

# Обробка інформації в складних технічних системах

УДК 621.391

К.С. Васюта<sup>1</sup>, С.В. Озеров<sup>1</sup>, С.В. Яровой<sup>1</sup>, В.П. Ясинецкий<sup>2</sup>, А.С. Мирошниченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Харківський університет Воздушних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

<sup>2</sup> Національний університет оборони України імені Івана Черняховського, Київ

## ПРИМЕНЕНИЕ ХАОТИЧЕСКОЙ MSK-МОДУЛЯЦИИ ДЛЯ СКРЫТОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМЕ РАДИОСВЯЗИ

*В работе представлен метод повышения скрытности передачи цифровой информации в системах радиосвязи, который основан на применении хаотических сигналов (процессов) для MSK-модуляции гармонической несущей. Приведена структурная схема устройства формирования и обработки хаотического MSK-сигнала. Проведен анализ качества восстановления информационного сообщения путем расчета вероятности (коэффициента) битовых ошибок, который соизмерим с такими же коэффициентами, полученными для бинарных систем передачи информации, использующих в качестве несущей гармонические колебания. Произведена оценка выигрыша в повышении скрытности информационного сигнала (при помощи BDS-статистики). Показано, что такой способ передачи информации повышает скрытность функционирования системы радиосвязи за счет схожести статистических и динамических характеристик информационного сигнала с аналогичными характеристиками шума наблюдения (белого шума).*

**Ключевые слова:** хаотический сигнал, MSK-модуляция, фазовый портрет, вероятность битовых ошибок, скрытность.

### Введение

Повышение скрытности функционирования радиотехнических систем передачи информации (радиосвязи) является актуальной задачей при построении сетцентрических систем управления войсками и вооружением.

Под скрытностью функционирования радиотехнических систем следует понимать [1] способность противостоять мерам радиотехнической разведки: обнаружению сигнала и определению его структуры на основе оценки ряда его параметров. В качестве критерия скрытности можно принять величину  $P_{\text{скр}} = 1 - P_p$ , которая зависит от вероятности разведки  $P_p = P_{\text{обн}}$ , где  $P_{\text{обн}}$  – вероятность правильного обнаружения сигнала [1].

Одним из способов повышения скрытности функционирования систем радиосвязи является применение хаотических сигналов (процессов), которые по своим статистическим характеристикам подобны шуму наблюдения (белому шуму). Однако развитие новых непараметрических методов обнаружения сигналов [2] ставит под сомнение обеспечение требуемой скрытности функционирования систем радиосвязи, использующих хаотические сигналы. В частности, это объясняется тем, что хаотические сигналы проявляют структурированность в фазовом пространстве [3].

Анализ литературы [3 – 5] показывает, что решением данной проблемы является формирование сложных хаотических сигналов, которые по своим динамическим характеристикам подобны белому шуму.

**Целью работы** является развитие методов повышения скрытности функционирования системы радиосвязи за счет применения сложного хаотического MSK (Minimal Shift Keying)-модулированного сигнала.

### Основная часть

Рассмотрим принцип функционирования системы радиосвязи, использующей в качестве несущей хаотический MSK-модулированный сигнал, принципы формирования и характеристики которого подробно изложены в работе [6].

На передающей стороне (рис. 1) поток информационных бит поступает на вход делителя, в котором разбивается на две подпоследовательности – четных и нечетных бит и преобразуется в последовательность положительных или отрицательных прямоугольных видеоимпульсов в зависимости от значения цифрового кода (логической "1" ставится в соответствие положительный импульс, а логическому "0" – отрицательный импульс). Далее последовательности видеоимпульсов подаются на формирователи радиоимпульсов (ФИ), причем для обеспечения временной задержки (необходимой для обработки сигнала на приемной стороне), четная последователь-

ность видеоимпульсов поступает на ФИ через линию задержки (ЛЗ). В ФИ видеоимпульсы перемножаются с гармоническими колебаниями квадратурных каналов  $\sin(\pi n / 2T_c)$ ,  $\cos(\pi n / 2T_c)$ . Полученные таким образом радиоимпульсы, в свою очередь, являются модулирующим колебанием по отношению к высокочастотной хаотической несущей, формирующейся в генераторе несущих сигналов (ГНС).

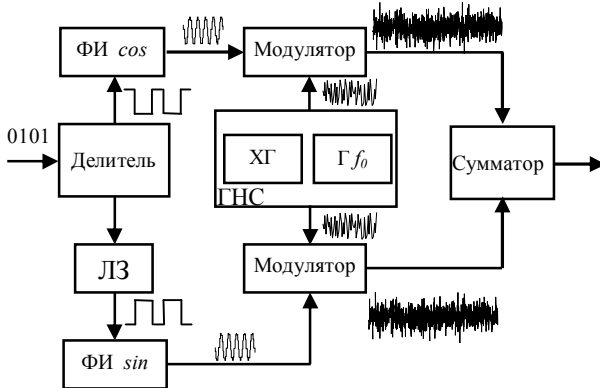


Рис. 1. Структурная схема формирователя хаотического MSK сигнала

Принцип действия ГНС основан на изменении частоты  $f_0$  высокочастотного гармонического колебания (формируемого в генераторе гармонических колебаний  $\Gamma f_0$ ) по закону хаотического сигнала (вырабатываемого в хаотическом генераторе ХГ). Промодулированные хаотические радиоимпульсы поступают на сумматор, где складываются в информационный сигнал, который, в свою очередь, подается на усилитель, антенну и излучается в канал связи.

Следует отметить важное замечание. Чтобы входящий поток данных восстанавливался без искажений приемником, приемник должен синхронизироваться с кадровой структурой потока данных [7].

Простейшим методом, используемым для кадровой синхронизации, является введение маркера. Маркер кадра [7] – отдельный бит или краткая последовательность бит, периодически вводимая передатчиком в поток данных. Такие маркеры применяются в системах, непрерывно передающих данные (подобно многим телефонным и компьютерным системам).

В системах с неустойчивой или импульсной передачей информации, либо при необходимости быстрого получения синхронизации применяются синхронизирующие кодовые последовательности [7]. Кодовые последовательности должны обладать малым абсолютным значением "побочных максимумов корреляции". В качестве таких последовательностей применяются коды Баркера [7], последовательности Уилларда и т.д. Структурная схема одного из вариантов устройства синхронизации [8] приведена на рис. 2.

Работой этой схемы управляют импульсы тактовой синхронизации (ИТС), вырабатываемые в отдельном устройстве. На вход схемы поступают при-

нятые биты с выхода коррелятора. Они проходят рекуррентную линию задержки (РЛЗ). Если на вход РЛЗ действует последовательность максимальной длины, сформированная по выбранному закону, то и на выходе будет такая же последовательность. Если на входе РЛЗ синхросигнала нет, а действуют биты, вызванные сообщением или шумами, то последовательности на входе и выходе не будут совпадать.

Наличие синхросигнала оценивается в "анализаторе совпадений", состоящем из сумматора по модулю два (М2), счетчика и порогового устройства (ПУ). М2 фиксирует совпадения битов на входе и выходе РЛЗ, и счетчик подсчитывает количество совпадений. Когда оно превысит определенное число, ПУ принимается решение о наличии синхронизирующей (стартовой) последовательности. В случае если количество совпадений не превысит определенное число, с выхода РЛЗ на сумматор сигнал поступать не будет.

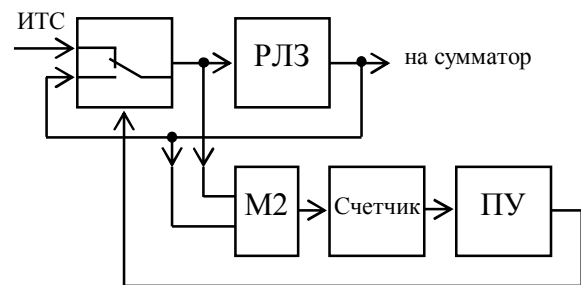


Рис. 2. Структурная схема устройства синхронизации

На приемной стороне необходимо решить две задачи, связанные с восстановлением информационного сообщения. Первая – детектирование принятого сигнала, вторая – преобразование детектированного сигнала в двоичный код.

Предполагается, что на сигнал в канале связи воздействует лишь шум наблюдения. Тогда принятый сигнал  $r_i$  описывается суммой переданного сигнала  $w_i$  и белого шума  $\xi_i$ :

$$r_i = w_i + \xi_i, \quad (1)$$

где  $i$  – количество отсчетов.

На приемной стороне (рис. 3) (после преобразования радиосигнала к виду удобному для корреляционной обработки в приемнике) принятый сигнал поступает на устройство обработки хаотического сигнала (рис. 3), где подается на корреляторы (Корр.). В корреляторах происходит перемножение принятого сигнала с эталонными сигналами, его накопление и сравнение.

Эталонные сигналы формируются в генераторе эталонных сигналов при помощи хаотического генератора (ХГ) и генератора гармонических колебаний ( $\Gamma f_0$ ). Далее эталонные сигналы приводятся к знакопеременному виду при помощи формирователей антиподных гармонических колебаний квадратурных каналов (ФИ +cos, ФИ -cos; ФИ +sin, ФИ -sin).

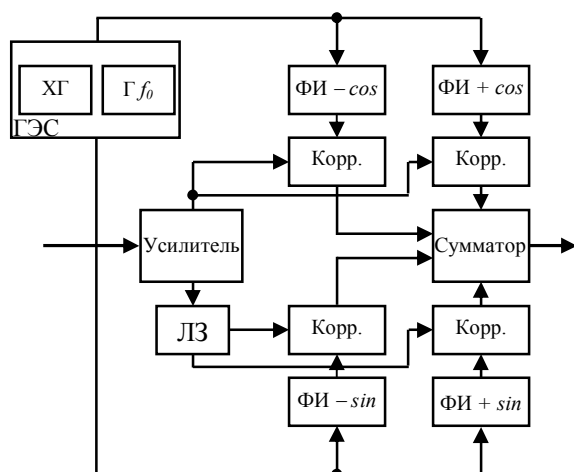


Рис. 3. Структурная схема устройства обработки хаотического MSK сигнала

В последующем в сумматоре происходит объединение составляющих информационного сообщения, и после преобразования в исходный вид – выдача данных получателю информации.

Для оценки качества выделения информационного сообщения была рассчитана вероятность (коэффициент) битовых ошибок (BER) [7], которая характеризует качество передачи информации. Этот коэффициент представляет собой количество ошибок, отнесенное к количеству переданных битов, при условии, что ошибки имеют характер стационарного случайного процесса. Для MSK-модуляции расчет BER производится по формуле [7]:

$$BER = \operatorname{erfc}\left(\sqrt{2E_b/N_0}\right), \quad (2)$$

где  $\operatorname{erfc}$  – обратная функция ошибок;  $\sqrt{E_b/N_0}$  – величина, зависящая от отношения мощности сигнала к спектральной плотности шума.

На рис. 4 приведена зависимость вероятности битовых ошибок от спектральной плотности мощности шума на бит информации  $E_b/N_0$ .

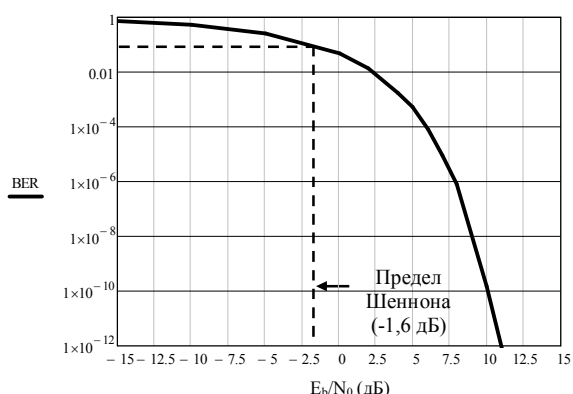


Рис. 4. Зависимость вероятности битовых ошибок от спектральной плотности мощности шума на бит информации

Анализ графика показывает, что вероятность битовых ошибок, возникающих при передаче ин-

формации путем применения хаотической MSK-модуляции, соизмерима с аналогичными зависимостями, полученными для бинарных систем передачи информации, использующих в качестве несущей гармонические колебания (BPSK, QPSK), приведенными в работе [7].

Проведем оценку выигрыша в повышении скрытности функционирования системы радиосвязи за счет применения хаотической MSK-модуляции.

Для анализа скрытности сигналов традиционно применяется  $\chi^2$ -статистика [1], которая учитывает энергетические показатели сигнала (такие как база сигнала и отношение сигнал/шум на входе приемника) и может быть оценена вероятностью правильного обнаружения в разведприемнике:

$$P_{\text{обн}} = 1 - \Phi\left[\frac{z_0 - (n + q)}{2n + 4q^{1/2}}\right], \quad (3)$$

где  $\Phi(z)$  – интеграл вероятности;  $n$  – число "степеней свободы" сигнала или приближенно его база  $B$ ;  $q$  – отношение сигнал/шум. Однако  $\chi^2$ -статистика не учитывает структуру сигнала в фазовом пространстве, что приводит к заниженной вероятности обнаружения не только хаотических, но и шумоподобных сигналов.

Более адекватную оценку скрытности сигналов в условиях полной априорной неопределенности (при радиоразведке) дает применение BDS-статистики (связанной с корреляционной размерностью наблюдаемого сигнала), которая учитывает дополнительные свойства сигналов (поведение "образа" сигнала в фазовом пространстве) и не опирается на вид распределения шума наблюдения [2]:

$$Q_{\text{BDS}} = \omega_{m,n}(\varepsilon) = \sqrt{n} \left[ \frac{C_{m,n}(\varepsilon) - C_{1,n}(\varepsilon)^m}{\sigma_{m,n}(\varepsilon)} \right], \quad (4)$$

где  $C_{m,n}(\varepsilon)$  – корреляционная размерность;  $m$  – размерность фазового пространства;  $n$  – количество наблюдений;  $\varepsilon$  – радиус гиперсферы;  $\sigma_{m,n}(\varepsilon)$  – стандартное отклонение.

В табл. 1 приведены результаты оценки скрытности сигналов, рассчитанные при помощи BDS-статистики (с применением выражения (4)).

Таблица 1  
Оценка скрытности сигналов (процессов) с применением BDS-статистики

№	Вид сигнала (процесса)	Значение BDS-статистики
1	Гармоническое колебание	$\gg 2000$
2	Хаотический сигнал (процесс)	$\gg 500$
3	Хаотический MSK модулированный сигнал	$\leq 1,96$
4	Шум наблюдения (белый шум)	$\leq 1,96$

Расчеты показывают, что значения BDS-теста для хаотического MSK-модулированного сигнала не превышают порогового значения 1,96, что свидетельствует об отсутствии закономерности в структуре сигнала, что позволяет классифицировать данный сигнал в фазовом пространстве как шум наблюдения.

### Выводы

Предложенный в работе метод передачи цифровой информации, который основан на применении хаотических MSK-модулированных сигналов, позволяет повысить скрытность функционирования системы радиосвязи за счет схожести статистических и динамических характеристик сигнала с характеристиками шума наблюдения.

Применение корреляционной обработки позволяет получателю сообщения выделить информацию при значительном уровне шума в канале связи.

Проведенный анализ качества выделения информационного сообщения ставит предложенный способ передачи информации в один ряд с традиционными бинарными системами передачи информации, использующими в качестве несущей гармонические колебания.

Таким образом, идея применения хаотических MSK-модулированных сигналов в качестве несущей теоретически может быть реализована в мобильных беспроводных комплексах широкополосной радиосвязи военного назначения, обладающих повышенной скрытностью, что, в свою очередь, является актуальным при создании единой интегрированной цифровой системы передачи данных.

### Список литературы

1. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами / Г.И. Тузов, В.А. Сивов, В.И. Прытков и др. – М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.
2. Использование BDS-статистики для оценки скрытности сигнала, полученного перемеживанием хаотической несущей / П.Ю. Костенко, К.С. Васюта, А.Н. Барсуков [и др.] // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2010. – № 5 (53). – С. 41-45.
3. Костенко П.Ю. Повышение скрытности сигналов на основе усложнения аттрактора хаотического процесса с использованием линейного преобразования с ядром Мандельброта / П.Ю. Костенко, К.С. Васюта, С.Н. Симоненко // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2010. – Т. 53, № 12. – С. 14-23.
4. Васюта К.С. Анализ эвристических моделей информационно-структурных систем на хаотической несущей / К.С. Васюта // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. – 2009. – № 156. – С. 172-177.
5. Васюта К.С. Метод передачи бинарного сообщения, основанный на манипуляции показателя Херста линейно-преобразованной хаотической последовательности / К.С. Васюта // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУ ПС, 2010. – Вип. 3(15). – С. 256-259.
6. Васюта К.С. Повышение скрытности хаотического сигнала путем применения MSK-модуляции / К.С. Васюта, С.В. Озеров, А.М. Королюк // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – Х.: ХУПС, 2013. – № 3(12). – С. 97-99.
7. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение; пер. с англ. / Б. Скляр. – М.: Издательский дом Вильямс, 2003. – 1104 с.
8. Величкин А.И. Средства связи и системы передачи данных для ВВС / А.И. Величкин, Г.С. Азаров, Ю.В. Саютин. – Изд ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1985. – 325 с.

Поступила в редколлегию 17.10.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.В. Лемешко, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

### ЗАСТОСУВАННЯ ХАОТИЧНОЇ MSK-МОДУЛЯЦІЇ ДЛЯ СКРИТОЇ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ В СИСТЕМІ РАДІОЗВ'ЯЗКУ

К.С. Васюта, С.В. Озеров, С.В. Яровий, В.П. Ясинецький, О.С. Мірошніченко

У роботі отримав розвиток метод підвищення секретності передачі цифрової інформації в системах радіозв'язку, який заснований на застосуванні хаотичних сигналів (процесів) для MSK-модуляції гармонічної несучої. Наведено структурну схему пристрою формування і обробки хаотичного MSK-сигналу. Проведено аналіз якості відновлення інформаційного повідомлення шляхом розрахунку ймовірності (коефіцієнта) бітових помилок який співмірний з такими ж коефіцієнтами, отриманими для бінарних систем передачі інформації що використовують в якості несучої гармонічні коливання. Проведена оцінка виграшу в підвищенні секретності інформаційного сигналу (за допомогою BDS-статистики). Показано, що такий спосіб передачі інформації підвищує секретність функціонування системи радіозв'язку за рахунок схожості статистичних та динамічних характеристик інформаційного сигналу з аналогічними характеристиками шуму спостереження (білого шуму).

**Ключові слова:** хаотичний сигнал, MSK-модуляція, фазовий портрет, ймовірність бітових помилок, секретність.

### THE USE OF CHAOTIC MSK-MODULATION SECURE DATA TRANSMISSION IN A RADIO COMMUNICATION SYSTEM

K.S. Vasyta, S.V. Ozerov, S.V. Yarovoy, V.P. Yasinecky, A.S. Miroshnichenko

The paper was developed a method for increasing stealth transmission of digital information in a wireless communication system that is based on the use of chaotic signals (processes) for MSK-harmonic modulation of the carrier. The block diagram of a receiver and a transmitter is shown. The analysis of the quality of the information message recovery by calculating the probability (rate) of bit errors are commensurate with the same coefficients obtained for binary data transmission systems using as a carrier harmonics. The estimation of the gain in increasing secrecy of the information signal (using the BDS-statistic). It is shown that this method of communication increases the stealth operation of radio systems due to the similarity of statistical and dynamic characteristics of an information signal with similar observation noise (white noise).

**Keywords:** chaotic signal, MSK-modulation, phase portrait, the probability of bit error rate, stealth.