

Исследование комбинированных методов широкополосной модуляции цифровых сигналов

А. В. Сорокин, Е. А. Рылов, К. В. Гольдибаев, Е. В. Галузов

АО «Проектно-конструкторское бюро «РИО»

Аннотация. В статье приводится обзор основных способов расширения спектра: линейная частотная модуляция (ЛЧМ), расширение спектра методом прямой последовательности (МПП) и псевдослучайная перестройка рабочей частоты (ППРЧ). Рассмотрен метод комбинированного расширения спектра: применение ЛЧМ сигналов в режиме ППРЧ. Проведено исследование комбинированного метода модуляции: применение ЛЧМ сигналов в составе псевдослучайной последовательности прямого расширения спектра. Построена математическая модель ЛЧМ-МПП модулятора в среде Matlab, исследованы автокорреляционные функции сгенерированных сигналов с комбинированным типом модуляции.

Ключевые слова: широкополосная модуляция; комбинированная модуляция; методы расширения спектра; линейная частотная модуляция (ЛЧМ); расширение спектра методом прямой последовательности (МПП); псевдослучайная перестройка рабочей частоты (ППРЧ)

I. ВВЕДЕНИЕ. ОБЗОР МЕТОДОВ РАСШИРЕНИЯ СПЕКТРА

Методы расширения спектра сигналов известны с середины прошлого века. В первую очередь они оказались востребованы благодаря высокой помехозащищенности, сложности обнаружения факта работы системы связи и низкой вероятности перехвата сигнала.

Системы связи с расширенным спектром имеют некоторые отличительные особенности:

- используемая для передачи полоса существенно шире минимально необходимой;
- расширение спектра реализуется за счет расширяющего сигнала, не зависящего от передаваемой информации;
- сужение спектра приемником для восстановления исходных данных происходит при сопоставлении полученного сигнала с синхронизированной копией расширяющего сигнала.

Существуют различные методы расширения спектра, среди которых наибольшее распространение получили три метода: линейная частотная модуляция (ЛЧМ), метод прямой последовательности (МПП), псевдослучайная перестройка рабочей частоты (ППРЧ).

А. Расширение спектра методом линейной частотной модуляции – ЛЧМ

Частота несущего радиосигнала в зависимости от времени либо нарастает (UpChirp), либо убывает (DownChirp) по линейному закону (рис. 1). Ранее ЛЧМ применялась в основном в радиолокации, однако на сегодняшний день, особенно с развитием SDR технологий и применением цифровой обработки

сигналов на основе высокопроизводительных программируемых логических интегральных схем и цифровых сигнальных процессоров, ЛЧМ начала активно применяться в системах связи, особенно при работе в сложной помеховой обстановке.

ЛЧМ сигнал описывается выражением (1):

$$s(t) = S_0 \cos \left\{ \varphi_0 + 2\pi \left(f_0 t + \frac{b}{2} t^2 \right) \right\}, \quad (1)$$

где $b = (F_{max} - f_0)/T_c$,

f_0 – начальная частота сигнала,

T_c – длительность сигнала,

F_{max} – максимальное значение частоты сигнала.

Автокорреляционная функция $R_\alpha(\tau)$ в общем виде определяется интегралом [2]:

$$R_\alpha(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)f(t-\tau)dt \quad (2)$$

и является мерой соответствия между сигналом $f(t)$ и его копией, сдвинутой во времени на τ .

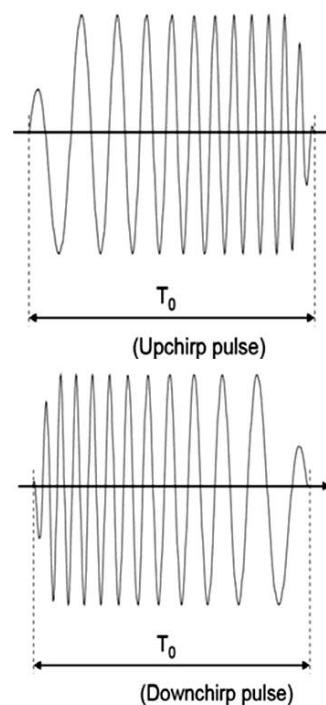


Рис. 1. ЛЧМ импульсы типа UpChirp и DownChirp

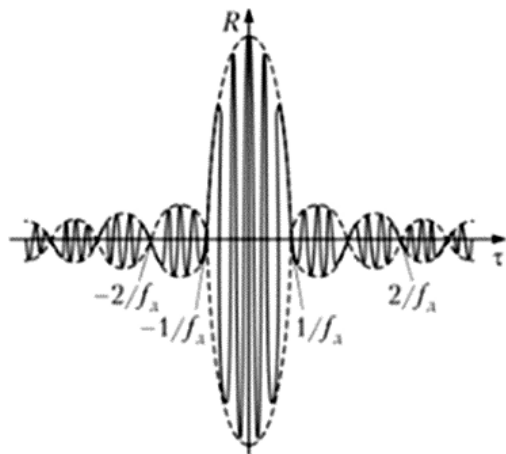


Рис. 2. Автокорреляционная функция (АКФ) ЛЧМ-импульса

Детектирование последовательности символов закодированных UpChirp- и DownChirp-импульсами происходит с помощью двух блоков автокорреляционных преобразований (рис. 3).

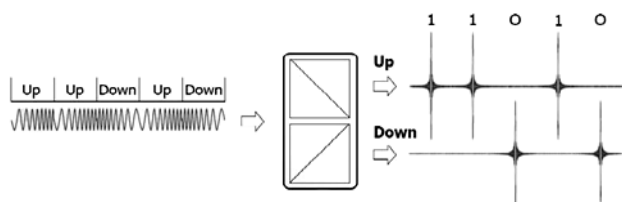


Рис. 3. Детектирование ЛЧМ-кодированного сигнала

Прием такого сигнала в окне водопада SDR приемника приведен на рис. 4.

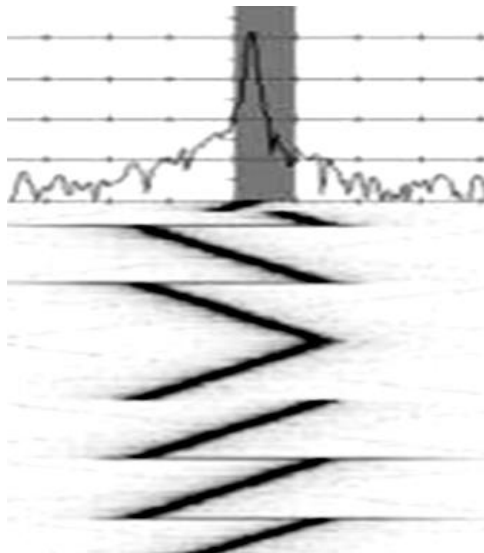


Рис. 4. Прием ЛЧМ сигнала в окне водопада SDR-приемника

В. Расширение спектра методом прямой последовательности – МПП

В каждый бит информации, представляющий собой логические 0 или 1, передающийся от передатчика к приемнику интегрируется некая последовательность чипов, где чип – это бит кодовой последовательности (рис. 5). Эти встраиваемые последовательности называют псевдослучайными последовательностями

(ПСП), шумоподобными кодами, псевдослучайными (ПШ-) последовательностями или PN-последовательностями. Псевдослучайный код отнюдь не является случайным, т.к. является детерминированным периодическим сигналом, известным передатчику и приемнику, однако имеет статистические свойства дискретного белого шума [1]. Для постороннего пользователя такой сигнал будет казаться совершенно случайным. Данный метод позволяет значительно увеличить помехозащищенность и скрытность, при небольших потерях в скорости.

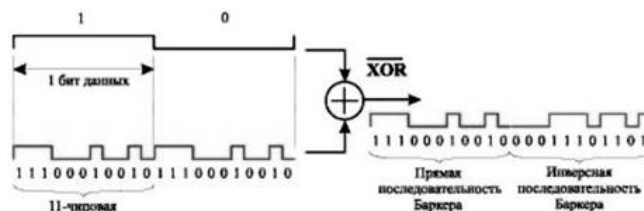


Рис. 5. Расширение спектра применением ПСП

Чиповые последовательности, интегрированные в информационный сигнал для расширения спектра, должны отвечать требованиям автокорреляции для дальнейшего выделения приемником информационного сигнала на уровне шума. Примером такой ПСП является код Баркера (рис. 6).

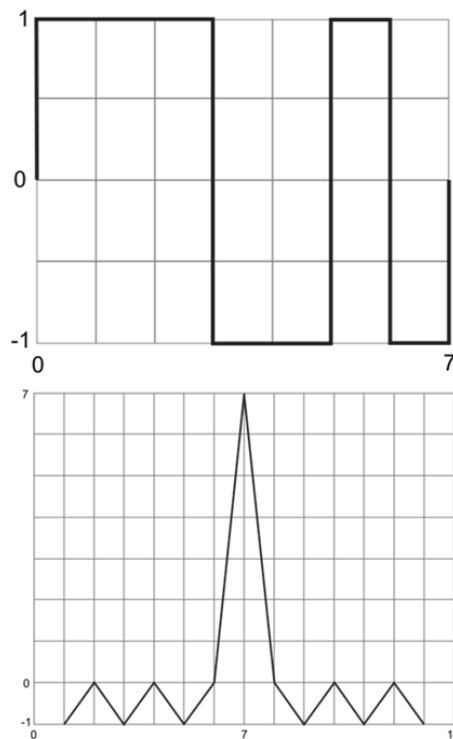


Рис. 6. АКФ 7-элементного кода Баркера

Максимум АКФ превышает уровень боковых лепестков в число раз, равное числу элементов кода.

С. Расширение спектра методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты – ППРЧ

Особенностью метода ППРЧ является расширение спектра за счет частой смены несущей частоты в пределах широкого диапазона, что не допускает перехват или радиоподавление узкополосным шумом.

Частота меняется в соответствии с псевдослучайной последовательностью чисел, которая известна передатчику и приемнику (рис. 7).

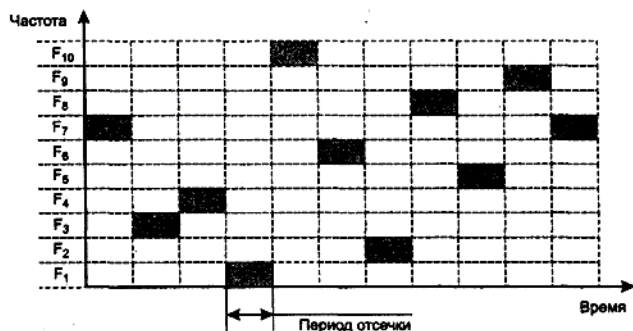


Рис. 7. Сигнал передающийся методом ППРЧ

II. КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ РАСШИРЕНИЯ СПЕКТРА

А. Исследование расширения спектра методом комбинирования ППРЧ-ЛМЧ

Современные реалии требуют новых подходов к передаче информации с более высокой степенью точности и защиты, одним из таких методов стало комбинирование ППРЧ и ЛМЧ. Такой метод на сегодняшний день применяется массово в FPV-БПЛА (беспилотных летательных аппаратах). Данный метод передачи является крайне помехоустойчивым даже к системам радиоэлектронной борьбы. Основой для данного комбинированного метода послужили популярный на сегодняшний день LoRa протокол обмена (рис. 8) [3] и программно-реализованная ППРЧ на цифровом сигнальном процессоре.

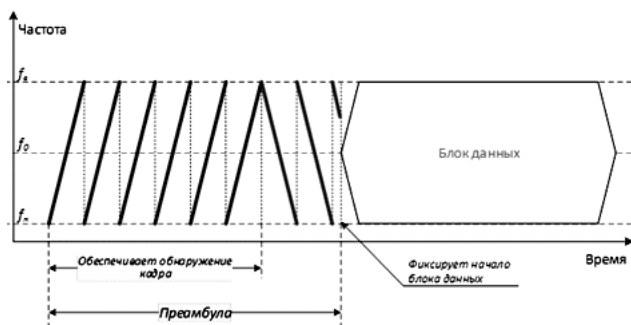


Рис. 8. Структура LoRa-сигнала

LoRa сигнал крайне устойчив к сосредоточенным помехам. Как показывает практика, для подавления такого канала связи требуется генерировать ПСП сигнал с параметрами ЛЧМ-импульсов, идентичными полезному сигналу.

В технологии ELRS за основу взят протокол LoRa, но дополнительно к этой передаче сигнала применяется ППРЧ. Диапазон перестройки 900...930 МГц. Ширина полосы 1 канала – 500 кГц. Длительность передачи 1 скачка – 20 мс (50 скачков в секунду). Пример приема такого сигнала в окне водопада SDR приемника приведен на рис. 9.

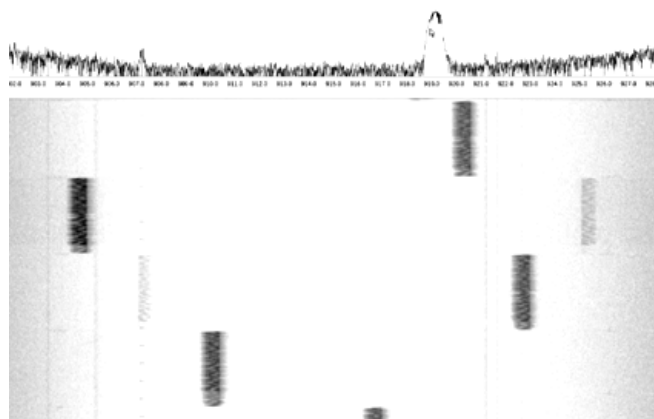


Рис. 9. Сигнал, модулированный комбинированным методом ППРЧ-ЛМЧ, принятый в окне водопада SDR приемника

Структура одиночного пакета (рис. 9), переданного на одной частоте, соответствует структуре LoRa пакета данных, указанных на рис. 8.

В. Исследование расширения спектра методом комбинирования МПП-ЛМЧ

При использовании данного метода передача информации кодируется ПСП, имеющей острую АКФ, но при этом, каждый бит последовательности представляет собой ЛЧМ импульс, имеющий свою острую АКФ.

Предложена и исследована математическая модель модулятора МПП-ЛМЧ в среде Matlab. Пример сгенерированного сигнала для 5-элементного кода Баркера приведен на рис. 10.

Исследование АКФ комбинированного сигнала показало существенный выигрыш по сравнению с АКФ только ЛЧМ-сигнала или только ПСП-модулированного сигнала. Выходные сигналы с АКФ-модулей при приеме последовательности, модулированной МПП-ЛМЧ приведен на рис. 11.

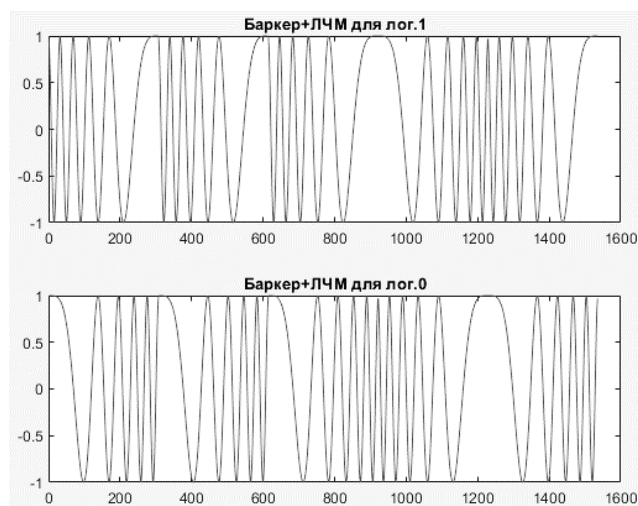


Рис. 10. Логические «0» и «1» модулированные комбинированным методом МПП-ЛМЧ для 5 элементного кода Баркера

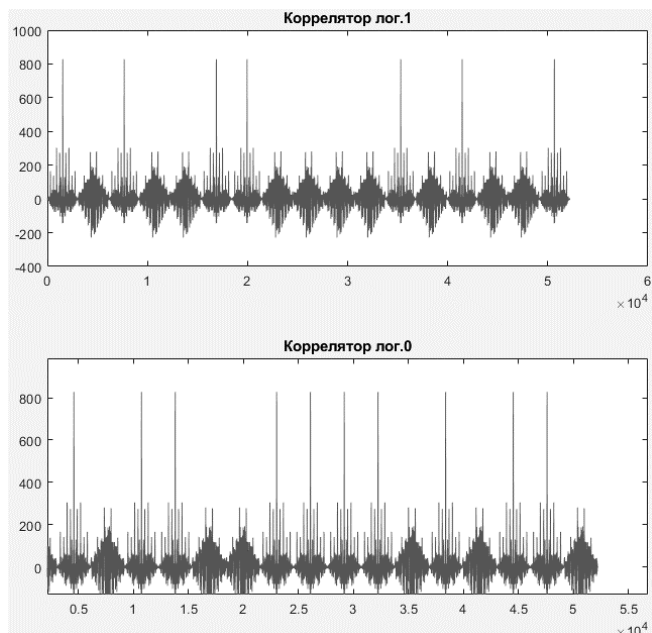


Рис. 11. Выходы модулей АКФ для приема логических «1» и «0», модулированного комбинированным методом МПП-ЛЧМ

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные реалии показали острую необходимость развития цифровых каналов связи, обеспечивающих скрытную работу под шумами и имеющими высокую стойкость к средствам радиоэлектронной борьбы.

Разработанная в пакете Matlab модель комбинированного способа модуляции также позволяет проводить исследования более сложных ПСП (например, часто применяемых в связи М-последовательностей или последовательностей Голда) для получения МПП-ЛЧМ сигналов и анализа их характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Надымов А.В., Титов П.Л. Перспективные средства связи: учебное пособие для вузов. Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2015.
- [2] Феер К. Беспроводная цифровая связь, методы модуляции и расширения спектра. Перевод с англ. / Под ред. В.И. Журавлева. М.: Радио и связь, 2000. ISBN 5-256-01444-7
- [3] Технологии связи (iTech), официальный сайт. – URL: <https://itechinfo.ru/node/46>