

Применение дискретных хаотических алгоритмов в широкополосных телекоммуникационных системах

В. В. Колесов, А. И. Полубехин, Е. П. Чигин, А. Д. Юрин

Рассмотрены перспективные направления использования широкополосных цифровых информационных технологий на основе динамического хаоса для передачи, обработки, хранения и защиты информации. Представлены широкополосные системы передачи информации, использующие сложные сигналы с большой базой, построенные на основе систем с хаотической динамикой. Показано, что на основе разработанных кодирующих конечномерных математических хаотических алгоритмов цифровая система передачи информации с расширением спектра и динамической сменой хаотических кодов обладает высокой помехозащищенностью, скрытностью, электромагнитной совместимостью и обеспечивает надежную и конфиденциальную передачу сообщений в условиях сложной электромагнитной обстановки.

Ключевые слова: широкополосные информационные технологии, хаотические кодирующие алгоритмы, технология расширения спектра, шумоподобная несущая, обработка сигнала на несущей.

1. Введение

Развитие телекоммуникационных систем нового поколения основано на использовании широкополосных сигналов (ШПС) с большой информационной емкостью и обеспечивает увеличение скорости передачи информации и повышение устойчивости работы систем при наличии возмущающих факторов [1, 2]. Такие сигналы используются для передачи информации в многоканальных системах с кодовым разделением, беспроводных системах связи с расширением спектра и др. Использование ШПС позволяет принимать сообщения при соотношении сигнал/помеха, много меньшем единицы, и бороться с влиянием многолучевого распространения, ослабить воздействие многих видов помех и обеспечить высокую скрытность при функционировании и электромагнитную совместимость с другими радиоэлектронными средствами за счет излучения непрерывных во времени ШПС с очень низкой спектральной плотностью.

При разработке узкополосных каналов цифровой связи встречаются трудности в поисках компромисса между противоречивыми требованиями. В многопользовательских системах связи обязательным требованием является обеспечение эффективности использования спектра, измеряемой в битах на секунду на герц. Высокое качество передачи информации требует использования кодеров с большой скоростью, а также метода кодирования, который позволял бы обнаруживать и исправлять ошибки. Все это связано с введением избыточной информации в передаваемые данные и в конечном счете приводит к увеличению ширины полосы канала.

В качестве альтернативы в настоящее время разрабатываются широкополосные и сверхширокополосные каналы для персональной радиосвязи. Технология расширения спектра

(*spread spectrum technology*) основана на использовании несинусоидальных сигналов: шумоподобной несущей, сверхкоротких видеоимпульсов и др.

В связи с бурным развитием в последнее время многоканальных автономных систем связи и передачи информации с кодовым разделением чрезвычайно актуальной остается проблема построения систем ШПС. Системой сигналов называется множество сигналов, определяемых единым правилом построения (алгоритмом). Число сигналов в системе L называется объемом системы, который принято обычно сравнивать с базой ШПС B , равной произведению ширины сигнала Δf на его длительность T : $B = \Delta f \cdot T$. Если $L \ll B$, то это малая система сигналов, $L \approx B$ – нормальная и при $L \gg B$ – большая система. Достаточно сложной является проблема построения больших систем фазомодулированных (ФМ) ШПС с хорошими корреляционными свойствами [2]. Известно, что для систем связи с ШПС подходят не любые шумовые сигналы, а лишь сигналы, обладающие хорошими статистическими и корреляционными свойствами. Основным методом получения ШПС в настоящее время – это формирование M -последовательностей на основе сдвиговых регистров с системой линейных обратных связей.

2. Формирование шумоподобной несущей в системах связи с расширением спектра

В последние годы заметно возрос интерес к так называемым широкополосным и сверхширокополосным методам передачи информации. Широкополосные каналы связи по своей структуре рассчитаны на передачу дискретных сигналов и уже являются цифровыми. Широкополосная радиосвязь по своим свойствам и методам технического осуществления значительно отличается от обычных традиционных методов радиосвязи использованием для передачи сигналов с полосой частот значительно более широкой, чем полоса передаваемого сообщения, и методами приема информации, основанными на применении сигналов различной формы, согласованных с формой спектра передаваемого сигнала. В таких системах все пользователи работают в одном частотном диапазоне, более широком, чем в случае традиционных узкополосных систем связи с частотно-временным разделением. В каждом абонентском канале используется свой идентификационный код или своя кодовая последовательность для различения пользователей. На вход приемного устройства индивидуального пользователя одновременно с полезным сигналом поступают в заданной полосе частот не только обычные помехи естественной природы, но и мешающие сигналы от передатчиков других абонентов, а также отражения за счет многолучевого распространения. Сложная электромагнитная обстановка в зоне действия телекоммуникационных средств налагает дополнительные жесткие требования на систему псевдослучайных сигналов, которая используется для кодирования и передачи информации по каналам связи. Ансамбль кодовых последовательностей, используемых различными системами или одной многоканальной системой, должен обладать хорошими взаимокорреляционными и групповыми свойствами.

При создании систем с кодовым разделением абонентских каналов (CDMA) важным является выбор математических алгоритмов, порождающих большой ансамбль псевдослучайных последовательностей (ПСП). Формируемые псевдослучайные последовательности должны обладать нужными статистическими и спектральными свойствами, а также хорошими авто- и взаимно-корреляционными характеристиками. Особые требования предъявляются к объему ансамбля ортогональных ПСП, что необходимо для одновременной и устойчивой работы многих пользователей в общей пространственной зоне. Математические алгоритмы должны генерировать множество статистически независимых псевдослучайных кодов большой длительности и высокой структурной сложности, чтобы обеспечить конфиденциальность при передаче информации.

Использование широкополосных сигналов в системах передачи информации дает ряд важных преимуществ:

- 1) возможность приема сигналов с высокой достоверностью при мощности помех в полосе частот сигнала много большей, чем мощность сигнала;
- 2) значительное повышение помехоустойчивости против ряда преднамеренных помех, а также импульсных и узкополосных;
- 3) повышение разрешающей способности сигналов и, как следствие этого, возможность значительного улучшения работы системы связи в условиях многолучевого распространения радиоволн;
- 4) возможность построения асинхронных многоадресных систем с кодовым разделением абонентов, работающих в общей полосе частот;
- 5) возможность создания систем передачи информации, в которых затруднено пеленгование и сопровождение источников излучения.

Широкополосные сигналы образуются, как правило, за счет расширения полосы частот информационного сигнала и (или) за счет расширения спектра несущей. Расширение полосы частот сигнала обычно достигается за счет такой модуляции несущего колебания, которая формирует модулированный сигнал с полосой частот более широкой, чем у модулирующей функции. Типичный пример сигнала с расширением полосы – частотная модуляция с большим индексом модуляции.

Расширение полосы свойственно также цифровым сигналам с дополнительным помехоустойчивым кодированием, так как введение избыточных символов при сохранении неизменной скорости передачи сообщения приводит к необходимости уменьшения длительности каждого символа. При этом расширяется полоса частот передаваемого кодированного сигнала. Необходимо отметить, что простое двоичное избыточное кодирование усложняет структуру информационного сигнала (особенно для мощных кодов), однако существенно не расширяет полосу занимаемых частот.

Существенным недостатком систем, использующих простое расширение полосы частот за счет аналоговой модуляции несущей информационным сигналом, является то, что они способны удовлетворительно работать лишь при больших отношениях сигнал/помеха во всей полосе частот передаваемого (и принимаемого) сигнала.

Иначе обстоит дело с сигналами, формируемыми за счет расширения частотного спектра. Такие сигналы называются сложными сигналами. Они образуются в результате модуляции несущего колебания специальной функцией, расширяющей частотный спектр и не зависящей от передаваемого сообщения. Как правило, при расширении спектра сложные сигналы занимают более широкий диапазон частот, чем при расширении полосы за счет информационного сигнала. Для расширения частотного спектра и получения сложного сигнала можно модулировать амплитуду, фазу или частоту несущей. Расширяющая функция должна быть идентичной для передатчика и приемника, чтобы на приемной стороне можно было провести обратное преобразование – «свертку» спектра, при котором происходит демодуляция и сигнал фильтруется в полосе сообщения.

Эффективная расширяющая функция должна удовлетворять определенным требованиям в отношении ширины полосы частот, структуры приемника и метода передачи сообщений. Расширяющая функция должна быть детерминированной, иметь шумоподобный широкий равномерный спектр (большую базу), а следовательно, относительно большую длительность и узкую АКФ с малыми боковыми выбросами, ансамбль разных расширяющих функций, используемых разными системами или одной многоканальной системой, должен обладать хорошими взаимокорреляционными свойствами.

Расширяющая функция может быть аналоговой или дискретной, но практически наиболее перспективные возможности для создания ШПС дает применение цифровых (дискретных по уровню и по времени) расширяющих функций. Такие расширяющие функции формируются на основе цифровых кодовых последовательностей. В некоторых случаях возможно одновременное расширение спектра и полосы сигнала, когда, например,

наряду с применением расширяющей функции используется цифровое помехоустойчивое кодирование сообщений восстанавливающими кодами.

Сигналы с расширением спектра, в свою очередь, делятся на когерентные и некогерентные. Примером некогерентного сигнала с расширением спектра является пачка радиоимпульсов, модулированных по амплитуде. У такого сигнала информацию переносит амплитуда, а импульсная последовательность расширяет спектр. Другой характерный пример – это сигналы с псевдослучайной перестройкой частоты (случайные скачки частоты с одного частотного канала в другой). Некогерентные сложные сигналы характеризуются отношением полосы спектра сигнала к информационной полосе (или к скорости передачи информации), это соотношение служит эквивалентом базы для некогерентных сигналов и определяет выигрыш в помехоустойчивости при выделении ШПС на фоне шумов.

Когерентные сложные сигналы по большинству показателей превосходят сигналы с некогерентным расширением спектра, но некогерентные сигналы проще для реализации как приемников, так и передатчиков (модуляторов). В процессе приема и обработки когерентного ШПС в оптимальном приемнике происходит «сжатие» сигнала с базой $B \gg 1$ в простой сигнал с базой $B \approx 1$, содержащий информацию. Различают два вида сжатия сигнала: по времени и по частоте. Как правило, предельный коэффициент сжатия по времени и по частоте одинаков и равен базе сигнала. Физически сжатие достигается за счет суммирования всех спектральных составляющих сигнала с компенсацией различий их фазовых набегов, т.е. за счет когерентного суммирования всех спектральных составляющих сигнала. В результате сжатия сложный сигнал становится простым (с базой $B \approx 1$), имеющим ширину спектра того же порядка, что и у переносимого им сообщения. Предельный коэффициент сжатия достигается только в оптимальном, идеально согласованном с сигналом приемнике.

Основные свойства сложного сигнала с расширением спектра определяются не способом модуляции несущего, а свойствами модулирующего (расширяющего) колебания. Именно от вида АКФ этого колебания зависят конечная ширина спектра сложного сигнала и равномерность его спектральной плотности в пределах полосы частот.

Загруженность радиодиапазона в сочетании с необходимостью обеспечения скрытной и помехоустойчивой связи привели к разработке новых систем связи с кодировкой широкополосными псевдослучайными сигналами. В таких системах все пользователи работают в одном частотном диапазоне, гораздо более широком, чем в случае традиционных систем связи с частотным разделением, но каждый из них использует свой идентификационный код или свою кодовую последовательность. При этом на вход приемного устройства индивидуального пользователя приходят не только обычные помехи и шумы флуктуационной природы, но и сигналы других абонентов и сигналы многолучевого распространения. Это налагает дополнительные требования на системы сигналов, используемых для кодирования и передачи информации по таким каналам связи с кодовым разделением.

Особо следует отметить предпочтительность использования для кодирования предельно длинных непериодических ПСП, что, как известно, повышает скрытность информации, передаваемой по каналу, и затрудняет ее дешифровку [2]. При создании системы с кодовым разделением абонентов важным является выбор вида ПСП, которые должны иметь не только хорошие статистические и корреляционные характеристики, но и большую номенклатуру длин, позволяющую формировать ансамбли сигналов с большим объемом, а также высокую структурную сложность, обеспечивающую высокую конфиденциальность при передаче информации.

В настоящее время наиболее полно удовлетворяют всем вышеперечисленным требованиям хаотические алгоритмы, описывающие поведение нелинейных динамических систем. Характерными особенностями этих алгоритмов является использование в них запаздывания и нелинейности. К достоинствам подобных алгоритмов относятся легкость программно-аппаратного воспроизведения и необходимость передачи для синхронизации только ограниченного набора начальных условий, однозначно определяющих момент

запуска алгоритма. Применение в системах радиосвязи шумоподобных хаотических сигналов (ШХС) позволяет повысить помехоустойчивость и надежность передачи информации в каналах с комплексом помех и искажений, а также по-новому подойти к решению задач электромагнитной совместимости радиосредств различного назначения [3].

Особым условием, характерным для систем с кодовым разделением каналов, является работа на фоне помех, создаваемых другими кодовыми группами в том же частотном диапазоне. В силу этого создание систем связи с кодовым разделением каналов требует разработки порождающих алгоритмов для создания системы кодирующих сигналов с большим объемом и исследования их статистических и корреляционных свойств.

3. Формирование шумоподобной несущей

Для формирования радиоканала связи с шумоподобной несущей следует обеспечить на передающем терминале модуляцию синусоидального сигнала СВЧ-диапазона расширяющей хаотической импульсной последовательностью, генерируемой хаотическим алгоритмом, с последующей ее демодуляцией на приемном терминале. Наиболее эффективным способом расширения спектра сигнала является фазовая модуляция. Она реализуется при помощи фазового модулятора (ФМ-устройства), которое изменяет фазовый сдвиг проходящего через него сигнала. По принципу работы ФМ можно разделить на плавные (аналоговые) и дискретные (цифровые), по способу подключения к внешней схеме – на отражательные и проходные, а также пассивные (без усиления) и активные (с усилением сигнала). Для применения в широкополосных системах связи ФМ должны обеспечивать получение требуемого фазового сдвига при минимальных потерях, высокое быстродействие, малую величину паразитной амплитудной модуляции, модуляцию фазы колебаний на допустимом уровне мощности и в необходимой полосе частот, хорошее согласование с СВЧ-трактом, стабильные параметры при изменении уровня входной мощности, характеристик СВЧ-тракта, напряжения управляющих сигналов и иметь малые размеры и массу.

В цифровых каналах связи для обеспечения широкой полосы частот наиболее эффективным является использование двухпозиционного ФМ, в котором реализуются два состояния, соответствующих отсутствию сдвига фазы (нулевой сдвиг) и сдвигу фазы на π (π -модулятор). Обычно фазовые модуляторы в СВЧ-диапазоне используют дискретное изменение длины линии передачи между входом и выходом модулятора под действием управляющих импульсов. Например, если под влиянием входного импульса длина линии изменилась на $\lambda/2$ (где λ – длина волны в линии), то фаза выходных колебаний изменится на π (индекс фазовой модуляции $\Phi = \pi/2$). Для дискретного изменения длины линии применяют переключающие элементы, в качестве которых наиболее часто используют $p-i-n$ -диоды. Достоинство таких схем – отсутствие необходимости использования сложных в изготовлении и настройке циркуляторов и мостов.

Известно, что спектральный состав фазомодулированных (ФМ) колебаний значительно сложнее амплитудно-модулированных колебаний. При модуляции синусоидальным сигналом выражение для фазомодулированных колебаний имеет вид:

$$X(t) = A \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\varphi) \sin(\omega + n\Omega)t. \quad (1)$$

Отсюда видно, что спектр фазомодулированных колебаний состоит из несущей частоты ω ($n = 0$) с амплитудой $AJ_0(\varphi)$ и бесконечного числа боковых частот, расположенных симметрично по обе стороны несущей ($\omega \pm n\Omega$) с амплитудами $AJ_n(\varphi)$. Однако практически играют роль лишь те частоты, амплитуды которых не очень малы по сравнению с $AJ_0(\varphi)$. Так как значения функции Бесселя очень быстро убывают с увеличением n при заданном аргументе φ , то во многих практически важных случаях можно ограничиться лишь первыми

членами ряда. Однако для сигналов с большим индексом модуляции весьма существенную роль играют члены ряда до $n = 10$, так как распределение амплитуд не позволяет ими пренебречь.

Форма частотного спектра во много раз усложняется, если несущая частота модулируется несинусоидальным и непериодическим сигналом.

ФМ-сигнал с синусоидальной несущей f_0 при скачкообразном изменении фазы можно представить в виде:

$$X(t) = \sum_{k=1}^N A \sin 2\pi f_0 \left[t + k \cdot \Delta T (-1)^{j_k} \right]; 0 \leq t \leq \Delta T, \quad (2)$$

где A – амплитуда, f_0 – несущая частота, ΔT – длительность манипулированного отрезка

синусоиды, равная целому числу полупериодов синусоидального сигнала, параметр j_k принимает значения 0 и 1 в соответствии с заданной кодовой последовательностью, определяющей закон скачкообразного ($\pm\pi$) изменения фазы несущей.

Рабочая полоса частот при этом значительно расширяется. Спектр ФМ-сигнала имеет в области основного максимума форму, близкую к полупериоду синусоиды, с максимумом на частоте несущей f_0 . Ширина спектра определяется длительностью манипулированного отрезка синусоиды ΔT и равна f_0/n , где n – число периодов несущей в интервале ΔT .

При модуляции периодическими функциями спектры сигналов имеют линейчатый вид. В случае же модуляции шумоподобным дискретным сигналом спектр сплошной, а его размеры определяются максимальной частотой (тактовой частотой).

Обратное преобразование ФМ-сигнала в импульсную форму осуществляется путем вычисления ВКФ регистрируемого сигнала с $X(t)$. При отсутствии частотных и фазовых искажений регистрируемого сигнала ФМ-сигнал после корреляционного преобразования будет иметь форму АКФ сигнала.

4. Хаотические алгоритмы для создания расширяющих функций

Показано, что для ШХС, построенных на основе дискретных хаотических алгоритмов, выполняются все требования, необходимые для расширения спектра и формирования шумоподобной несущей: эти сигналы являются широкополосными, обладающими большой базой, их спектральная плотность в полосе канала передачи равномерна, АКФ имеет один узкий пик и малые боковые выбросы, сигнал полностью воспроизводим в приемном устройстве, что необходимо для корреляционной обработки. Кроме того, кодовые последовательности ШХС удовлетворяют критериям случайности. Характеристики апериодической АКФ как для бинарного, так и для преобразованного бинарного сигнала хорошо соответствуют корреляционным свойствам случайных последовательностей [4].

Близость статистических характеристик ШХС к характеристикам гауссовского процесса также является важным качественным показателем, обеспечивающим структурную скрытность полезного сигнала на фоне шумовых помех, также в большинстве случаев имеющих нормальное распределение. Это, в свою очередь, обеспечивает высокую помехозащищенность. Структуру М-последовательности восстанавливают обычно по ее отличию от нормального случайного процесса.

Проведенные оценки объема системы сигналов показывают, что на базе ШХС открываются перспективы решения проблемы построения систем сигналов с большим объемом и обеспечивающих повышенную энергетическую и структурную скрытность [5]. Динамически изменяющиеся хаотические коды сделают невозможным раскрытие в реальном

времени информационных ресурсов открытых телекоммуникационных систем, обеспечивая тем самым высокую конфиденциальность и помехоустойчивость.

5. Система связи с расширением спектра на основе хаотических бинарных кодов

Для исследования технологии расширения спектра с использованием хаотических сигналов в СВЧ-диапазоне разработана и экспериментально исследована модель радиотерминала для широкополосной системы связи на основе мостовой схемы фазовращателя с фиксированным сдвигом фазы $\varphi = \pi$.

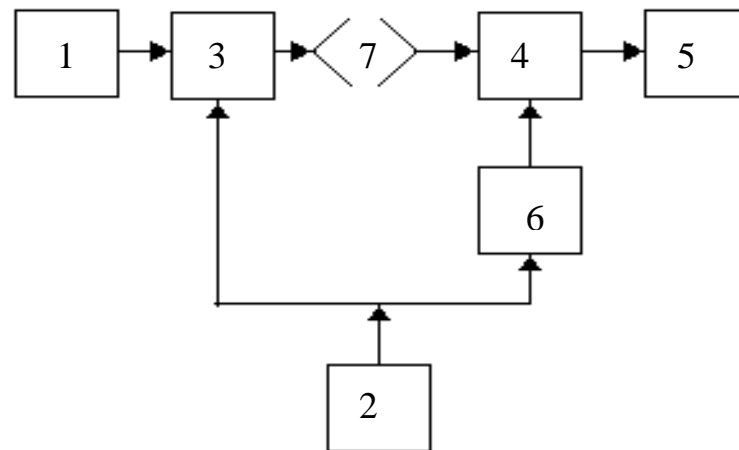


Рис. 1. Блок-схема стенда, моделирующего канал связи с шумоподобной несущей:

- 1 – генератор синусоидального сигнала СВЧ-диапазона; 2 – цифровой генератор – источник кодирующей хаотической последовательности; 3 – фазовый модулятор; 4 – фазовый демодулятор; 5 – анализатор спектра; 6 – подключаемый в различные точки схемы блок дискретной задержки; 7 – рупорные антенны

При исследовании свойств канала связи применялась самая простая модель двухтерминального широкополосного канала связи с шумоподобной несущей с использованием цифрового генератора, формирующего хаотическую последовательность импульсов, фазового СВЧ-модулятора-демодулятора в микрополосковом исполнении и рупорных антенн. Предполагалось, что канал связи состоит из передающей части (фазового модулятора, обеспечивавшего расширение спектра) и приемной части (демодулятора – устройства свертки, посредством которого восстанавливалась несущая). Какие-либо специальные помехи в канал не вносились и считалось, что передача СВЧ-сигнала от передатчика к приемнику происходит за малое по сравнению с длительностью импульса время.

На рис. 1 показана блок-схема стенда, моделирующего канал связи с шумоподобной несущей. При проведении экспериментов по демодуляции СВЧ-сигнала, фазомодулированного хаотической кодовой последовательностью, формируемой цифровым генератором, предполагалась полная синхронизация модулятора и демодулятора, т.е. когерентный режим работы. Практически это обеспечивалось подачей модулирующих сигналов одновременно на блоки модулятора и демодулятора.

Расширение спектра канала связи осуществлялось при помощи широкополосного фазового модулятора, который создан на основе мостовой схемы СВЧ-фазовращателя с фиксированным сдвигом фазы на одно из возможных состояний $\varphi = \pi/2, \pi/4, \pi/8, \pi/16$. Переключение фазосдвигающих отрезков микрополосковой линии производится

высокочастотными $p-i-n$ диодами с малым временем релаксации, не превышающим 5 нс. Диапазон перестройки рабочей частоты для модема превышает октаву. Управление $p-i-n$ диодами в схеме фазовращателя осуществляется хаотическими бинарными кодами, которые формируются программируемым цифровым процессором согласно разработанному математическому алгоритму. Для каждого абонента программным способом устанавливается собственный хаотический код за счет выбора N -мерного вектора начальных отсчетов. Многомерный цифровой массив, задающий вектор начальных отсчетов, является идентификационным параметром абонента. Программируемый кодер для формирования индивидуальных хаотических кодов создан на основе быстродействующей ПЛИС-технологии.

Передаваемую цифровую информацию можно вносить в канал связи либо путем частотной модуляции (ЧМ) СВЧ-несущей частоты, либо посредством изменения фазы кодирующего сигнала. Операция кодового расширения спектра для ЧМ-сигнала, несущего информацию, выполняется фазовым модулятором в схеме передающего модема непосредственно на несущей частоте сигнала.

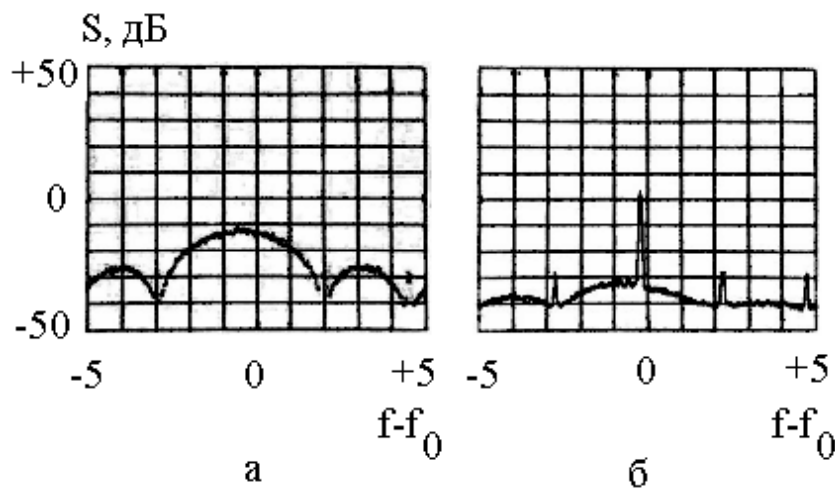
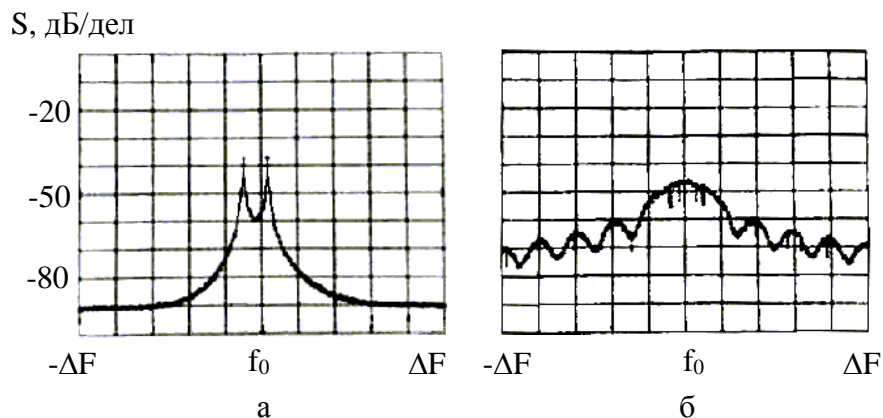


Рис. 2. Спектры передаваемого шумового сигнала (а) и принимаемого сигнала после свертки (б)

Излучаемый передатчиком сигнал с информационной составляющей имеет непрерывный шумовой спектр (рис. 2а), основная доля энергии которого заключена в полосе частот $\Delta f = 2 F_T$.



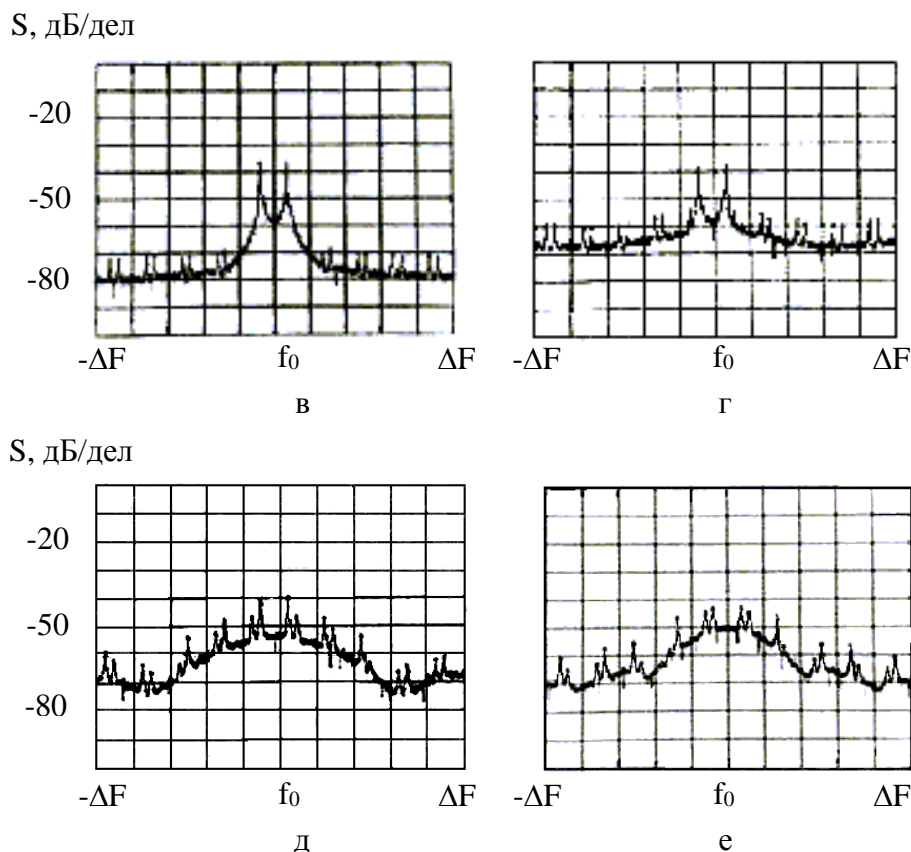


Рис. 3. Экспериментальное исследование влияния синхронизации кодирующего и декодирующего сигналов:

- а) спектр исходного информационного ЧМ-сигнала, б) спектр передаваемого шумоподобного сигнала, в) спектр принимаемого ЧМ-сигнала при рассинхронизации $\tau=0$,
- г) спектр принимаемого ЧМ-сигнала при рассинхронизации $\tau=0.1T$,
- д) спектр принимаемого ЧМ-сигнала при рассинхронизации $\tau=0.3T$,
- е) спектр принимаемого ЧМ-сигнала при рассинхронизации $\tau=0.5T$

Тактовая частота F_T хаотических бинарных кодов устанавливается синтезатором частот в схеме модема и в эксперименте выбиралась равной $F_T = 1$ МГц. Информационное сообщение представляет собой последовательность двоичных символов в виде импульсов с тактовой частотой 20 кГц.

Размерность N числового идентификатора или вектора начальных отсчетов составляет не менее $N > 7$. Это важное условие для порождающего алгоритма обеспечивает устойчивый режим многомодового хаоса при формировании кодов с хорошими корреляционными и статистическими свойствами [6]. Передаваемый ШПС с информационной составляющей имеет непрерывный шумовой спектр и по своей структуре практически не отличим от случайного процесса с той же полосой частот.

Цифровой процессор кодера может работать в циклическом и аperiodическом режимах. При циклическом формировании хаотические коды повторяются с заданным периодом. В аperiodическом режиме цифровой процессор генерирует непрерывную и не повторяющуюся последовательность хаотических символов. Таким способом можно осуществить динамическую смену кодов в течение всего времени передачи данных. Разработанная система передачи данных с динамической сменой кодов практически исключает возможность криптографического раскрытия сообщений [7].

В приемнике информация выделяется после устранения относительной задержки принятого и опорного кодов и сжатия по частоте ШПС. В эксперименте передача данных осуществляется с динамической сменой кодов за счет непрерывной генерации непериодических последовательностей. Копия хаотического бинарного кода формируется в

приемнике цифровым процессором на основе порождающего алгоритма при точном задании N -мерного числового идентификатора или вектора начальных отсчетов. Обратное преобразование принятого ФМ-сигнала осуществляется фазовым демодулятором, который восстанавливает фазу сигнала при использовании в качестве опорного сигнала копии хаотического кода. Сжатие принятого сигнала по частоте возможно только при задержке принятого и опорного кодов в пределах длительности одного такта.

Эффективность этого иллюстрируют энергетические спектры для декодированного сигнала (рис. 3в–е). На рис. 3в представлен спектр сигнала на выходе демодулятора при синхронизации принятого и опорного кодов, когда запаздывание кодов $\tau = 0$ отсутствует. Спектр восстановленного сигнала содержит информационную составляющую, подобную спектру ЧМ-сигнала на выходе информационного модулятора в передатчике (рис. 3б). Из рисунка видно, что при отсутствии активных помех уровень информационных составляющих превышает почти на 40 дБ собственные шумы приемника и на 35 дБ паразитные составляющие с тактовой частотой $F_T = 1$ МГц.

При длительности одного символа $T = 1/F_T = 1$ мкс запаздывание опорного кода всего на $\tau = 0.1T$ приводит к уменьшению на 14 дБ информационной составляющей в спектре до уровня 26 дБ относительно шумового пьедестала (рис. 3г). При задержке опорного кода $\tau = 0.5T$ (рис. 3е) уровень информационной составляющей практически исчезает. Одновременно с ростом задержки τ наблюдается увеличение уровня как шумового пьедестала, так и паразитных составляющих на кратных F_T частотах в спектре вследствие неполной свертки принятого сигнала. При увеличении задержки опорного кода свыше длительности одного такта $\tau > T$ информационная составляющая в спектре неразличима на фоне шума и восстановление передаваемой информации становится невозможным. Проведенный модельный эксперимент по передаче данных с динамической сменой хаотических кодов показал, что эффективное восстановление полезной информации происходит только при малой задержке ($\tau < 0.5T$) опорного кода. Результаты эксперимента по передаче информации в системе связи с расширением спектра и динамической сменой кодов свидетельствуют о необходимости точной синхронизации опорного кода в передатчике и приемнике.

В работе экспериментально исследовалась помехоустойчивость модели радиотерминала на основе шумоподобной несущей, реализованной на основе технологии расширения спектра с помощью бинарных хаотических сигналов.

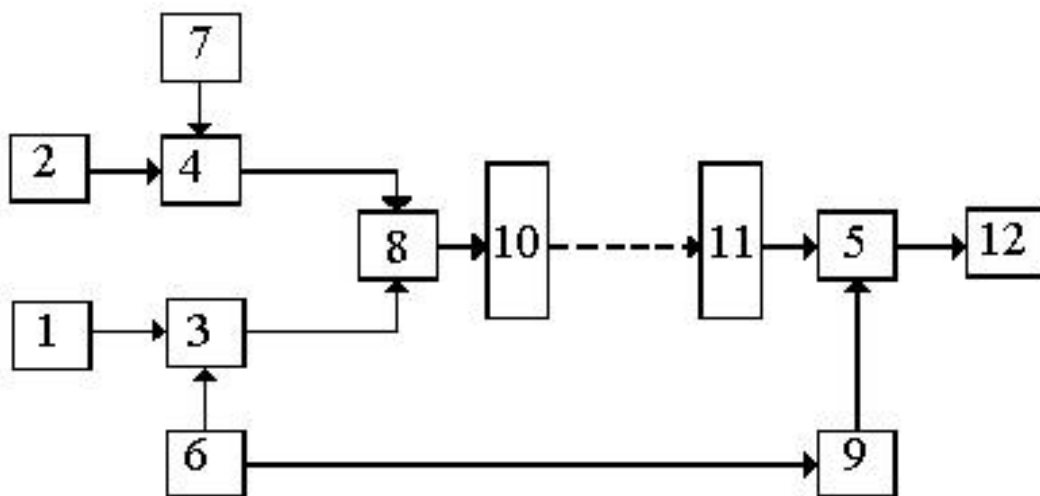


Рис. 4. Блок-схема стенда для исследования помехоустойчивости модели радиотерминала на основе шумоподобной несущей

Схема эксперимента представлена на рис. 4, где 1 и 2 – СВЧ-генераторы сигнала и помехи соответственно; 3, 4 и 5 – фазовые модуляторы ФМ₁, ФМ₂ и ФМ₃; 6 и 7 – кодеры; 8 –

СВЧ-сумматор; 9 – регулируемая линия задержки; 10 и 11 – передающая и приемная СВЧ-антенны; 12 – анализатор спектра. Кодеры реализовывали один из разработанных хаотических алгоритмов генерации класса хаотических сигналов [8, 9].

Расширение спектра передаваемого сигнала от СВЧ-генератора 1 осуществлялось при помощи микроволнового модема ФМ₁. СВЧ сигнал на средней частоте F_{cp} поступал на вход модема, управление которого осуществлялось хаотической бинарной последовательностью импульсов от кодера 6. В результате на выходе ФМ₁ наблюдался шумовой сигнал с непрерывным спектром.

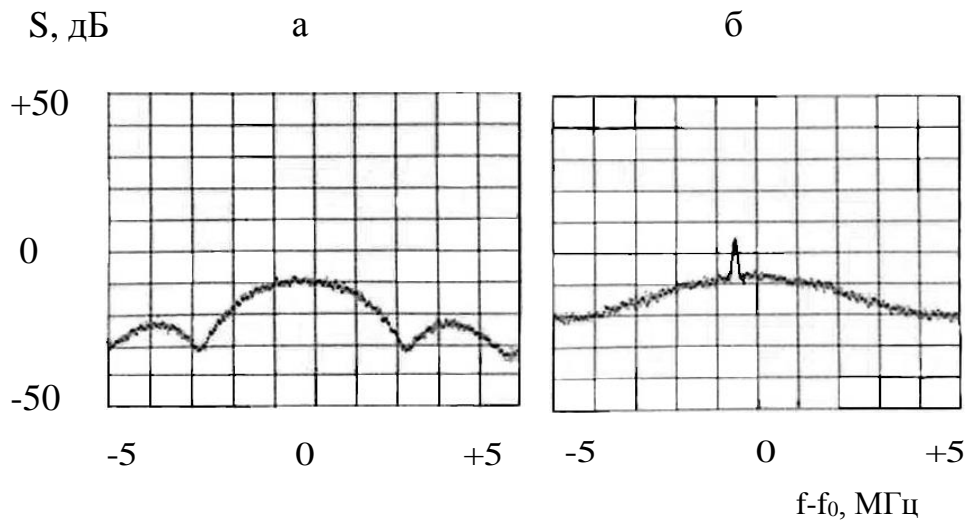


Рис. 5. Суммарный спектр сигнала и широкополосной помехи на входе приемника (а), спектр на выходе приемного устройства для отношения мощностей помеха/сигнал на входе, равного 10 дБ (б)

В эксперименте по определению помехоустойчивости использовались два вида помех: синусоидальная помеха, близкая по частоте к передаваемому СВЧ-сигналу, и широкополосная помеха, согласованная по спектру с передаваемым сигналом. Широкополосная помеха формировалась при помощи микроволнового модема ФМ₂. Управление модемом 4 осуществлялось отдельным кодером 7 с той же тактовой частотой, что и у кодера 6 передатчика. Кодрующие последовательности обоих кодеров некоррелированы во времени. Эксперимент выполнен при синхронизме кодирующих последовательностей для модемов передатчика и приемника. Синхронизм обеспечивался применением регулируемой задержки 9. Обратное когерентное сжатие по частоте принятого сигнала осуществлялось сверткой с кодирующим сигналом модемом 5 в схеме приемника.

В качестве критерия помехоустойчивости принимали превышение свернутого сигнала на выходе приемного устройства 12 над шумовым фоном в зависимости от отношения сигнал/помеха на входе приемника.

При воздействии узкополосной помехи спектр суммарного сигнала и помехи на входе приемника имеет вид непрерывного в полосе широкополосного шума, соответствующего принятому сигналу с расширением спектра, над уровнем которого возвышается синусоидальная помеха. Декодер ФМ₃ обеспечивает свертку и выделение полезного сигнала. При декодировании узкополосная помеха размывается по спектру во всей полосе и превращается в шумовой пьедестал, над которым появляется свернутый информационный сигнал.

Широкополосная помеха формируется при прохождении сигнала генератора 2 через ФМ₂, и на входе приемника ее спектр имеет вид широкополосного непрерывного шума, который подобен шумовому спектру информационного сигнала на выходе ФМ₁.

Суммарный спектр сигнала и широкополосной помехи на входе приемника имеет вид непрерывного в полосе широкополосного шума и показан на рис. 5а. Спектр на выходе

приемного устройства в результате свертки в ФМ₃ для отношения мощностей помеха/сигнал на входе, равного 10 дБ, показан на рис. 5б.

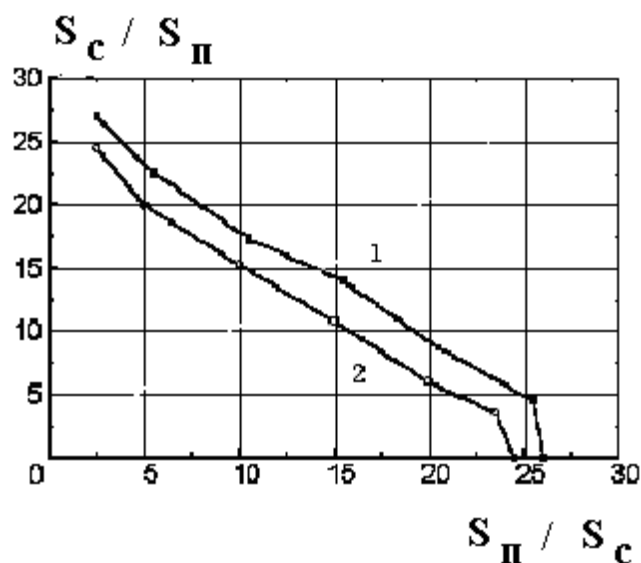


Рис. 6. Отношение сигнал/помеха (S_c/S_n) на выходе приемного устройства в зависимости от соотношения уровней помехи и информационного сигнала на входе приемника (S_n/S_c) для двух видов помех: узкополосной (1) и широкополосной (2)

На рис. 6 представлены результаты измерения отношения сигнал/помеха (S_c/S_n) на выходе приемного устройства в зависимости от соотношения уровней помехи и информационного сигнала на входе приемника (S_n/S_c) для двух видов помехи: узкополосной (1) и широкополосной (2). Предельная помехоустойчивость для системы связи с расширением спектра определяется отношением сигнал/помеха на входе приемника, при котором восстановление передаваемой информации становится невозможным при заданном времени усреднения.

Таким образом, результаты экспериментов показывают, что для обоих типов помехи предельная помехоустойчивость составляет ~ 25 дБ. При передаче информации используется непрерывная непериодическая кодирующая хаотическая последовательность, реализованная на интервале времени произвольной длительности. Таким способом реализуется динамическая смена кодов в течение всего времени передачи данных. В этом случае практически исключается возможность криптографического раскрытия сообщения [10, 11]. Этот результат свидетельствует о потенциальных возможностях применения исследуемой системы с расширением спектра на основе хаотических кодов в многостанционных мобильных системах связи с высокой степенью конфиденциальности.

Основной проблемой при использовании сложных сигналов при передаче информации в канале связи является проблема поиска и временной синхронизации сложных сигналов. Известен переборный метод поиска, когда вычисляют корреляционный интеграл относительно сдвигаемого опорного сигнала и в качестве оценки временного положения принятого сигнала выбирают временной сдвиг, максимизирующий эту корреляцию. Однако для большой области априорной неопределенности задержек сигнала и большой базы сигналов, необходимой для обеспечения высокой помехоустойчивости, такой метод при аппаратной реализации приводит к значительному времени поиска, а при параллельной обработке на нескольких корреляторах – к нежелательному увеличению сложности связного оборудования. При программной реализации на основе ЭВМ этот метод требует большой емкости оперативного запоминающего устройства и высокого быстродействия процессоров.

Для сокращения времени поиска и синхронизации разрабатываются алгоритмы быстрого поиска. Это быстрые преобразования Фурье и другие спектральные преобразования, упрощающие выполнение операции свертки. Особенность алгоритма синхронизации

заключается в том, что основной целью передачи сигналов по каналу связи является определение их временного положения, а вспомогательной – передача информации.

Под сложными обычно понимают сигналы, для которых произведение их длительности на занимаемую полосу частот значительно больше единицы. Известно, что произведение длительности любого импульсного сигнала на его полосу частот приблизительно равно единице. Поэтому для того чтобы это произведение было больше единицы, необходимо применять специальные алгоритмы, расширяющие спектр сигнала.

Необходимо отметить, что простое двоичное избыточное кодирование усложняет структуру информационного сигнала (особенно для мощных кодов), однако практически существенно не расширяет полосу занимаемых частот.

Наиболее трудным моментом при проектировании системы связи на основе сложных сигналов является построение системы синхронизации таким образом, чтобы она не ухудшала помехоустойчивости и скорости передачи для основной информации. При этом нужно учесть ряд дополнительных обстоятельств:

1) снижение стабильности опорных генераторов и эквивалентные этому флуктуации частоты в канале связи приводят к необходимости значительно увеличивать скорость передачи «синхроинформации» и, следовательно, к снижению помехоустойчивости;

2) сигналы для передачи синхроинформации могут отличаться по своей структуре от сигналов для передачи основной информации, т.е. могут быть неоптимальными;

3) для синхронизации сложных составных сигналов, чтобы осуществить простую тактовую синхронизацию, приходится использовать всю сложную форму составного сигнала, а это возможно только при синхронизации по периоду полного сигнала.

При использовании прямой свертки на входе приемника проблемы синхронизации и передачи информации могут быть решены практически одинаковыми способами. При этом функциональная схема радиотерминала может состоять из практически стандартных узлов.

При синхронизации необходимо осуществить последовательно следующие операции:

1) поиск, плавное сканирование по фазе либо непосредственно тактовой частоты, либо кодовой комбинации данного абонента,

2) захват и синхронизацию тактовой частоты, идентификацию абонента, уведомление о синхронизме с данным абонентом, уведомление о начале информационной посылки, запуск генератора ШПС;

3) периодическую подстройку параметров синхросигнала.

Таким образом, для повышения помехоустойчивости синхроканала информация по нему должна идти не только в начале сеанса связи, но и в течение всего цикла обмена информацией между приемником и передатчиком.

При использовании принципа прямой свертки сигнала на входе информационный и синхроканал можно разместить в общей полосе частот, разделив их структурно в приемнике и передатчике (самой высокой расширяющей частотой является тактовая частота опорного генератора). При этом в синхроканале будет циркулировать информация о фазе тактовой частоты опорного генератора и идентификационный код абонента. Наличие связи по синхроканалу непрерывно контролируется как на принимающей, так и на передающей стороне.

При стабильном синхроканале на обоих концах связного тракта запускается генератор шумоподобного сигнала, генерирующий непериодическую случайную последовательность, которая и служит для кодирования и декодирования информационных битов.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения систем псевдослучайных сигналов, формируемых хаотическими алгоритмами, в качестве кодирующих последовательностей для широкополосных систем передачи с кодовым разделением каналов. Цифровая система связи с расширением спектра и динамической сменой хаотических кодов обладает высокой помехозащищенностью и повышенной конфиденциальностью при передаче данных в условиях сложной электромагнитной обстановки, воздействия сильных помех и многолучевого распространения сигналов.

Быстродействующие цифровые процессоры на основе конечномерных алгоритмов с нелинейной динамикой создают большой ансамбль хаотических бинарных кодов, что позволяет практически осуществить кодовое разделение большого числа абонентов. Передача данных с динамической сменой хаотических кодов затрудняет возможность криптографического раскрытия конфиденциальных сообщений.

6. Заключение

В настоящее время развитие современных информационно-телекоммуникационных систем и информационных технологий связано в первую очередь с разработкой программных и алгоритмических средств защиты информации при ее передаче, обработке и хранении в компьютерных сетях, а также с бурным ростом систем персональной радиосвязи, резким увеличением числа пользователей, с возросшей подвижностью абонентов, с необходимостью передачи разнообразной информации.

Прикладное применение информационных технологий предполагает физическую реализацию конкретного кодирующего процесса при передаче, обработке и хранении информации в телекоммуникационных системах и компьютерных сетях. Прогресс в данной области связан с увеличением быстродействия и повышением помехозащищенности информационных каналов. Это в первую очередь диктуется потребностью разработки эффективных каналов информационного обмена и управления распределенными сетями и автоматическими системами с дистанционным управлением, где цена ошибки или частичная потеря информации может иметь катастрофические последствия, вплоть до потери всей системы.

На примере модели телекоммуникационного радиотерминала широкополосного цифрового канала связи с расширением спектра экспериментально исследованы информационные технологии модели цифрового канала связи с расширением спектра с использованием кодирующих хаотических сигналов. Показано, что в таком канале связи при передаче реализуется эффективное расширение спектра несущей, трансформирующее его в шумовой сигнал в широкой полосе частот. Расширение спектра при передаче информации обеспечивает энергетическую скрытность (заметность), а характер формируемой шумоподобной несущей обеспечивает эффективную структурную скрытность канала связи. Реализованный на этих принципах канал связи имеет высокую конфиденциальность, т.к. восстановить хаотическую расширяющую функцию и свернуть широкополосный сигнал при несанкционированном приеме практически невозможно. Свойство взаимной ортогональности хаотических кодов позволяет осуществить статистическое разделение широкополосных сигналов в канале связи при многолучевом распространении с относительной задержкой лучей, превышающей длительность одного символа хаотического кода.

Наблюдающаяся в последние годы тенденция глобального распространения разнообразных открытых телекоммуникационных систем и резкий рост числа абонентов приводят к необходимости защиты информации не только на уровне государственных органов, специальных служб или деловых кругов, но и на уровне практически каждого индивидуального пользователя. В информационных сетях данная проблема связана не столько с закрытием информации (криптография), сколько с потерями информации из-за низкой помехоустойчивости различных каналов связи. Особенно остро проблема повышения помехоустойчивости каналов связи стоит в радиорелейных линиях.

Литература

1. *Shannon. C. E.* // Bell System Techn. J. 1948. V. 27. № 3. P. 379–423.
2. *Варакин Л. Е.* Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1979.
3. *Котельников В. А.* Теория потенциальной помехоустойчивости. М.: Радио и связь, 1998.
4. *Беляев Р. В., Калинин В. И., Колесов В. В.* Формирование шумоподобной несущей в системах связи с расширением спектра // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46, № 2. С. 214–223.
5. *Беляев Р. В., Воронцов Г. М., Залогин Н. Н., Колесов В. В.* Оценка длины непериодического сегмента псевдослучайной последовательности, формируемой дискретным алгоритмом с запаздыванием // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47, № 4. С. 477–481.
6. *Беляев Р. В., Воронцов Г. М., Кислов В. В., Колесов В. В., Попов А. М., Рябенков В. И.* Спектр периодов псевдослучайных последовательностей, формируемых алгоритмом с задержкой // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49, № 3. С. 325–332.
7. *Гуляев Ю. В., Кислов В. Я., Кислов В. В., Калинин В. И., Колесов В. В., Беляев Р. В., Воронцов Г. М.* Широкополосные телекоммуникационные средства с кодовым разделением каналов на основе хаотических сигналов // Радиотехника. 2002. № 10. С. 3–15.
8. *Беляев Р. В., Воронцов Г. М., Колесов В. В.* Случайные последовательности, формируемые нелинейным алгоритмом с запаздыванием // Радиотехника и электроника. 2000. Т. 45, № 12. С. 954–960.
9. *Беляев Р. В., Воронцов Г. М., Кислов В. Я., Колесов В. В., Крупенин С. В., Попов А. М., Рябенков В. И.* Сложные хаотические дискретные сигналы в системах телекоммуникации, радиолокации и навигации // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51, № 9. С. 1116–1128.
10. *Kolesov V. V., Potapov A. A.* The Information Technologies on Dynamic Chaos for Telecommunication, Radar and Navigation Systems // Electromagnetic Phenomena. V. 5, № 2(15). 2005. P. 89–104.
11. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, 2-е издание: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1104 с.

Статья поступила в редакцию 21.05.2016

Колесов Владимир Владимирович

к.ф.-м.н., зав. лабораторией института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН (125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, стр. 7), тел. (495) 629-33-68, e-mail: kvv@cplire.ru.

Полубехин Александр Иванович

к.т.н., руководитель инновационного технологического центра МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), тел. (499) 263-68-46, e-mail: polub1980@mail.ru.

Чигин Евгений Павлович

к.т.н., ученый секретарь Совета по физической электронике при Президиуме РАН, (125009, Москва, ул. Моховая, д.11, стр. 7), тел. (495) 629-33-68, e-mail: kvv@cplire.ru.

Юрин Александр Дмитриевич

к.т.н., старший научный сотрудник инновационного технологического центра МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), тел. (499) 263-68-46, e-mail: yurin.mstu@gmail.com

Application of discrete chaotic algorithms in broadband telecommunication systems**Vladimir V. Kolesov, Alexander I. Polubekhin, Eugene P. Chigin, Alexander D. Yurin**

The perspective directions of information technologies on the basis of dynamic chaos for transmission, processing, storage and information security are considered. The broadband systems of information transmission using the complex signals with big base constructed on the basis of systems with chaotic dynamics are presented. It is shown that on the basis of the developed coding finite-dimensional mathematical chaotic algorithms the digital telecommunication system with spread spectrum and dynamic change of chaotic codes possesses high noise immunity, security, electromagnetic compatibility and provides reliable and confidential transmission of messages in the conditions of a difficult electromagnetic situation.

Keywords: broadband information technologies, the chaotic coding algorithms, the spread spectrum technology, noise-like carrier, signal processing on carrier.