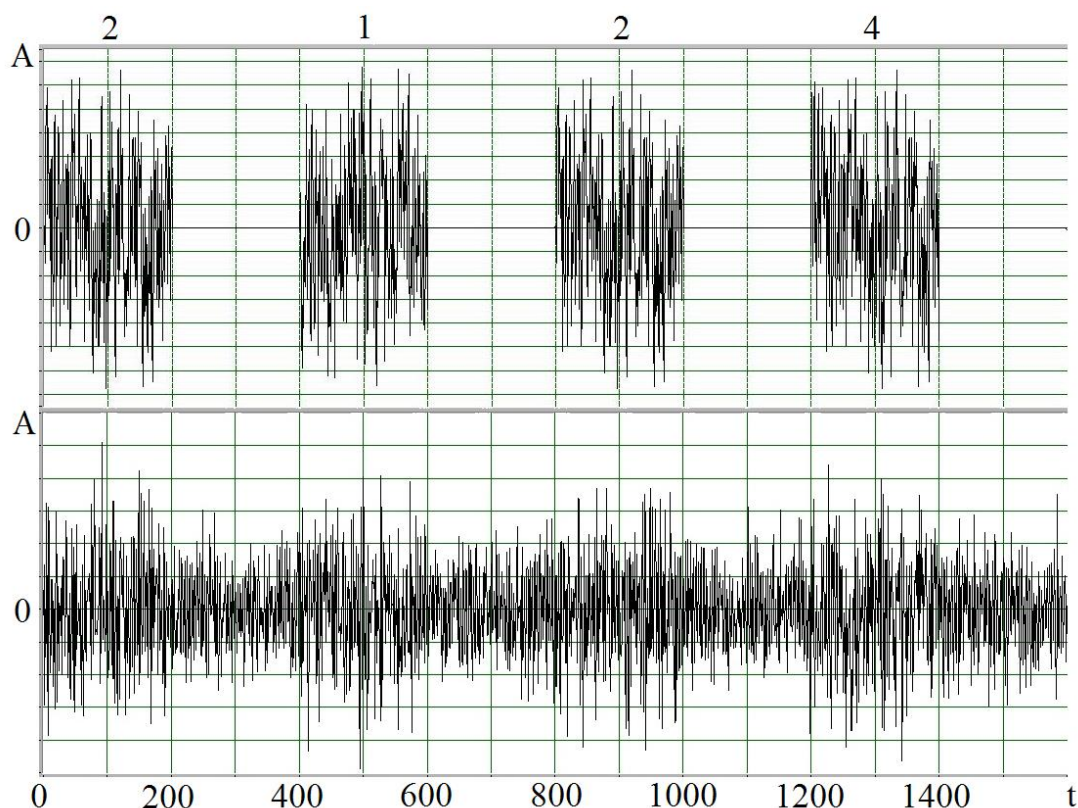


Рис. 15. а) Хаотический сигнал на выходе модулятора передатчика. б) Хаотический сигнал в приемнике после смещения до основной частоты.

8. Выводы

В работе предложен, реализован и исследован метод когерентного приема и передачи информационной последовательности элементов M-арного алфавита на основе хаотических сигналов. Особенностью предложенного метода является использование в качестве несущих заранее записанных в память в цифровом виде хаотических сигналов. Цифровая реализация приемника и передатчика позволяет использовать одинаковые копии несущего хаотического сигнала и синхронизировать эти копии во времени для осуществления корреляционного приема.

Практическая эффективность метода продемонстрирована на примере реализации системы передачи сообщений из элементов 4-х символьного алфавита. В качестве базовых функций использовались два ортогональных фрагмента хаотического сигнала и два их антипода, которые кодировали передаваемую информационную последовательность. Приемная и передающая части представленной схемы были реализованы с использованием концепции программно-конфигурируемого радио. Базовые функции были предварительно записаны в память передатчика и приемника в цифровом виде. Моделирование когерентной системы связи на основе хаотических сигналов проведено в среде LabVIEW. Показана возможность передачи информационного сигнала.

В работе был создан экспериментальный макет представленной схемы связи, и была проведена его экспериментальная апробация. Исследование работы данного макета показало его соответствие результатам, полученным при моделировании системы связи. Таким образом, показана возможность создания системы связи на основе когерентной передачи цифровой информации с M-арной модуляцией хаотического сигнала.

Литература

1. Cuomo M.K., Oppenheim A.V., Strogatz S.H. "Synchronization of Lorenz-Based Chaotic Circuits with Applications to Communications" // IEEE Trans. Circuits and Systems, 1993, V. 40, № 10, p. 626.

2. Downes P.T. “Secure communication using chaotic synchronization” // SPIE, 1993, V. 2038, p. 227.
3. Kocarev L., Halle K.S., Eckert K., Chua L., Parlitz U. “Experimental demonstration of secure communications via chaotic synchronization” // Int. J. Bifurcation and Chaos, 1992, V. 2, № 3, pp. 709-713.
4. Бельский Ю.Л., Дмитриев А.С. “Передача информации с помощью детерминированного хаоса” // Радиотехника и электроника, 1993, Т. 38, № 7, с. 1310-1315.
5. Dedieu H., Kennedy M., Hasler M. “Chaos shift keying: Modulation and demodulation of a chaotic carrier using self-synchronising Chua's circuits” // IEEE Trans. Circuits and Systems, 1993, V. CAS-40, № 10, pp. 634-642.
6. Parlitz U., Chua L., Kocarev L., Halle K., Shang A. “Transmission of digital signals by chaotic synchronization” // Int. J. Bifurcation and Chaos, 1992, V. 2, № 4, pp. 973-977.
7. Волковский А.Р., Рульков Н.В. “Синхронный хаотический отклик нелинейной системы передачи информации с хаотической несущей” // Письма в ЖТФ, 1993, Т. 19, вып. 3, с. 71-75.
8. Pecora L.M., Carroll T.L. “Synchronization in Chaotic systems” // Phys. Rev. Lett., 1990, V. 64, № 8, pp. 821-824.
9. Kocarev L., and Parlitz U. “General approach for chaotic synchronization with application to communication” // Phys. Rev. Lett., 1995, V. 74, № 25, pp. 5028-5031.
10. Бельский Ю.Л., Дмитриев А.С. “Влияние возмущающих факторов на работоспособность системы передачи информации с хаотической несущей” // Радиотехника и электроника, 1995, Т. 40, № 2, с. 265-281.
11. Kolumban G., Kennedy M. “The role of synchronization in digital communications using chaos – Part I: Fundamentals of digital communications” // IEEE Transactions on circuits and systems – I: Fundamental theory and applications, 1997, V. 44, № 10, pp. 927-936.

12. Kolumban G., Vizvari B., Schwarz W., Abel A. “Differential chaos shift keying: A robust coding for chaotic communication” // in Proc. NDES'96, Seville, Spain, June 27-28, 1996, pp. 87-92.
13. Дмитриев А. С., Крягинский Б.Е., Панас А.И., Старков С.О. “Прямохаотические схемы передачи информации в сверхвысокочастотном диапазоне” // Ридотехника и электроника, 2001, Т. 46, № 2, с. 224-233.
14. Andre L.G. Reis, Andre F.B. Selva, Karlo G. Lenzi, Silvio E. Barbin, Luis G.P. Meloni. “Software defined radio on digital communications: A new teaching tool” // Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), IEEE 13th Annual, 2012, pp. 1-8.
15. Мохсени Т.И., Кикот А.М. “Когерентная передача цифровой информации с двоичной модуляцией хаотического импульса” // «Журнал радиоэлектроники» [электронный журнал], 2015, № 6 . URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun15/10/text.html>
16. Скляр Б. “Цифровая связь. Теоретические основы и применение, 2-е издание” // Пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2004, 1104 с.
17. Дмитриев А.С., Захарченко К.В., Пузиков Д.Ю. “Введение в теорию прямохаотической передачи информации” // Радиотехника и электроника, 2003, т. 48, №3, с. 328-338.
- 18 Дмитриев А.С., Панас А.И. “Динамический хаос: новые носители информации для систем связи” // М.: Издательство физико-математической литературы, 2000.
19. Силин А. “Технология Software Defined Radio. Теория, принципы и примеры аппаратных платформ” // Беспроводные технологии, 2007, №2, с. 22-27.
20. Пронин К. “Проектирование, Оптимизация и Моделирование SDR” // Электронные компоненты, 2012, № 2, с. 49-53.
21. “Технология программируемого радио на базе PXI” // National Instruments, URL: <http://russia.ni.com/sites/default/files/%20NI%20для%20систем%20программируемого%20радио.pdf>

Ссылка на статью:

Т. И. Мохсени, А. М. Кикот. Когерентная передача цифровой информации с М-арной модуляцией хаотического сигнала. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul17/8/text.pdf>