

УДК 621.383.92

ВРЕМЕННАЯ ПСЕВДОСЛУЧАЙНАЯ ПЕРЕСТРОЙКА ЦИФРОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ

Ю.Н. АКСЕНОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 29 ноября 2016

Объектом исследований является вид кодирования сигналов в оптических системах связи. С целью преодоления недостатков традиционных систем радиосвязи на основе передовой технологии UWB-связи предлагается новый вид кодирования оптических сигналов – временная псевдослучайная перестройка цифровых двоичных с активной паузой оптических импульсных сигналов. Предложенная технология позволяет повысить помехоустойчивость систем оптической связи и обеспечить защиту информации от несанкционированного доступа при ее передаче по сравнению с существующими оптическими системами связи. Предложены способы ее использования.

Ключевые слова: оптические системы связи, импульсные сигналы, безопасность передачи информации.

Введение

Анализ существующих систем радиосвязи [1-5], их сигналов и принципов функционирования, достоинств и недостатков показывает, что характеристики систем связи улучшались по мере освоения видов сигналов и их способов приема, разделения и обработки. Каждый раз возникала необходимость грамотно распределить ограниченный эфир по частоте или по времени между рабочими радиостанциями. Параллельно решался вопрос уменьшения полосы частот, занимаемых сигналами. Однако, проблемы при приеме простых (первичных) сигналов, у которых ширина спектра F_s равна ширине спектра излучения ΔF_s , не исчезали. Такие сигналы являются узкополосными.

Применение сложных широкополосных сигналов и статистических способов их обработки (корреляционного приема или обработки сигнала в оптимальном фильтре) позволило улучшить электромагнитную совместимость, помехоустойчивость (замирания сигналов, противодействия помехам) и пропускную способность систем связи. Для военных систем обеспечивается и скрытность связи.

Сложные сигналы

У сложных сигналов за время их длительности $T_s = 1/F_s$ происходит дополнительная модуляция (манипуляция по частоте или по фазе), что приводит к расширению их спектра. Для базы сложного сигнала B_{ss} используют соотношение:

$$B_{ss} = T_{ss} \Delta F_{ss} \gg 1, \quad (1)$$

где ΔF_{ss} – ширина спектра сложного сигнала в B_{ss} раз больше ΔF_s и

$$B_{ss} = \Delta F_{ss} / \Delta F_s. \quad (2)$$

Избыточность спектра сигналов придает им полезные свойства. К примеру, чем больше B_{ss} тем больше скрытность системы связи.

В системах связи со сложными сигналами используют технологию кодового (по форме) разделения сигналов и каналов, когда все сигналы систем используют общую полосу частот (рис. 1).

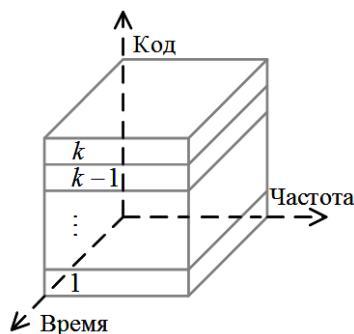


Рис. 1. Кодовое разделение сигналов (CDMA и FHSS)

В конце 20 века стали использовать широкополосные сигналы с так называемым коэффициентом широкополосности сигнала [4]:

$$\beta_{ss} = \frac{F_{ss}}{2f_0} \quad (3)$$

где f_0 – частота несущей сигнала. В системах «широкополосной» связи диапазонов ВЧ и УВЧ он равен десятым долям процента, а в сотовых системах связи и в системах различного назначения $\beta_{ss} \approx 0,2 \div 0,5$. При коэффициенте $\beta_{ss} \approx 1$ база сигнала достигает значений $0,5 \cdot 10^9$.

Для расширения спектра сигналов используются следующие методы:

- метод непосредственной модуляции несущей псевдослучайной последовательностью (ППС, англ. Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS) в широкополосных системах связи со сложными сигналами;
- метод псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ, англ. Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS) в сверхширокополосных каналах связи с простыми сигналами;
- метод расширения спектра при линейной частотной модуляции (ЛЧМ, англ. Chirp Spread Spectrum, CSS).

Широкополосные системы связи являются аналого-цифровыми, которые используют двоичные сигналы с пассивной паузой: с двумя разрешенными значениями цифр «включено» и «выключено». При этом так называемая несинусоидальная (в частном случае, цифровая) несущая лучше «несет» энергию сигнала в зону приема. Для расширения спектра применяются двоичные дискретные периодические псевдослучайные последовательности (ПСП): функции Радемахера и Уолша [1, 4-7].

При приеме широкополосных сигналов в оптимальном демодуляторе используются образцы символов «0» и «1» ($s_i(t)$). Принятый сигнал $z(t)$ умножается на образец сигнала $s_i(t)$ и фильтруется. Таким образом, вычисляется корреляционный интеграл (скалярное произведение):

$$(z, s_i) = \int_0^T z(t) s_i dt. \quad (4)$$

В результате получается свернутый узкополосный сигнал, что приводит к улучшению отношения сигнал/шум на выходе коррелятора в B_{ss} раз по отношению ко входу. Далее узкополосный сигнал обрабатывается обычным способом.

Анализ сотовой системы связи Ultra Wide Band (UWB)

Наиболее современной является технология сверхширокополосной связи Ultra Wide Band (UWB) [3, 8]. Это метод временной позиционно-импульсной модуляции, использующей сверхширокополосные сигналы. Это «импульсное радио» без несущей.

В системе UWB спектр сигнала расширен из-за применяемых коротких импульсов. Ширина полосы сигнала составляет около 160 % от центральной частоты f_0 .

Основные достоинства UWB:

- большое число каналов связи;
- совместимость с другими системами;
- обеспечение скрытности радиосвязи из-за низкой спектральной плотности сигнала и отсутствия информации о параметрах сигнала;
- работа в условиях интерференции сигналов;
- возможность высокоточной пеленгации абонента;
- большая проникающая способность сигналов из-за малой длины волны;
- простота устройств UWB (приемник построен по схеме прямого усиления, алгоритмы цифровой обработки сигналов отсутствуют, а в передатчике нет усиления сигнала по мощности перед подачей его в антенну);
- высокая помехоустойчивость (эффективное усиление при обработке сигнала) за счет применения корреляционной обработки сигнала на приеме и многократного повторения информационного сигнала (например, 200 раз);
- малое энергопотребление (средняя мощность излучаемых импульсных сигналов составляет единицы мВт и меньше).

Недостатки систем UWB:

- требуются мощные импульсные ключи, которые должны открываться и закрываться от 10 до сотен пс с мегагерцовой частотой при высокой стабильности и при больших коммутируемых напряжениях (токах);
- большие импульсные мощности излучаемых сигналов, которые воздействуют на организм человека и устройства [9].

Недостатки являются сдерживающим фактором развития систем UWB.

Ограниченный частотный ресурс диапазона радиоволн, необходимость в мобильных системах терминалов в помещениях и воздействие электромагнитного излучения на организм человека и на электронные устройства вынуждают вести поиск альтернативных UWB-системам беспроводных видов связи в оптическом диапазоне длин волн [10, 11].

Оптические системы связи

В волоконно-оптических системах связи (ВОЛС) в настоящее время используются только два вида модуляции: аналоговая и цифровая (рис. 2) [12].

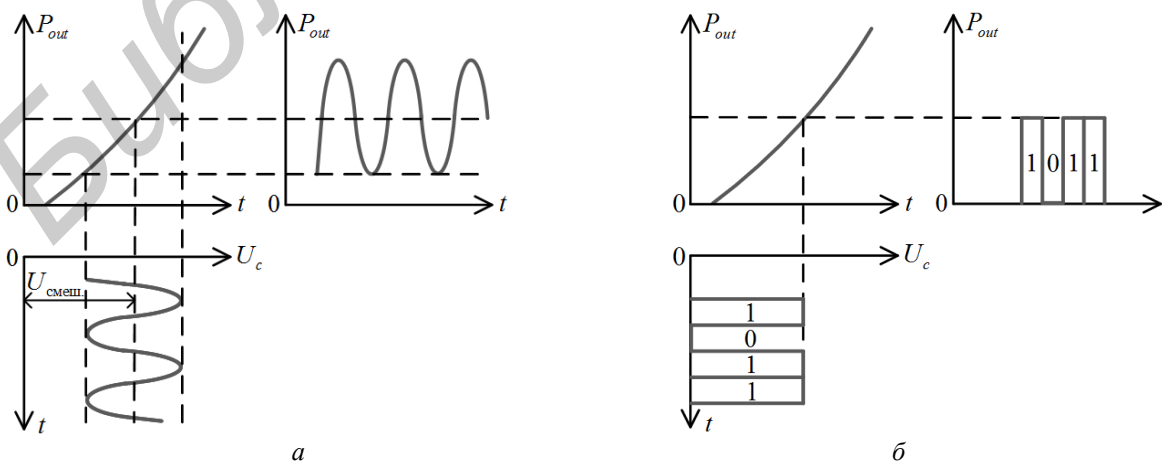


Рис. 2. Виды модуляции оптических сигналов: *а* – аналоговая; *б* – цифровая

При аналоговой модуляции с изменением модулирующего электрического сигнала U_c изменяется интенсивность светового потока P_{out} (частота или фаза светового сигнала). Однако применение светодиодов исключает возможность частотной и фазовой модуляции, так как у светодиода широкая полоса спектра излучения, а при этом необходимо стабильное и когерентное излучение. Кроме того, аналоговая модуляция подвержена нелинейным искажениям.

При цифровой модуляции [10] для передачи бинарного кода используются видеоимпульсы: сигнал нижнего уровня интенсивности светового потока P_{out} «0» и верхнего уровня – «1». В качестве оптических передатчиков применяются лазеры и светодиоды. Такой вид модуляции меньше подвергается нелинейным искажениям и помехам, хотя и является более сложным.

В ВОЛС лучшими оптическими технологиями в цифровых сетях связи являются IP, SDH и WDM. Эти транспортные технологии удовлетворяют требованиям к наземным сетям связи. Однако здесь не обеспечивается защита информации от несанкционированного доступа. Так, в ВОЛС в «составе» оптического информационного импульса находится множество фотонов, которые дублируют друг друга, что дает возможность их частичного перехвата.

Для защиты информации начали применять квантовую криптографию, в которой используют одиночные фотоны с определенной поляризацией или фазой. Перехват фотонов указывает адресату на несанкционированный доступ. Если перехваченный квант «клонировать» для передачи адресату, то поляризация его неоднозначна (искажается), что приводит к большим ошибкам при приеме, указывающим на несанкционированный доступ. Поэтому секретные службы зарубежных государств и банковские сети [13-17] переходят на квантовые линии связи.

Одиночные фотоны получают при сильном ослаблении излучения лазера в двухпроходной оптической схеме или используют однофотонные излучатели на квантовых точках (разработаны в Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (Россия)). Кодирование квантовых состояний фотонов может быть фазовым или поляризационным. В двухпроходной оптической схеме на обратном пути к приемнику происходит автоматическая компенсация всех поляризационных и фазовых искажений фотонов. Однофотонными приемниками могут служить лавинные фотодиоды ЛФ и сверхпроводящие детекторы из набора нанопроволок толщиной около 50 нм. Последние имеют меньшие шумы.

Зашифрованные данные можно передавать по открытым ВОЛС при использовании протокола BB84 в передаче фотонов с поляризацией в четырех направлениях: горизонтальной, вертикальной, +45 градусов и –45 градусов. Секретный ключ шифрования стороны вырабатывают перед обменом данными, исходя из условно принятых логических «0» и «1». Максимальная дальность передачи квантового ключа по ВОЛС со сверхпроводящими детекторами до 250 км и до 150 км при использовании лавинных фотодиодов ЛД. На предельных расстояниях скорость передачи составляет около 10 бит в секунду, а на пятидесяти километрах – примерно 10 кбит в секунду. Поэтому квантовые линии связи имеют высокую ценность только для передачи конфиденциальных данных.

Первые теоретические исследования технологии передачи информации оптических систем связи в открытом пространстве (Free Space Optical, FSO) до 1980 г. в инфракрасном диапазоне длин волн [13] показали, что для помещений с протяженностью 50 м максимальная скорость передачи информации не превышает 10 Мбит/с, а практически достигает скорости передачи 64 кбит/с. Качество этих систем в основном определялось светодиодами ИК-связи с низкими модуляционными параметрами. В 2006 г. при передаче данных лазерным лучом между двумя спутниками Kiragi и ARTEMIS достигнута скоростью порядка 50 Мбит/с на дистанции 40000 км.

В атмосфере системы FSO работают и при дожде, а туман является помехой. Поэтому Российское оборудование Artolink – M2 имеет в своем составе миллиметровую радиосистему, которая функционирует при тумане. Artolink – M2 в 2010 г. на тестировании обеспечил передачу данных на дистанциях до 2,5 км при скорости 10 Гбит/с.

Основные недостатки инфракрасных систем связи FSO, которые не позволяют их использовать в оптических фемтосотовых сетях связи OLAN, в качестве интерфейсов подвижных устройств (в частности, медицинских мониторов, на беспилотных летательных аппаратах и др.) и в открытых водных пространствах:

- большие габариты и вес;

- излучение лазера опасно для человека;
- наличие габаритных оптических линз;
- наличие для связи только прямого излучения света;
- они не могут работать в водных средах (из-за ИК-лазера).

Для преодоления указанных недостатков, достижения высокой помехоустойчивости, конфиденциальности передачи данных предлагается метод кодирования цифровых оптических двоичных с активной паузой импульсных сигналов, названный в Евразийской заявке №201300973 от 09.07.2013г. «Минским кодом».

«Минский код» – цифровые импульсные оптические сигналы с активной паузой

Предложенный метод кодирования использует временную псевдослучайную перестройку цифровых импульсных оптических сигналов ультрафиолетового, видимого и инфракрасного диапазонов.

Цифровой сигнал получаем при импульсно-позиционной модуляции (англ. Pulse-position modulation, PPM). Используются импульсы-«маркеры» длительностью $\tau_n \ll T$ (нс), например, при длительности его периода $T = 200$ нс (рис. 3, а).

На рис. 3, б показан пример модуляции цифрового оптического сигнала одного абонента в одноканальной системе связи путем смещения информационного импульса τ_n относительно импульса-«маркера» с периодом T на время $-\tau_n/2$ при символе «0» и на время $+\tau_n/2$ при символе «1».

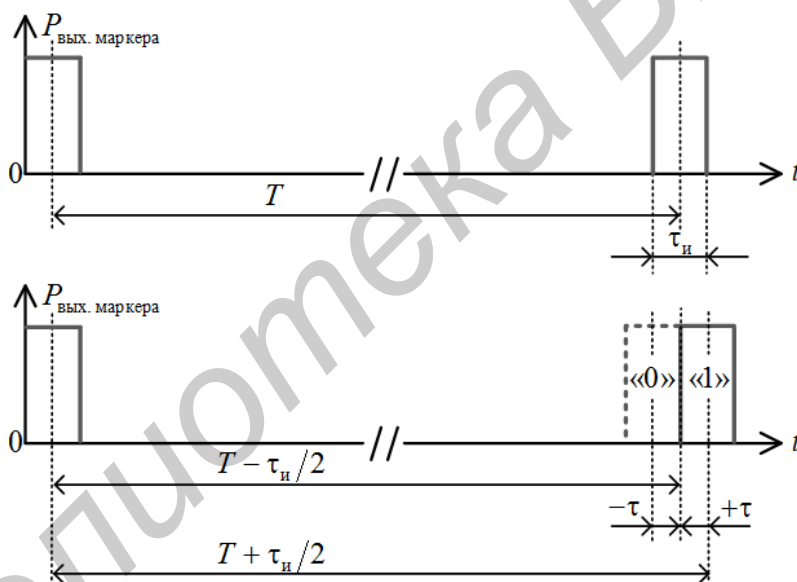


Рис. 3. Цифровая модуляция оптических сигналов в одноканальной системе связи

На рис. 4 показана структурная схема электрической части оптического модулятора одного канала системы связи (терминала абонента).

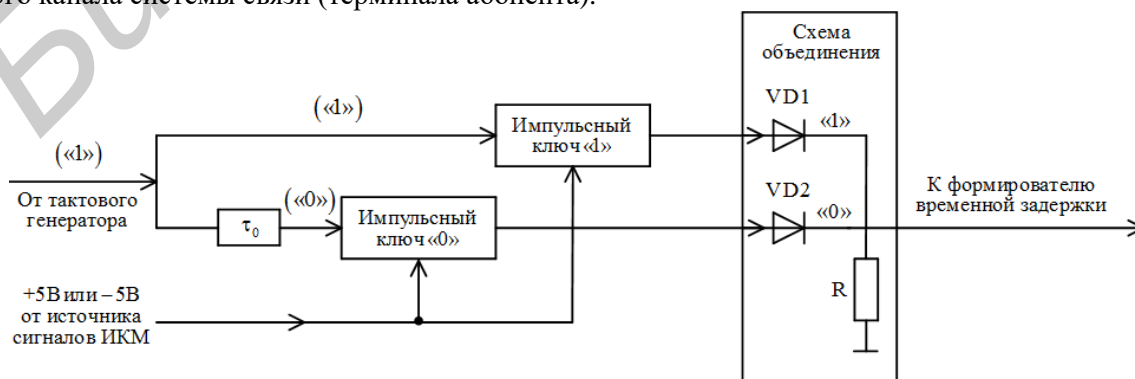


Рис. 4. Структурная схема электрической части оптического модулятора

Пусть тактовый генератор системы связи (не показанный на рисунке) в конце цикла T вырабатывает импульсы длительностью τ_n . Примем их за исходные сигналы («1»). Исходные сигналы («0») образуются после задержки тактовых импульсов на время τ_0 . Для обеспечения защиты системы связи от межсимвольных искажений выбирают длительность информационных импульсов $\tau_n < \tau_0$.

Информационные сигналы «1» и «0» «выбираются» импульсными ключами, которые управляются сигналами импульсно-кодовой модуляции ИКМ.

В многоканальной системе оптической связи (и при организации множественного доступа в системе сотовой оптической связи) вводится кодирование путем временной псевдослучайной перестройки цифровых оптических импульсных сигналов. Информационные импульсы «1» и «0» k -го канала или в терминале абонента k смещаются дискретно во временном интервале T (T – цикл) на текущий временной сдвиг

$$\tau_k = T \pm \tau_n - \Gamma_k(t) \tau_0, \quad (5)$$

где $\Gamma_k(t) \tau_0 \gg \tau_n$ – временной сдвиг каждого информационного импульса канала системы связи (или терминала); $\Gamma_k(t)$ – персональный коэффициент временного сдвига импульса k -го канала системы связи (терминала абонента), выбранный из некоторой целочисленной псевдослучайной последовательности (целое число от 1 до N); τ_0 – время длительности элемента линии задержки формирователя временной задержки системы оптической связи.

После схемы объединения информационные сигналы поступают в формирователь временной задержки, где сигнал получает временную задержку, определяемую псевдослучайной последовательностью. Формирователь временной задержки позволяет обеспечить многоканальную работу оптической системы связи ВОЛС с различными временными сдвигами информационных импульсов N каналов (сигналов абонентов в сотовой системе связи).

Задание временного положения импульса каждого канала на основе псевдослучайной последовательности усложняет перехват информации, что позволяет также обеспечить защиту передаваемой информации от несанкционированного доступа.

Применение оптических сигналов с активной паузой для кодирования «0» и «1» в «Минском коде» позволяет обеспечить более высокую помехоустойчивость оптических систем связи, чем у существующей цифровой оптической модуляции, где применяются оптические сигналы с пассивной паузой (рис. 2, б).

Достоинства «Минского кода»:

- использование оптических сигналов с активной паузой, что увеличивает помехоустойчивость;
- каждая информационная посылка (сложного сигнала) повторяется многократно, что дает при приеме сигналов накопление их энергии;
- в приемнике обеспечивается корреляционный прием сигналов оптическим логическим элементом И, при котором сигналы от других оптических излучателей не воздействуют и могут влиять на отдельный импульс, а не на информационный бит в целом, а также позволяет уменьшить влияние модовой дисперсии в многомодовом световоде, что увеличивает дальность связи;
- прием своих отраженных оптических сигналов невозможен, так как они имеют задержку по времени;
- фон рассеиваемого луча слабее, чем у отраженных радиоволн;
- луч света уже, чем радиолуч, что способствует скрытности сигнала, а отсутствие информации о параметрах сигнала при организации псевдослучайной перестройки цифровых активных оптических сигналов обеспечивает защиту передаваемой информации от несанкционированного доступа.

С изобретением временной позиционно-импульсной оптической модуляции появляются перспективы в развитии FSO в космосе, в населенных пунктах, на больших промышленных объектах, в замкнутом пространстве (стадионе, самолете, доме и т.д.) и в открытом море.

Фемтосотовая оптическая связь может использоваться для организации телефонных и телевизионных каналов и офисных сетей. При этом оптические средства связи с использовани-

ем светодиодов могут обеспечить экологическую безопасность, где коммуникации с радиоизлучениями запрещены или очень нежелательны.

Заключение

Предложен новый вид кодирования оптических сигналов – временная псевдослучайная перестройка цифровых оптических импульсных сигналов с активной паузой («Минский код»), способный обеспечить оптическим системам связи высокую помехоустойчивость, большую широкополосность, а также защиту передаваемой информации от несанкционированного доступа.

TIME-DEPENDENT PSEUDORANDOM HOPPING OF DIGITAL OPTICAL PULSE-SHAPED SIGNALS

Yu.N. AKSENOV

Abstract

The object of the investigations is the type of signal encoding in optical communication systems. In order to overcome the drawbacks of the traditional radio communication systems a new type of optical signals encoding is suggested on the basis of the advanced technology of UWB-communication. In the suggested method the digital optical pulsed signals with an active pause are shifted in time under a pseudorandom law. This allows achieving a high noise-resistance and information protection against the unauthorized access while data transfer for optical communication systems in comparison to the traditional communication systems. The ways of its implementation are discussed.

Keywords: optical communication systems, pulsed signals, information transmission security.

Список литературы

1. Берлин А.Н. Цифровые сотовые системы связи. М., 2007.
2. Шахнович И.В. Современные технологии беспроводной связи. М., 2006. С. 138-148.
3. Scholtz R.A. Multiple Access with Time-hopping Impulse Modulation. Los Angeles, 1993.
4. Урядников Ю.Ф., Аджемов С.С. Сверхширокополосная связь. М., 2005.
5. Ипатов В.П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения. М., 2007.
6. Ждейкс У.К. Связь с подвижными объектами в диапазоне СВЧ. М., 2000.
7. Крутов А. // Беспроводные технологии. 2007. №1. С. 6-9.
8. Дубенюк Н. Мобильник убийца. М., 2007.
9. Фриман Р.Л. Волоконно-оптические системы связи. М., 2006.
10. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника. М., 1989.
11. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника. М., 2001.
12. Ермаков О.Н. Прикладная оптоэлектроника. М., 2004.
13. Гулаков И.Р., Зеневич А.О. Фотоприемники квантовых систем: монография. Минск, 2012.
14. Гулаков И.Р., Зеневич А.О. // Приборы и техника эксперимента. 2001. №4. С. 137-139.
15. Гулаков И.Р., Зеневич А.О. // Технические средства защиты информации. 2005. С. 94-95.
16. Гулаков И.Р., Зеневич А.О. Тимофеев А.М. // Приборостроение. 2012. С. 56-57
17. Аксенов Ю.Н., Костюковский А.Г. Способ передачи информации в оптической системе связи, оптическая система связи для его реализации, передаточный терминал и система связи глобального информационного общества. Заявка в ЕАПВ регистрационный № 201300973 от 09.07.2013.