

ОЦЕНКА СКРЫТНОСТИ OFDM-СИГНАЛОВ, ОСНОВАННЫХ НА BPSK МОДУЛЯЦИИ, С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ

DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-9-13-19

Manuscript received 12 July 2022;
Accepted 04 August 2022

Гавришев Алексей Андреевич,
ФГАОУ ВО "НИЯУ "МИФИ", Москва, Россия,
alexxx.2008@inbox.ru

Осипов Дмитрий Леонидович,
ФГАОУ ВО "СКФУ", г. Ставрополь, Россия,
dmtrosipov@ya.ru

Ключевые слова: беспроводные системы безопасности, OFDM-сигналы, BPSK модуляция, скрытность, нелинейная динамика

В данной статье проведена оценка скрытности сигналов, основанных на технологии ортогонального частотного дискретного мультиплексирования (OFDM-сигналы) и BPSK модуляции, с помощью статистических методов оценки скрытности, представленных методами нелинейной динамики (показатель Херста и BDS-статистика). В результате проведенных исследований установлено, что OFDM-сигналы, основанные на BPSK модуляции, в целом обладают недостаточной скрытностью, так как могут обнаруживаться с помощью показателя Херста и BDS-статистики. Показаны особенности исследований с помощью показателя Херста и BDS-статистики OFDM-сигналов, основанных на BPSK модуляции. Среди таких особенностей следует отметить, что с увеличением количества поднесущих увеличивается и значения показателя Херста и BDS-статистики, в частности, значение показателя Херста приближается к значениям, соответствующим понятию белого шума, а значение BDS-статистики приближается к значениям, указывающим на то, что OFDM-сигналы с большим количеством поднесущих потенциально возможно отнести к хаотическим сигналам. Из приведенных результатов видно, что с увеличением количества поднесущих OFDM-сигналов происходит некоторое усложнение структуры передаваемых сигналов, которое, однако, не приводит к повышению скрытности. Полученные результаты совпадают с известными исследованиями из данной области, в которых показано, что технология OFDM, основанная на методах модуляции с гармонической несущей, не обеспечивает скрытность передачи данных. Кратко описаны дальнейшие направления исследований по оценке скрытности OFDM-сигналов с помощью методов нелинейной динамики, в частности, исследование OFDM-сигналов с другими видами модуляции и различным числом поднесущих, а также исследование OFDM-сигналов, в которых используются дополнительные методы повышения скрытности.

Информация об авторах:

Гавришев Алексей Андреевич, магистрант, ФГАОУ ВО "НИЯУ "МИФИ", Москва, Россия

Осипов Дмитрий Леонидович, к.т.н., доцент, ФГАОУ ВО "СКФУ", г. Ставрополь, Россия

Для цитирования:

Гавришев А.А., Осипов Д.Л. Оценка скрытности OFDM-сигналов, основанных на BPSK модуляции, с помощью методов нелинейной динамики // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Том 16. №9. С. 13-19.

For citation:

Gavrishev A.A., Osipov D.L. (2022) Evaluation of the stealth of OFDM-signals based on BPSK modulation, using nonlinear dynamics methods. T-Comm, vol. 16, no.9, pp. 13-19. (in Russian)

Введение

В настоящее время радиоканалы широко используются для передачи служебных и тревожных сообщений в системах различного назначения, например в беспроводных системах безопасности [1-4]. Одной из самых популярных радиотехнологий, нашедшей применение в таких системах, является технология ортогонального частотного дискретного мультиплексирования (Orthogonal frequency-division multiplexing – OFDM). OFDM-сигнал $s(t)$ в общем виде представляет собой сумму N парциальных гармонических сигналов, ортогональных в усиленном смысле на тактовом интервале длительностью T [5-13]:

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_m^{N-1} \alpha_m \exp(j2\pi f_m t). \quad (1)$$

В выражении (1) $f_m = m/T$, $m=0, 1, \dots, N-1$; символы α_m объемом J^N задаются сигнальным созвездием и входной информационной последовательностью L . Для созвездия с BPSK модуляцией $J=2$, $L=N$.

Технология OFDM, описываемая выражением (1), используется в системах охранно-пожарной сигнализации [3], в специальной робототехнике [4] и во многих других практических приложениях. Более подробное описание технологии OFDM приведено в многочисленных публикациях [5-13]. С помощью технологии OFDM, в соответствии с [5-13], возможна организация надежной передачи информации по каналам с многолучевым распространением, обуславливающим частотно-селективные замирания сигналов и межсимвольную интерференцию.

Однако известно [1, 2, 14], что беспроводные каналы связи систем безопасности подвержены преднамеренным деструктивным воздействиям, направленным на нарушение их работоспособности. Анализ деструктивных воздействий для систем безопасности, проведенный в работах [1, 2, 14], показывает, что наиболее распространенными деструктивными воздействиями для них являются перехват, подмена и радиоэлектронное подавление трафика, передаваемого по беспроводным каналам связи. Таким образом, актуальным становится решение задачи оценки скрытности передачи данных в системах безопасности при использовании технологии OFDM. Однако в данной области вопросы оценки скрытности технологии OFDM проработаны недостаточно полно.

Известно [7, 10, 12, 13, 15-25], что скрытность передачи данных в системах радиосвязи возможно оценить двумя методами: аналитическими и статистическими. В широком перечне работ [7, 10, 12, 13, 15-20], на основе аналитических методов оценки скрытности, показано, что технология OFDM, основанная на стандартных методах формирования таких сигналов, не обеспечивает скрытность передачи данных и требует использования дополнительных методов обеспечения скрытности.

В работах [21, 22], на основе статистических оценок скрытности, показано, что технология OFDM, основанная на стандартных методах формирования таких сигналов, обладает положительным максимальным показателем Ляпунова передаваемых сигналов. В соответствии с работами [23-25], можно утверждать, что технология OFDM, основанная на стандартных методах формирования таких сигналов, обладает свойствами хаотичности и потенциально обеспечивает

приемлемую скрытность передачи данных. Так же в работах [26, 27] проанализированы возможности использования технологии OFDM, основанной на методах модуляции с гармонической несущей, для организации скрытной радиосвязи. Проведенные исследования показали [26, 27], что структура таких сигналов близка к структуре регулярных процессов. Дана оценка скрытности таких сигналов с помощью BDS-статистики для количества поднесущих $n \leq 64$. Установлено, что значение BDS-статистики зависит от количества поднесущих и в перспективе позволяет обнаружить такие сигналы, что указывает на недостаточную скрытность сигналов такого вида.

Также отметим работы [28, 29], в которых на основе проведенных исследований установлено, что технология OFDM, основанная на стандартных методах формирования таких сигналов, является близкой к узкополосному шуму и в перспективе позволяет обеспечить некоторый уровень скрытности передаваемых сигналов. Как видно из проведенных данных, в целом технология OFDM, основанная на стандартных методах формирования таких сигналов, не в полной мере позволяет обеспечить скрытность передаваемых сигналов.

Исходя из сказанного, необходимо провести дальнейшие исследования технологии OFDM, основанной на стандартных методах формирования таких сигналов, с помощью статистических методов оценки скрытности, чтобы дополнить и расширить знания об оценке скрытности технологии OFDM на основе статистических оценок скрытности.

Целью данной работы является оценка скрытности технологии OFDM, основанной на стандартных методах формирования таких сигналов, на примере OFDM-сигналов с BPSK модуляцией, с помощью статистических методов оценки скрытности на основе нелинейной динамики.

Основные результаты исследований

Известно [5-13, 26-30], что одним из самых распространенных методов формирования OFDM-сигналов является использование выражения (1) совместно с BPSK модуляцией. Исходя из этого, далее проведем моделирование OFDM-сигналов с BPSK модуляцией с различным числом поднесущих. Моделирование осуществим с помощью программы OFDM Calculator-Generator. При моделировании воспользуемся рекомендациями из работ [26-30].

В таблице 1 приведены примеры временных диаграмм полученных OFDM-сигналов с BPSK модуляцией с различным количеством поднесущих.

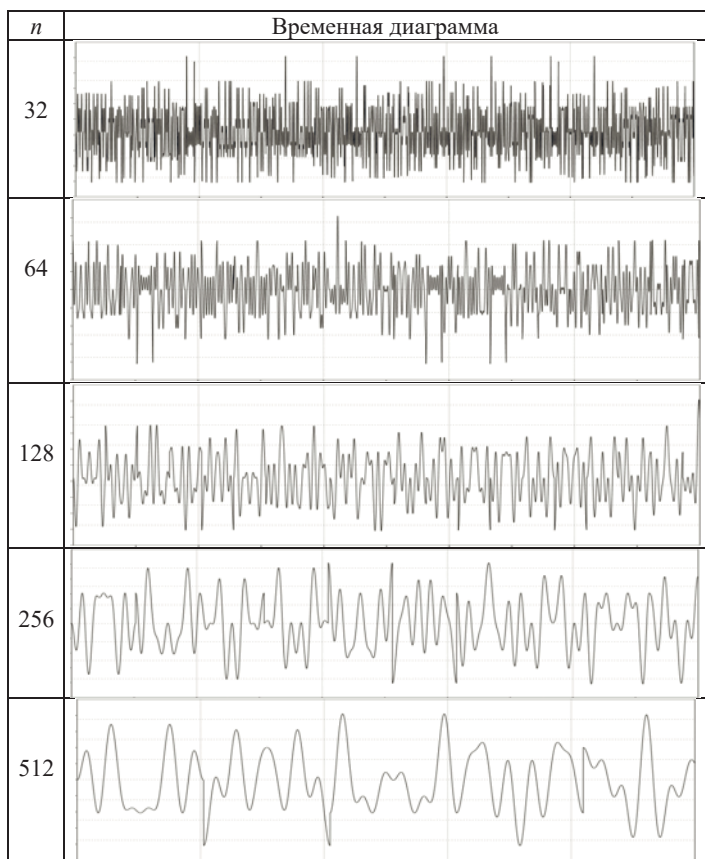
Как видно из таблицы 1, некоторые OFDM-сигналы, основанные BPSK модуляции, имеют вид, схожий с шумами. Кроме того заметно, что OFDM-сигналы с различным количеством поднесущих обладают разнообразными формами временных диаграмм, что может указывать на сложную структуру передаваемых сигналов.

Проведем оценку скрытности OFDM-сигналов, основанных на BPSK модуляции, с помощью статистических методов оценки на основе нелинейной динамики.

Воспользуемся для этих целей подходами на основе нелинейной динамики, являющимися аналогами энергетической скрытности [26, 27, 31-37]: показателем Херста H и BDS-статистикой $\bar{w}(\varepsilon)$.

Таблица 1

Примеры временных диаграмм полученных OFDM-сигналов



Показатель Хёрста H позволяет разделить между собой периодические и случайные процессы. Показатель Хёрста H описывается выражением (2):

$$R / S = (\tau / 2)^H, \quad (2)$$

где R – нормированный размах вариации (разность максимального и минимального значений измеряемого параметра), S – стандартное отклонение (корень квадратный от дисперсии), τ – период (длина ряда) наблюдений.

Значения показателя Хёрста $0 < H < 0.5$ типичны для так называемых антиперсистентных процессов (эргодические ряды), значения $0.5 < H < 1$ характерны для систем, в которых имеется та или иная форма упорядоченности, а значение $H \approx 0.5$ соответствует понятию белого шума [32-34, 37].

Понятие BDS-статистики базируется на статистических свойствах корреляционной размерности исследуемого процесса в фазовом пространстве, которая в свою очередь определяется корреляционным интегралом. Эти данные дают больше информации о классе процесса (случайные, хаотические, регулярные), чем энергетические показатели [26, 27, 31, 35-37].

BDS-статистика основана на статистической величине $w(\bar{x})$, описываемой формулой (3):

$$w_{m,N}(\varepsilon) = \sqrt{N-m+1} \frac{C_{m,N}(\varepsilon) - C_{1,N-m}(\varepsilon)^m}{\sigma_{m,N}(\varepsilon)}, \quad (3)$$

где $C_{m,N}(\varepsilon)$ и $C_{1,N-m}(\varepsilon)$ – корреляционные интегралы, а $\sigma_{m,N}(\varepsilon)$ – среднеквадратическое отклонение.

Задача анализа передаваемого сигнала рассматривается как непараметрическая проверка одной из гипотез: H_0 – наблюдаемые данные $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ независимы и одинаково распределены (белый шум) и H_1 – данные не относятся к белому шуму, что возможно в случае, когда они являются смесью шума и сигнала. В качестве теста на достоверность гипотезы H_0 об отсутствии в наблюдении передаваемого сигнала принимается выполнение неравенства $w_{m,N}(\varepsilon) \leq |1.96|$, для значения статистики $w_{m,N}(\varepsilon)$, что соответствует уровню значимости $\alpha = 0.05$, тогда с 95% вероятностью можно принять гипотезу H_0 (белый шум). В отсутствии шумов наблюдения применение критерия значимости к статистике $w_{m,N}(\varepsilon)$ позволяет эффективно решать задачу по классификации наблюдений ($w_{m,N}(\varepsilon) \leq |1.96|$) [26, 27, 31, 35-37].

Вместе с тем, в работах [21, 22, 26, 27] использование указанных методов нелинейной динамики для исследования скрытности OFDM-сигналов, основанных на BPSK модуляции, встречается относительно редко. Исходя из этого, проведем с их помощью оценку скрытности OFDM-сигналов, основанных на BPSK модуляции. Для исследований было отобрано 50 временных реализаций OFDM-сигналов, основанных на BPSK модуляции. Вначале проведем оценку скрытности OFDM-сигналов, основанных на BPSK модуляции, с помощью показателя Хёрста H .

В результате вычислений с помощью программы Fractan, для исследуемых сигналов при длине 5000 с различным количеством поднесущих были получены значения показателя Хёрста, приведенные в таблице 2.

Таблица 2

Значение показателя Хёрста H для OFDM-сигналов, основанных на BPSK модуляции

Вид модуляции	Количество поднесущих, n	Значение показателя Хёрста, H
BPSK	32	$\approx 0.06 \div 0.10$
	64	$\approx 0.11 \div 0.15$
	128	$\approx 0.18 \div 0.26$
	256	$\approx 0.32 \div 0.37$
	512	$\approx 0.48 \div 0.54$

Полученные результаты (табл. 2), в соответствии с работами [27-29, 37], указывают на то, что OFDM-сигналы, основанные на BPSK модуляции, в целом обладают недостаточной скрытностью, так как могут обнаруживаться с помощью показателя Хёрста, описываемого выражением (2). При этом следует заметить, что с увеличением количества поднесущих увеличивается и значение показателя Хёрста, приближаясь к значению 0.5, соответствующего понятию белого шума (достигая его для количества поднесущих $n=512$), то есть происходит некоторое усложнение структуры передаваемых сигналов, которое, однако, не приводит к повышению скрытности.

Указанная особенность, согласно проведенным исследованиям, наблюдается при значении количества поднесущих $256 \leq n \leq 512$. Указанные результаты в целом согласуются с известными исследованиями [7, 10, 12, 13, 15-22, 26, 27].

Далее проведем оценку скрытности OFDM-сигналов, основанных на BPSK модуляции, с помощью BDS-статистики $\bar{w}(\varepsilon)$, описываемой выражением (3). В результате вычислений с помощью программы Eviews Student Version Lite, для исследуемых сигналов при длине 5000 с различным количеством поднесущих были получены значения BDS-статистики, приведенные в таблице 3.

Таблица 3

Значение BDS-статистики $\bar{w}(\varepsilon)$ для OFDM-сигналов, основанных на BPSK модуляции

Вид модуляции	Количество поднесущих, n	Значение BDS-статистики, $\bar{w}(\varepsilon)$
BPSK	32	$\approx 155 \div 171$
	64	$\approx 200 \div 245$
	128	$\approx 257 \div 287$
	256	$\approx 294 \div 330$
	512	$\approx 350 \div 380$

Полученные результаты (табл. 3), в соответствии с работами [26, 27, 32, 35, 37], указывают на то, что OFDM-сигналы, основанные на BPSK модуляции, в целом так же обладают недостаточной скрытностью, так как потенциально обнаруживаются с помощью BDS-статистики, описываемой выражением (3). Проведенные исследования показывают, что количество поднесущих также влияет на значение BDS-статистики: с увеличением количества поднесущих увеличивается и BDS-статистика. Так, значение BDS-статистики для количества поднесущих $64 \leq n \leq 512$, находящееся в диапазоне [200÷380], в соответствии с известными исследованиями [31, 35, 37], указывает на то, что OFDM-сигналы с большим количеством поднесущих потенциально возможно отнести к хаотическим сигналам. То есть возможно сказать, что происходит некоторое усложнение их структуры, которое, однако, не приводит к повышению скрытности.

Полученные результаты согласуются с известными исследованиями. В частности, значения BDS-статистики для количества поднесущих $n=32$ и $n=64$, находящиеся в диапазоне [155÷171] и [200÷245], расположены достаточно близко со значениями BDS-статистики, полученными в работах [26, 27] для такого же количества поднесущих и равными соответственно 188 и 278.

Таким образом, можно заключить, что OFDM-сигналы, основанные на BPSK модуляции, в целом обладают недостаточной скрытностью, так как, при соответствующей адаптации, их возможно обнаружить с помощью показателя Херста и BDS-статистики, что согласуется с известными исследованиями.

Заключение

В статье проведена оценка скрытности технологии OFDM, основанной на BPSK модуляцией, с помощью статистических методов оценки скрытности на основе нелинейной

динамики. В результате проведенных исследований установлено, что:

1) OFDM-сигналы, основанные на BPSK модуляции, обладают значением показателя Херста, примерно находящимся в диапазоне [0.06÷0.54]. Это указывает на то [32, 33, 34, 37], что OFDM-сигналы, основанные на BPSK модуляции, в целом обладают недостаточной скрытностью, так как могут обнаруживаться с помощью показателя Херста, что согласуется с известными исследованиями [7, 10, 12, 13, 15-20, 26, 27];

2) OFDM-сигналы, основанные на BPSK модуляции, обладают значениями BDS-статистики, примерно находящимися в диапазоне [155÷380]. Это указывает на то [26, 27, 31, 35, 37], что OFDM-сигналы, основанные на BPSK модуляции, так же в целом обладают недостаточной скрытностью, так как могут обнаруживаться с помощью BDS-статистики, что согласуется с известными исследованиями [7, 10, 12, 13, 15-20, 26, 27];

3) показано, что с увеличением количества поднесущих увеличивается значение показателя Херста, приближаясь к значению 0.5 (достигая его для количества поднесущих $n=512$), соответствующего понятию белого шума, и увеличивается значение BDS-статистики, приближаясь к диапазону [155÷380], что соответствует понятию хаотических сигналов (достигая его для количества поднесущих $64 \leq n \leq 512$). То есть возможно сказать, что происходит некоторое усложнение структуры передаваемых сигналов, которое, однако, не приводит к повышению скрытности. Полученные результаты согласуются с известными исследованиями [7, 10, 12, 13, 15-20, 26, 27];

Дальнейший научный и практический интерес представляет оценка скрытности OFDM-сигналов, основанных на стандартных методах формирования таких сигналов, с другими видами модуляции и различным числом поднесущих (например, амплитудная или частотная модуляция), а также исследование OFDM-сигналов, в которых используются дополнительные методы повышения скрытности (использование шумоподобных сигналов и псевдослучайной перестройки рабочей частоты, увеличение количества кодовых последовательностей и других). Кроме того, полученные результаты, при соответствующей адаптации, могут позволить использовать методы нелинейной динамики для решения следующих задач: обнаружение OFDM-сигналов, основанных на стандартных методах формирования таких сигналов; классификация количества поднесущих; оценка их скрытности и др.

Литература

1. Брауде-Золотарёв Ю. Алгоритмы безопасности радиоканалов // Алгоритм безопасности. 2013. № 1. С. 64-66.
2. Гавришев А.А., Жук А.П., Осипов Д.Л. Анализ технологий защиты радиоканала охранно-пожарных сигнализаций от несанкционированного доступа // Труды СПИИРАН. 2016. Вып. 4 (47). С. 28-45. DOI: 10.15622/sp.47.2.
3. Методические рекомендации Р 061-2017 «Применение современных видов модуляции и организация обмена информацией в радиоканальных системах передачи извещений». М: НИЦ «Охрана», 2017. 45 с.
4. Гугалов К. Оборудование беспроводной передачи информации для наземных робототехнических комплексов // Технологии и средства связи. 2013. № 3. С. 14-15.

5. Назаров Л.Е., Зудилин А.С. Алгоритмы нелинейной помехоустойчивой обработки при приеме сигнальных конструкций на основе OFDM-сигналов // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 3. 14 с. DOI: 10.30898/1684-1719.2020.3.2.
6. Гришин И.В., Калинин А.А. Обзор методов многочастотной модуляции сигналов в современных сетях беспроводной связи // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Т. 8. № 2. С. 55-66. DOI: 10.31854/2307-1303-2020-8-2-55-66.
7. Жидяев А.В., Копысов А.Н., Богданов А.А., Савельев А.В., Никитин М.Л. Исследование энергетических характеристик сигналов, применяемых для передачи данных по декаметровому каналу // Вестник ИЖГТУ им. М.Т. Калашникова. 2015. Т. 18. № 3. С. 85-88.
8. Киселев А.М., Махотин В.В., Рыжов Н.Ю., Шаталова Г.В. Способ реализации высокоскоростного параллельного модема // Техника радиосвязи. 2006. № 11. С. 5-15.
9. Костин А.А., Костин В.А., Хомкин А.А., Гордич А.Н. Способ распознавания радиосигналов // Патент РФ на изобретение № 2613733 от 21.03.2017.
10. Дулькейт И.В., Хазан В.Л., Землянов И.С., Юрьев А.Н. Частотно-временная синхронизация для низкоэнергетических радиолиний, использующих модемы с OFDM // Омский научный вестник. 2017. № 1(151). С. 74-79.
11. Хазан В.Л., Дулькейт И.В., Землянов И.С., Чащин Е.А. Методы повышения скорости передачи данных в системах коротковолновой радиосвязи // Динамика систем, механизмов и машин. 2014. № 4. С. 59-65.
12. Землянов И.С. Модемы с ортогональными поднесущими мобильных систем коротковолновой связи с адаптацией к условиям распространения радиоволн // Диссертация ... к. т. н. Омск, 2016. 183 С.
13. Богатырев Е.В. Разработка и исследование модемов помехозащищенных станций спутниковой и тропосферной связи // Диссертация ... к. т. н. Красноярск, 2018. 179 с.
14. Членов А.Н., Рябцев Н.А., Федин А.Н. Анализ способов нейтрализации тревожной сигнализации систем охраны категорированных объектов // Технологии техносферной безопасности. 2017. № 3 (73). С. 271-279.
15. Кувшинов О.В., Шишацкий А.В., Лютов В.В., Жук О.Г. Аналіз шляхів підвищення скритності ширококуглових систем військового радіозв'язку // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. 2017. № 1(50). С. 24-28.
16. Агиевич С.Н., Пономарев А.А., Коробкин Д.И. Применение функций сплайн-Понтрягина-Виленкина-Крестенсона при формировании сигналов OFDM // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 6. С. 194-198.
17. Агиевич С.Н., Пономарев А.А., Смирнов А.А. Модель радиосигнала OFDM на основе функций сплайн-Понтрягина-Виленкина-Крестенсона для скрытого коммуникационного взаимодействия // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2011. № 4. С. 7-9.
18. Бабинцев Е.С., Лянгузов К.А. Структурная скрытность сложного сигнала с ППРЧ // Вестник ИЖГТУ им. М.Т. Калашникова. 2007. № 3. С. 57-58.
19. Ганшин Д.Г., Дудка А.А., Битченко А.Н., Цона А.И. Анализ структурной скрытности многочастотных сигналов широкополосных систем связи // Радиотехника. 2016. В. 184. С. 133-142.
20. Евстигнеев А.С. Анализ помехозащищенных протоколов, использующих OFDM-технологии // I-methods. 2014. Т. 6. № 3. С. 14-16.
21. Yoothana Suansook, Kitti Paithoonwattanakij Chaos in Orthogonal Frequency Division Multiplexing Technique // International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering. Thailand. 2008. Pp. 457-461. DOI: 10.1109/ICASTE.2008.172.
22. Yoothana Suansook, Kitti Paithoonwattanakij Bifurcation and Lyapunov Exponent in Orthogonal Frequency Division Multiplexing // International Conference on Computational Cybernetics. Slovakia. 2008. Pp. 107-112. DOI: 10.1109/ICCCYB.2008.4721388.
23. Kehui Sun Chaotic Secure Communication: Principles and Technologies. Tsinghua University Press and Walter de Gruyter GmbH, 2016, 333 p.
24. Сиващенко С.И. Скрытность радиосистем со сложными и хаотическими сигналами // Системы управління, навігації та зв'язку. 2009. № 3(11). С. 56-58.
25. Гавришнев А.А. К вопросу о взаимосвязи оценок защищенности (на примере беспроводных охранно-пожарных систем) // Прикладная информатика. 2020. Т. 15. № 2 (86). С. 63-73. DOI: 10.37791/2687-0649-2020-15-2-63-73.
26. Vasiuta K., Zbezhkowska U., Slobodyanuk V., Kovalchuk O. Stealth Evaluation of the OFDM Communication System // 2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T). 2020. P. 363-367. DOI: 10.1109/PICST51311.2020.9468046.
27. Васюта К.С., Збежховська У.Р., Слободянюк В.В., Захарченко І.В., О.Л. Кацішин, Дубинський М.С., Рябуха Ю.М., Коваль О.В. Метод підвищення скритності систем передачі інформації на основі модуляції з ортогональним частотним розділенням і мультиплексуванням хаотичних піднесучих // Radioelectronic and Computer Systems. 2021. № 3(99). С. 79-93. DOI: 10.32620/reks.2021.3.07.
28. Козел В.М., Подворная Д.А., Ковалёв К.А. Пик-фактор сигналов систем сухопутной подвижной службы 5G // Доклады БГУИР. 2020. № 18(6). С. 5-10. DOI: 10.35596/1729-7648-2020-18-6-5-10.
29. Shin kov Y.S. Power spectral density of interference caused by nonlinear distortions in devices with amplitude-phase conversion // Journal of Communications Technology and Electronics. 2013. V. 58. No. 10. Pp. 1024-1034. DOI 10.1134/S106422691310001X.
30. Diponkor Bala, Shahabub Alam, Nazrul Islam, Ibrahim Abdullah, Mohammad Alamgir Hossain Analysis the Performance of OFDM Using BPSK, QPSK, 64-QAM, 128-QAM & 256-QAM Modulation Techniques // Journal of Electrical Engineering, Electronics, Control and Computer Science. 2021. V. 7. I. 24. P. 31-38.
31. Васюта К.С. Классификация процессов в инфокоммуникационных радиотехнических системах с применением BDS-статистики // Проблемы телекоммуникаций. 2012. № 4(90). С. 63-71.
32. Кузовников А.В., Семкин П.В. Способ обнаружения случайных низкоэнергетических сигналов // Патент РФ на изобретение № 2511598 от 10.04.2014.
33. Гавришнев А.А., Жук А.П. Применение методов нелинейной динамики для исследования хаотичности сигналов-переносчиков защищенных систем связи на основе динамического хаоса // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. 2018. Т. 16. № 1. С. 50-60. DOI: 10.25205/1818-7900-2018-16-1-50-60.
34. Гавришнев А.А. Моделирование системы связи с простыми сигналами и ее экспериментальный анализ // Вестник НЦБЖД. 2019. № 2 (40). С. 151-156.
35. Гавришнев А.А., Жук А.П. Применение программы Eviews для анализа защищенных систем связи на основе хаотических сигналов на основе BDS-статистики // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12. № 11. С. 43-50. DOI: 10.24411/2072-8735-2018-10175.
36. Альтман Е.А., Малютин А.Г., Чижма С.Н. Повышение скрытности шумоподобных сигналов в системах радиосвязи // Сборник докладов II Международной научно-технической конференции «Радиотехника, электроника и связь («РЭИС-2013»»). Омск: ОАО «ОНИИП». 2013. С. 329-337.
37. Гавришнев А.А. Моделирование и количественно-качественный анализ распространенных защищенных систем связи // Прикладная информатика. 2018. Т. 13. № 5 (77). С. 84-122.

EVALUATION OF THE STEALTH OF OFDM-SIGNALS BASED ON BPSK MODULATION, USING NONLINEAR DYNAMICS METHODS

Aleksei A. Gavrishchev, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia, alexxx.2008@inbox.ru

Dmitrii L. Osipov, North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia, dmtrosipov@ya.ru

Abstract

This article evaluates the stealth of signals based on the technology of orthogonal frequency discrete multiplexing (OFDM-signals) and BPSK modulation, using statistical methods for assessing stealth, represented by methods of nonlinear dynamics (Hurst exponent and BDS-statistics). As a result of the conducted studies, it was found that OFDM-signals based on BPSK modulation, in general, have insufficient stealth, since they can be detected using the Hurst exponent and BDS-statistics. The features of research using the Hurst exponent and BDS-statistics of OFDM-signals based on BPSK modulation are shown. Among such features, it should be noted that with an increase in the number of subcarriers, the values of the Hurst exponent and BDS-statistics also increase, in particular, the value of the Hurst exponent approaches values corresponding to the concept of white noise, and the value of BDS-statistics approaches values indicating that OFDM-signals with a large number of subcarriers can potentially be attributed to chaotic signals. From the above results, it can be seen that with an increase in the number of subcarriers OFDM-signals, some complication of the structure of the transmitted signals occurs, which, however, does not lead to an increase of stealth. The results obtained coincide with well-known studies from this field, which show that OFDM technology based on harmonic carrier modulation methods does not provide data transmission stealth. Further directions of research on the evaluation of the stealth of OFDM-signals using nonlinear dynamics methods are briefly described, in particular, the study of OFDM-signals with other types of modulation and a different number of subcarriers, as well as the study of OFDM-signals, which use additional methods to increase stealth.

Keywords: wireless security systems, OFDM-signals, BPSK modulation, stealth, nonlinear dynamics.

References

1. Braude-Zolotarev Yu. (2013). Safety radio's algorithms. *Safety Algorithm*. No. 1. Pp. 64-66. (in Russian).
2. Gavrishchev A.A., Zhuk A.P., Osipov D.L. (2016). Analysis of protection technologies radio fire alarm systems against unauthorized access. *SPIIRAS Proceedings*. No. 4 (47), pp. 28-45. DOI: 10.15622/sp.47.2. (in Russian)
3. Guidelines R 061-2017 "The Use of modern modulation types and the organization of exchange of information in radio systems the transmission. Moscow. FKU NIC "Ohrana" Rosgvardii Publ. 2017. 45 p. (In Russian)
4. Gugalov K. (2013). Equipment wireless data transmission for terrestrial robotic systems. *Tehnologii i sredstva svyazi - Communication Technologies & Equipment*. No. 3, pp. 14-15. (In Russian)
5. Nazarov L.E., Zudilin A.S. (2020). Algorithms of nonlinear noise-immune processing for receiving OFDM-signal constructions. *Journal of Radio Electronics*. No. 3. 14 p. DOI: 10.30898/1684-1719.2020.3.2 (In Russian)
6. Grishin I., Kalinkina A. (2020). Review of the multicarrier modulation techniques used in modern wireless communications. *Telecom IT*. Vol. 8, no. 2, pp. 55-66. DOI: 10.31854/2307-1303-2020-8-2-55-66 (In Russian)
7. Zhidyaev A.V., Kopysov A.N., Bogdanov A.A., Savelyev A.V., Nikitin M.L. (2015). Research of energy characteristics of signals for data transmission over high frequency channel. *Vestnik IzhGTU im. M.T. Kalashnikova*. V. 18. No. 3, pp. 85-88. (In Russian)
8. Kiselev A.M., Mahotin V.V., Ryzhov N.J., Shatalova G.V. (2006). Method for implementing a high-speed parallel modem. *Tehnika radiosvyazi*. No. 11, pp. 5-15. (In Russian)
9. Kostin A.A., Kostin V.A., Khomkin A.A., Gordich A.N. (2017). Method for recognizing radio signals. Patent RF, no. 2613733.
10. Dulkeit I.V., Khazan V.L., Zemlyanov I.S., Yurev A.N. (2017). Time-frequency synchronization for highly reliable modem with OFDM. *Omsk Scientific Bulletin*. No. 1(151), pp. 74-79. (In Russian)
11. Hazan V.L., Dulkeit I.V., Zemlyanov I.S., Chaschine E.A. (2014). Method soft data speed in creasein shortwavecommunication system. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*. No. 4, pp. 59-65. (In Russian)
12. Zemlyanov I.S. (2016). Modems with orthogonal subcarriers of mobile short-wave communication systems with adaptation to radio wave propagation conditions. PhD. eng. sci. diss. Omsk. 183 p. (In Russian)
13. Bogatyrev E.V. (2018). Development and research of modems of noise-protected satellite and tropospheric communication stations. PhD. eng. sci. diss. Krasnojarsk. 179 p. (In Russian)
14. Chlenov A.N., Ryabtsev N.A., Fedin A.N. (2017). Analysis of methods of neutralizing alarm protection systems categorized objects. *Technology of Technosphere Safety*. No. 3 (73), pp. 271-279. (in Russian)
15. Kuvshynov O.V., Shyshatskyi A.V., Liutov V.V., Zhuk O.H. (2017). Analysis of ways to enhance stealth broadband systems military radio. Scientific Works of Kharkiv National Air Force University. No. 1(50). Pp. 24-28. (In Ukrainian).
16. Agievich S.N., Ponomarev A.A., Korobkin D.I. (2011). Application of functions Spline-Pontryagin-Vilenkin-Christenson in the formation OFDM signals. *The bulletin of Voronezh state technical university*. Vol. 7. No. 6, pp. 194-198 (In Russian)

17. Agievich S.N., Ponomarev A.A., Smirnov A.A. (2011). Radio signal model OFDM generated in Spline-Pontryagin-Vilenkin-Christenson functions bases for reserved infocommunication interaction providing. *Computing, Telecommunication and Control* (St. Petersburg Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems). No. 4, pp. 7-9. (In Russian)
18. Babincev E.S., Ljanguzov K.A. (2007). Structural stealth of a complex signal with FHSS. *Vestnik IzhGTU*. No. 3, pp. 57-58. (In Russian)
19. Ganshin D.G., Dudka A.A., Bitchenko A.N., Copa A.I. (2016). Analysis of structural stealth of multi-frequency signals of broadband communication systems. *Radiotekhnika*. I. 184, pp. 133-142. (In Russian)
20. Evstigneev A.S. (2014). Analysis of interference-tolerant protocols that use OFDM technology. *I-methods*. Vol. 6. No. 3, pp. 14-16. (In Russian)
21. Yoothana Suansook, Kitti Paithoonwattanakij (2008). Chaos in Orthogonal Frequency Division Multiplexing Technique. *International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering*. Thailand, pp. 457-461. DOI: 10.1109/ICACTE.2008.172
22. Yoothana Suansook, Kitti Paithoonwattanakij (2008). Bifurcation and Lyapunov Exponent in Orthogonal Frequency Division Multiplexing. *International Conference on Computational Cybernetics*. Slovakia, pp. 107-112. DOI: 10.1109/ICCCYB.2008.4721388
23. Kehui Sun (2016). *Chaotic Secure Communication: Principles and Technologies*. Tsinghua University Press and Walter de Gruyter GmbH. 333 p.
24. Sivashchenko S.I. (2009). Secrecy of radio system with difficult and chaotic signals. *Systems of control, navigation and communication*. No. 3(11), pp. 56-58 (in Russian)
25. Gavrishev A.A. (2020). On the question of the relationship of security assessments (for example, wireless fire alarm systems). *Journal of Applied Informatics*. Vol. 15. No. 2 (86), pp. 63-73. DOI: 10.37791/2687-0649-2020-15-2-63-73. (In Russian)
26. Vasiuta K., Zbezhkowska U., Slobodyanuk V., Kovalchuk O. (2020). Stealth Evaluation of the OFDM Communication System. *IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, pp. 363-367. DOI: 10.1109/PICST51311.2020.9468046
27. Vasiuta K., Zbezhkowska U., Slobodyanuk V., Zakharchenko I., Kashchysyn O., Dubinsky M., Ryabukha Y., Koval O. (2021). The method of increasing the stealthiness of information transmission systems based on modulating with Orthogonal Frequency Division and Multiplexing of chaotic subcarriers. *Radioelectronic and Computer Systems*. No. 3(99), pp. 79-93. DOI: 10.32620/reks.2021.3.07
28. Kozel V.M., Podvornaya D.A., Kovalev K.A. (2020). Peak factor of signals of 5G mobile service systems. *Doklady BGUIR*. No. 18(6), pp. 5-10. DOI: 10.35596/1729-7648-2020-18-6-5-10 (In Russian)
29. Shinakov Y.S. (2013). Power spectral density of interference caused by nonlinear distortions in devices with amplitude-phase conversion. *Journal of Communications Technology and Electronics*. Vol. 58. No. 10, pp. 1024-1034. DOI 10.1134/S106422691310001X
30. Diponkor Bala, Shahabub Alam, Nazrul Islam, Ibrahim Abdullah, Mohammad Alamgir Hossain (2021). Analysis the Performance of OFDM Using BPSK, QPSK, 64-QAM, 128-QAM & 256-QAM Modulation Techniques. *Journal of Electrical Engineering, Electronics, Control and Computer Science*. Vol. 7. I. 24, pp. 31-38.
31. Vasyuta K.S. (2012). Classification of process in infocommunication radiotekhn systems using BDS-statistics. *Problemy telekommunikacij*. No. 4 (9), pp. 63-71 (in Russian)
32. Kuzovnikov A.V., Semkin P.V. (2014). Method of detecting random low-energy signals. Patent RF, no. 2511598 (In Russian)
33. Gavrishev A.A., Zhuk A.P. (2018). Application of methods of nonlinear dynamics to study the chaotic state of the carrier signals of secure communication systems based on dynamic chaos. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*. Vol. 16. No. 1, pp. 50-60. DOI: 10.25205/1818-7900-2018-16-1-50-60 (In Russian)
34. Gavrishev A.A. (2019). Modeling of communication system with basic signals and its experimental analysis. *Vestnik NTsBZhD*. No. 2, pp. 151-156. (In Russian)
35. Gavrishev A.A., Zhuk A.P. (2018). Application of the Eviews program for the analysis of secure communication systems based on chaotic signals based on BDS-statistics. *T-Comm*. Vol. 12. No. 11, pp. 43-50. DOI: 10.24411/2072-8735-2018-10175 (In Russian)
36. Altman E.A., Maluytin A.G., Chizhma S.N. (2013). Raising the security level of noise-like signals in the radio system. Collected papers of the II International Scientific and Technical Conference "Radio engineering, electronics and communication ("REIS-2013)". Omsk: OJSC "ONIIP" Publ., pp. 329-337. (In Russian)
37. Gavrishev A.A. (2018). Modeling and quantitative and qualitative analysis of common secure communication systems. *Journal of Applied Informatics*. Vol. 13. No. 5 (77), pp. 84-122 (In Russian)

Information about authors:

Aleksei A. Gavrishev Master's Student, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

Dmitrii L. Osipov, Ph. D., North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia