

УДК 621.391

© А. А. Гавришев, Д. Л. Осипов, 2025

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ ДЛЯ АНАЛИЗА СВОЙСТВ СИГНАЛОВ, СФОРМИРОВАННЫХ НА ОСНОВЕ ТРОИЧНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Показано, что в настоящее время сложные сигналы, построенные на основе псевдослучайных последовательностей (ПСП), находят активное применение в различных областях деятельности. Указано, что многие известные бинарные ПСП, например, коды Баркера, m -последовательности и пр., обладают различными недостатками, затрудняющими их использование на практике. Поэтому представляется разумным исследование путей усложнения структуры сигнала не за счет увеличения числа символов в его периоде, а за счет увеличения количества значений, которые может принимать числовая последовательность. Одним из самых очевидных и наименее затратных с вычислительной точки зрения подходов для усложнения структуры сигнала является использование троичных последовательностей (ТП). Отмечено, что, несмотря на наличие большого количества работ по указанной тематике, некоторые вопросы не раскрыты в полной мере, например скрытность и надежность таких сигналов при их использовании в системах передачи данных. Предложено для оценки скрытности и надежности сигналов, сформированных на основе ТП, использовать методы нелинейной динамики (BDS-статистику, показатель Хёрста, пик-фактор). На основе проведенных исследований подтверждено, что сигналы, сформированные на основе ТП, обнаруживаются с помощью методов нелинейной динамики, в частности с помощью BDS-статистики. При этом с помощью показателя Хёрста такие сигналы не обнаруживаются, т.к. они классифицируются как близкие к белому шуму. Отмечено, что все сигналы, сформированные на основе ТП, обладают хорошим (согласно рекомендациям) пик-фактором. Также указано, что большинство исследуемых сигналов, сформированных на основе ТП, являются близкими к сигналам, сформированным на основе классических бинарных ПСП. Исходя из этого, их можно рекомендовать к использованию в скрытных системах передачи данных — хотя такие сигналы и могут быть обнаружены, однако раскрытие их структуры будет представлять определенные трудности, т.к. они имеют признаки классических бинарных ПСП.

Ключевые слова: троичные последовательности, системы передачи данных, скрытность, надежность, нелинейная динамика

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сложные сигналы, построенные на основе псевдослучайных последовательностей (ПСП), находят активное применение в различных областях деятельности, например в медицине, системах передачи данных, радиационной безопасности, геофизической технике и пр. [1–5]. Одним из основных свойств, которое определяет преимущества ПСП перед другими типами последовательностей, являются оптимальные автокорреляционные функции (АКФ). Обычно под оптимальной АКФ понимается такая АКФ, у которой боковые пики существенно меньше амплитуды центрального пика. Несмотря на разнообразие классов ПСП, единственным классом двоичных ПСП, обладающих оптимальными свойствами АКФ, являются двоичные коды Баркера. Между тем число кодов Баркера ничтожно, а их базы не превышают 13. Поэтому об их активном использовании в настоящее время не приходится гово-

рить [1–5]. Другим широко используемым на практике классом ПСП являются m -последовательности. Они, в отличие от кодов Баркера, обладают несколько худшими корреляционными свойствами, но по сравнению с ними — отнесительно большим числом кодовых структур. Поэтому до настоящего времени, с учетом простоты их реализации, они активно применяются для построения сложных сигналов в различных системах. Однако этим последовательностям также присущи недостатки, среди которых выделим следующие [4, 5]: принадлежность к категории ПСП с малым объемом последовательностей, недостаточная линейная сложность и пр.

Как указано в многочисленных исследованиях [4–11], представляется разумным исследование путей усложнения структуры сигнала не за счет увеличения числа символов в его периоде, а за счет увеличения количества значений, которые может принимать числовая последовательность, т.е. исследование многоуровневых последо-

вательностей. Одним из самых очевидных и наименее затратных с вычислительной точки зрения подходов для усложнения структуры сигнала является использование троичных последовательностей (ТП) [1–5, 12–20]. Их отличительной чертой является возможность создания последовательностей с почти идеальными корреляционными свойствами, большой объем последовательностей и пр. При этом по сравнению с бинарными ПСП происходит незначительное усложнение аппаратуры их формирования и обработки. Среди их недостатков выделяются увеличенный пик-фактор по сравнению с бинарными ПСП, а также неравномерность спектрального представления. Однако эти недостатки не мешают активному использованию ТП, т.к. их преимущества позволяют им успешно конкурировать с лучшими бинарными ПСП на фоне многоуровневых и многофазных последовательностей, алгоритмы создания которых могут быть достаточно труднореализуемыми.

Вместе с тем, несмотря на наличие большого количества работ по указанной тематике, некоторые вопросы не раскрыты в полной мере. В частности, оценке скрытности и надежности таких сигналов при их использовании в системах передачи данных уделено недостаточно внимания. В многочисленных публикациях [5–7, 12–20] основное внимание уделяется классическим показателям, в частности исследуются корреляционные и взаимокорреляционные свойства таких сигналов, их количество, линейная сложность и пр. В ряде работ проводится анализ пик-фактора ТП [5, 15].

Как утверждается в работах [9, 10, 21], для оценки свойств кодовых последовательностей различной природы возможно использовать не только классические показатели, основанные на линейных методах, но также и нелинейные методы, основанные на теории нелинейной динамики. Такая задача представляет интерес и требует дополнительной проработки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Широко известно [4–11], что одним из самых распространенных направлений использования сложных сигналов, построенных на основе ПСП, является их применение в системах передачи данных. Использование в таких системах сложных сигналов с хорошими корреляционными свойствами представляет значительный интерес, т.к. позволяет достичь повышенной помехозащищенности, высокой достоверности передачи информации, высокой энергетической и структурной скрытности излучений, высокой скорости передачи информации и пр.

С учетом рекомендаций из работ [5, 12–20], было проведено моделирование передаваемых сигналов, сформированных на основе ТП. Исходные передаваемые данные (логические нуль и единица) задавались с помощью генератора бинарных ПСП и далее переводились в базис $\{-1, 1\}$. Затем полученные сигналы преобразовывались в шумоподобный сигнал с BPSK-модуляцией, причем для передачи "1" использовалась прямая ТП, а для передачи "–1" — инверсная ТП. Таким образом, для каждого из типов ТП было получено по 50 последовательностей. Свойства полученных последовательностей затем исследовались с помощью методов нелинейной динамики.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является оценка свойств сигналов, сформированных на основе троичных последовательностей, с помощью методов нелинейной динамики на предмет их использования в системах передачи данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенный авторами обзор публикаций показал [5, 12–20, 22], что в настоящее время для систем передачи данных выделяются два больших класса ТП:

- 1) ТП $X_s = \{x_0, \dots, x_i, \dots, x_{N-1}\}$, $x_i \in \{0, \pm 1\}$, где N — период последовательности;
- 2) ТП $X_p = \{x_0, \dots, x_j, \dots, x_{N-1}\}$, $x_j \in \{0, 1, 2\}$, где N — период последовательности.

Отличительным признаком первого класса ТП X_s является наличие пауз на тех временных позициях, где $x_i = 0$, тогда как на остальных позициях передаются стандартные импульсы ($x_i = \pm 1$). Отличительными признаками второго класса ТП X_p является использование троичной системы счисления, представленной положительными целыми числами. В соответствии с [22], в дальнейшем первый класс ТП будем называть симметричными ТП (СТП), а второй класс — позиционными ТП (ПТП).

Типовые схематичные спектральные диаграммы исследуемых сигналов, сформированных на основе ТП, представлены в табл. 1.

Исследования сигналов, сформированных на основе СТП и ПТП, проведем с помощью известных методов нелинейной динамики [10, 21, 23], приведенных в табл. 2.

Табл. 1. Схематичные спектральные диаграммы исследуемых троичных последовательностей

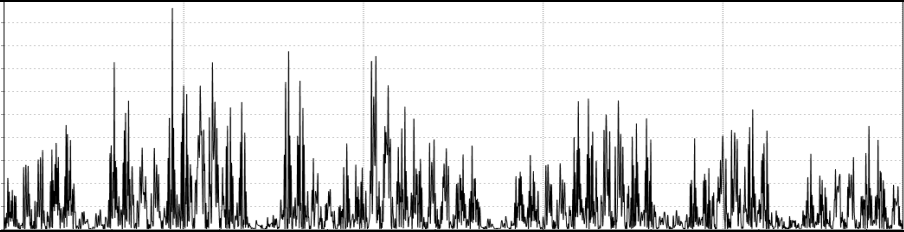
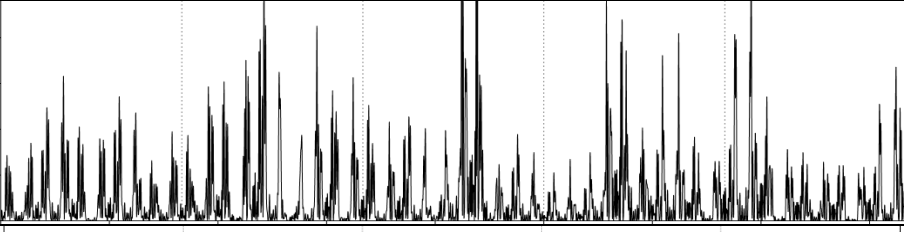
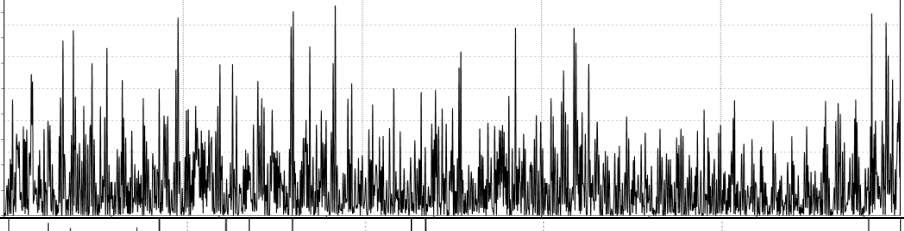
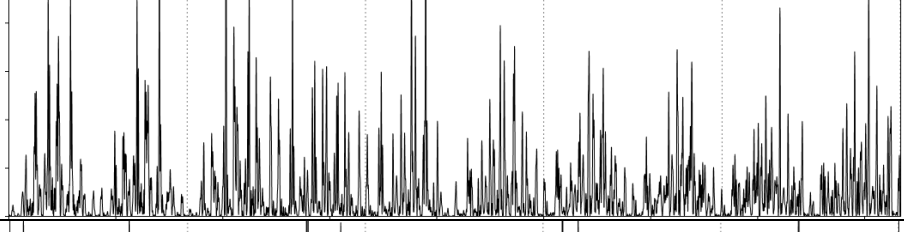
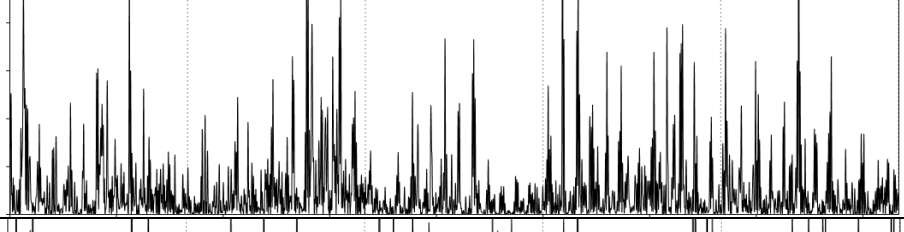
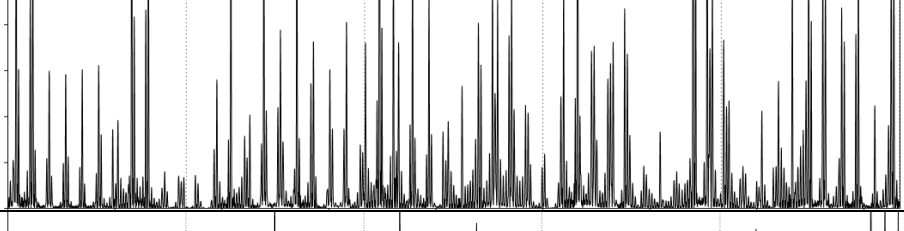
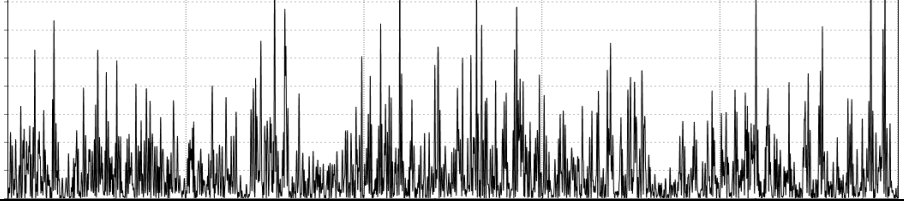
Источник	Спектральная диаграмма
Сигналы, сформированные на основе СТП	
[5]	
[12]	
[13, 14]	
[15]	
[6]	
[17, 18]	
[19]	

Табл. 1. Окончание

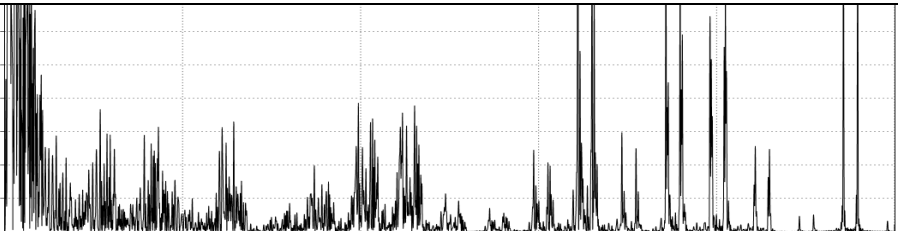
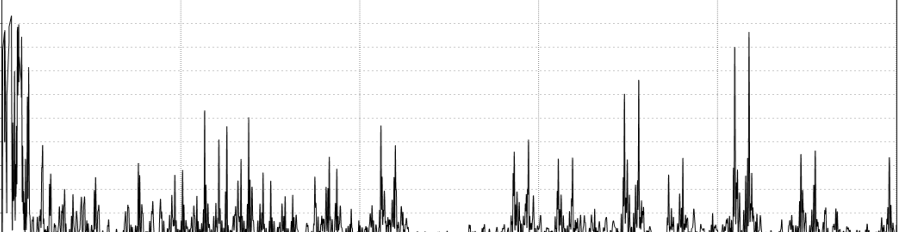
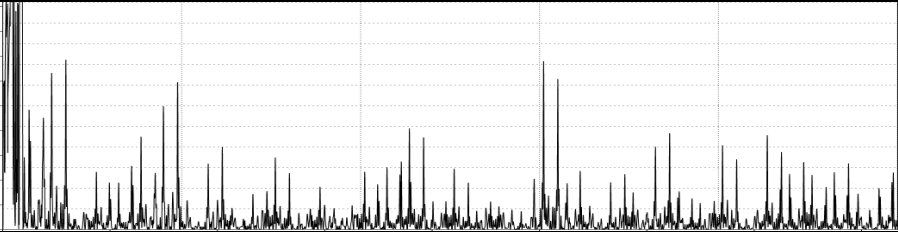
Источник	Спектральная диаграмма
Сигналы, сформированные на основе ПТП	
[7]	
[16]	
[20]	

Табл. 2. Некоторые из методов нелинейной динамики, применяемые для оценки свойств троичных последовательностей

Название метода	Формульное выражение
BDS-статистика	$w_{m,N}(\varepsilon) = \sqrt{N-m+1} \frac{C_{m,N}(\varepsilon) - C_{1,N-m}(\varepsilon)^m}{\sigma_{m,N}(\varepsilon)}$, где $C_{m,N}(\varepsilon)$ и $C_{1,N-m}(\varepsilon)$ — корреляционные интегралы, а $\sigma_{m,N}(\varepsilon)$ — среднеквадратичное отклонение
Показатель Хёрста	$R/S = (\tau/2)^H$, где R — нормированный размах вариации (разность максимального и минимального значений измеряемого параметра), S — стандартное отклонение (корень квадратный от дисперсии), τ — период (длина ряда) наблюдений, H — показатель Хёрста
Пик-фактор	$P = \frac{U_{\max}}{\sigma}$, где $U_{\max}$ — максимальное значение сигнала, σ — среднеквадратичное значение сигнала

Известно [10, 21], что BDS-статистика $\overline{w(\varepsilon)}$ базируется на статистических свойствах корреляционной размерности исследуемого процесса в фазовом пространстве, которая, в свою очередь, определяется корреляционным интегралом. Эти данные зачастую предоставляют больше информации о классе процесса (случайные, хаотические,

регулярные), чем энергетические показатели. В соответствии с [10, 21], BDS-статистика в ряде случаев может выступать в качестве меры скрытности передаваемых сигналов. В свою очередь, показатель Хёрста H позволяет разделить между собой периодические и случайные процессы, а также позволяет обнаруживать сигналы с гармонической несущей [10, 21]. Еще одним важным показателем

Табл. 3. Расчеты для исследуемых сигналов, сформированных на основе СТП и ПТП

Источник	BDS-статистика $\overline{w(\varepsilon)}$	Показатель Хёрста H	Пик-фактор P
Сигналы, сформированные на основе СТП			
[5]	45.50–53.50	0.45–0.59	1.39–1.79
[12]	40.60–51.30	0.45–0.65	1.68–1.98
[13, 14]	15.00–25.00	0.43–0.69	1.76–2.45
[15]	49.30–63.00	0.40–0.55	1.51–1.90
[6]	45.30–55.60	0.72–0.81	1.50–1.70
[17, 18]	48.30–62.40	0.49–0.63	1.40–2.00
[19]	40.60–60.00	0.43–0.54	1.50–1.80
Сигналы, сформированные на основе ПТП			
[7]	31.40–36.00	0.60–0.75	2.10–2.50
[16]	33.40–41.40	0.58–0.79	2.30–2.52
[20]	32.20–42.00	0.69–0.82	2.16–2.30

является пик-фактор сигналов P . Увеличенное значение пик-фактора ограничивает реализуемые значения энергетической эффективности радиопередающего устройства, снижает помехоустойчивость приема, усложняет и удорожает применяемую аппаратуру, а также снижает скрытность передаваемых сигналов [23].

В табл. 3 приведены рассчитанные значения BDS-статистики $\overline{w(\varepsilon)}$, показателя Хёрста H и пик-фактора P для исследуемых сигналов, сформированных на основе СТП и ПТП.

Как видно из полученных для сигналов, сформированных на основе СТП, данных (табл. 3), такие последовательности в большинстве обладают значениями BDS-статистики $\overline{w(\varepsilon)} \in [45.00, 60.00]$, за исключением представленных в работах [13, 14]: их значение BDS-статистики $\overline{w(\varepsilon)} \in [15.00, 25.00]$. Полученные результаты показывают, что сигналы, сформированные на основе СТП, в целом являются близкими к сигналам, сформированным на основе классических бинарных ПСП [10, 21], значение BDS-статистики которых $\overline{w(\varepsilon)} \in [40.00, 50.00]$. Сигналы, сформированные на основе СТП из работ [13, 14], являются близкими к черному шуму [10, 21], значение BDS-статистики которого $\overline{w(\varepsilon)} \in [3.00, 19.00]$. Относительно результатов расчета показателя Хёрста H , следует отметить, что все полученные значения либо $H \approx 0.5$, либо $H > 0.5$. Согласно [21, 24], можно говорить о близости таких последовательностей к белому шуму.

Кроме того, все сигналы, сформированные на основе СТП, обладают достаточно хорошим пик-фактором $P < 2.50$, т.к. не превышают рекомендованный для систем передачи данных порог $P < 4.00$ [23].

Как видно из полученных для сигналов, сформированных на основе ПТП, данных (табл. 3), они все обладают значениями BDS-статистики $\overline{w(\varepsilon)} \in [31.00, 42.00]$. Полученные результаты показывают, что сигналы, сформированные на основе ПТП, являются близкими к сигналам, сформированным на основе классических бинарных ПСП [10, 21], значение BDS-статистики которых $\overline{w(\varepsilon)} \in [40.00, 50.00]$. Подчеркнем, что значение BDS-статистики сигналов, сформированных на основе ПТП, меньше, чем значение BDS-статистики сигналов, сформированных на основе СТП, и находится ближе к белому шуму [10, 21], BDS-статистика которого $\overline{w(\varepsilon)} \leq 1.96$. Относительно приведенных значений показателя Хёрста H следует отметить, что все полученные результаты $H \geq 0.5$. Согласно [21, 24], такой показатель свидетельствует о том, что последовательности близки к белому шуму. Ко всему прочему все сигналы, сформированные на основе ПТП, обладают достаточно хорошим пик-фактором $P < 2.50$, не превосходящим рекомендованный для систем передачи данных ($P < 4.00$) [23]. В целом пик-фактор сигналов, сформированных на основе ПТП, превосходит пик-фактор сигналов, сформированных на основе СТП.

ОБСУЖДЕНИЕ

С учетом введенных ограничений в первую очередь обратим внимание на обсуждение характеристик ТП, которые важны для систем передачи данных. Полученные результаты подтверждают, что сигналы, сформированные на основе СТП и ПТП, обнаруживаются с помощью методов нелинейной динамики, в частности, с помощью BDS-статистики. Установлено, что сигналы, сформированные на основе ТП, являются близкими к сигналам, сформированным на основе классических бинарных ПСП. При этом с помощью показателя Хёрста такие сигналы не обнаруживаются, т.к. они классифицируются как близкие к белому шуму. Комментируя полученные значения пик-фактора для таких сигналов, отметим, что все сигналы, сформированные на основе ТП, обладают хорошим пик-фактором. Особо выделим сигналы, сформированные на основе СТП, приведенные в работах [13, 14]. По значениям показателя Хёрста и пик-фактора они являются схожими с другими сигналами, сформированными на основе ТП, но их значение BDS-статистики указывает на то, что они близки к черному шуму. Поэтому их рекомендуется использовать в системах передачи данных с повышенными требованиями к скрытности, т.к. из всех рассмотренных сигналов, сформированных на основе ТП, они являются наиболее близкими и к белому шуму, BDS-статистика которого $\overline{w(\varepsilon)} \leq |1.96|$. Полученный результат также подтверждается их схематичной спектральной диаграммой (см. табл. 1), которая обладает более равномерным и широким спектром, чем большинство остальных сигналов, сформированных на основе ТП, у многих из которых на спектральной диаграмме преобладает изрезанность и неравномерность спектра.

Кроме того, известно [4, 5, 8, 11, 25], что в последнее время особое внимание уделяется вопросам обеспечения структурной скрытности систем передачи данных. Прежде всего это связано с тем, что иные технологии реализации скрытности, например энергетической скрытности, приводят к ухудшению электромагнитной доступности абонентов систем передачи данных, а признаки информационной скрытности провоцируют неавторизованных абонентов к применению средств деструктивного воздействия, что является нежелательным моментом. В общем виде структурная скрытность зависит от способа синтеза конкретно-

го сигнала [4, 5, 8, 11, 25]. Одним из перспективных направлений обеспечения структурной скрытности может стать так называемая параметрическая мимикрия [25]. Под ней, в общем виде, понимается структурная скрытность, которая проявляется в результате неправильного выбора злоумышленником базиса анализа. Это происходит потому, что сформированный сигнал, в основу которого положена специальная функция, имеет внешние признаки известного модулированного колебания. В качестве примера возможно привести близость структур вейвлета и гармонического сигнала, представленного синусоидой [25]. Проведенные авторами исследования показывают (см. табл. 3), что большинство исследуемых сигналов, сформированных на основе ТП, являются близкими к сигналам, сформированным на основе классических бинарных ПСП. Исходя из этого, их также возможно рекомендовать использовать в скрытных системах передачи данных: хоть они и могут быть обнаружены, однако раскрытие их структуры будет представлять определенные трудности, т.к. они имеют признаки классических бинарных ПСП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведена оценка свойств сигналов, сформированных на основе ТП с помощью методов нелинейной динамики на предмет их использования в системах передачи данных.

Отмечено, что в настоящее время сложные сигналы, построенные на основе ПСП, находят активное применение в различных областях деятельности, например в медицине, системах передачи данных, радиационной безопасности, геофизической технике и пр. [1–5]. Указано, что многие известные бинарные ПСП, например коды Баркера, m-последовательности и пр., обладают различными недостатками, затрудняющими их использование на практике. Поэтому, согласно [4–11], представляется разумным исследование путей усложнения структуры сигнала не за счет увеличения числа символов в его периоде, а за счет увеличения количества значений, которые может принимать числовая последовательность, т.е. исследование многоуровневых последовательностей. Одним из самых очевидных и наименее затратных с вычислительной точки зрения подходов для усложнения структуры сигнала является использование ТП [1–5, 12–20]. Отмечено, что, несмотря

на наличие большого количества работ по указанной тематике, некоторые вопросы не раскрыты в полной мере. В частности, оценке скрытности и надежности таких сигналов при их использовании в системах передачи данных уделено недостаточно внимания. Предложено для оценки и надежности сигналов, сформированных на основе ТП, использовать методы нелинейной динамики.

С учетом рекомендаций из работ [5, 12–20], было проведено моделирование передаваемых сигналов, сформированных на основе симметричных и позиционных ТП. Свойства полученных последовательностей затем исследовались с помощью методов нелинейной динамики (BDS-статистики, показателя Хёрста, пик-фактора). Подтверждено, что сигналы, сформированные на основе СТП и ПТП, обнаруживаются с помощью методов нелинейной динамики, в частности с помощью BDS-статистики. При этом с помощью показателя Хёрста такие сигналы не обнаруживаются, т.к. они классифицируются как близкие к белому шуму. Отмечено, что все сигналы, сформированные на основе ТП, обладают приемлемым пик-фактором. Особо отмечены сигналы, сформированные на основе СТП из работ [13, 14]. Так, по значениям показателя Хёрста и пик-фактора они являются схожими с другими сигналами, сформированными на основе ТП, но их значение BDS-статистики указывает на то, что они относятся к черному шуму. Поэтому их рекомендуется использовать в системах передачи данных с повышенными требованиями к скрытности. Из всех рассмотренных сигналов, сформированных на основе ТП, они являются по H -оценке наиболее близкими и к белому шуму. Отмечено, что большинство исследуемых сигналов, сформированных на основе ТП, являются близкими к сигналам, сформированным на основе классических бинарных ПСП. Исходя из этого, их также возможно рекомендовать использовать в скрытных системах передачи данных — хоть они и могут быть обнаружены, однако раскрытие их структуры будет представлять определенные трудности, т.к. они имеют признаки классических бинарных ПСП. Это указывает на то [25], что они обладают параметрической мимикрией из-за наличия внешних признаков известного сигнала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Терещенко С.А., Федоров Г.А., Антаков М.А., Бурнаевский И.С. Семейства аппаратных функций гексаго-

- нальных кодирующих коллиматоров // Известия вузов. Электроника. 2013. № 5 (103). С. 70–74. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20362496>
2. Федоров Г.А., Терещенко С.А., Антаков М.А., Бурнаевский И.С. Интегрально кодовые системы измерений с многопинхольными гексагональными кодирующими коллиматорами на основе троичных последовательностей // Вестник национального исследовательского ядерного университета "МИФИ". 2013. Т. 2, № 1. С. 40–46. DOI: 10.1134/S2304487X13010094
3. Сиротенко П.Т., Роман В.И., Юнолайнен А.В., Марухненко В.П. Устройство синхронизации источников сейсмических сигналов. Патент на изобретение СССР SU 1787278 A3, 1993. URL: <https://patenton.ru/patent/SU1787278A3>
4. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
5. Ипатов В.П. Периодические дискретные сигналы с оптимальными корреляционными свойствами. М.: Радио и связь, 1992. 152 с.
6. Ковалев М.А., Макаров А.А., Павский В.Ф., Петелин Ю.В. О существовании троичных псевдослучайных последовательностей, подобных двоичным кодам Баркера // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2016. Вып. 650. С. 54–56. URL: http://trudvka.ru/download/2016/650_march_2016.pdf
7. Петелин Ю.В., Ковалев М.А., Макаров А.А. Перспективы использования сигнально-кодовых конструкций типа троичных m -последовательностей в спутниковых каналах связи // Информационно-управляющие системы. 2006. № 5. С. 32–35. URL: <https://i-us.ru/index.php/ius/article/view/14579>
8. Сухарев Е.М. Общесистемные вопросы защиты информации. Коллективная монография. Кн. 1. М.: Радиотехника, 2003. 292 с.
9. Гавришнев А.А. Сравнительный анализ хаотических сигналов и известных шумоподобных сигналов по критерию скрытности // Материалы IV Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны "Гражданская оборона на страже мира и безопасности". В 3-х частях. М.: Академия ГПС МЧС России, 2020. Ч. 2. С. 470–475. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42632144>
10. Гавришнев А.А. Моделирование и количественно-качественный анализ распространенных защищенных систем связи // Прикладная информатика. 2018. Т. 13, № 5 (77). С. 84–122. URL: http://www.appliedinformatics.ru/r/articles/article/index.php?article_id_4=2300
11. Жук А.П., Студеникин А.В., Макаров И.В., Беседин А.А. Оценка структурной скрытности ансамблей многофазных ортогональных кодовых последовательностей // Телекоммуникации. 2024. № 3. С. 13–21. DOI: 10.31044/1684-2588-2024-0-3-13-21
12. Едемский В.А. Синтез чередующихся троичных последовательностей с хорошими автокорреляционными свойствами и высокой эквивалентной линейной сложностью // Журнал радиоэлектроники. Эл. ресурс. 2014. № 2. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/feb14/2/abstract.html>

13. Кренгель Е.И. Построение новых идеальных троичных последовательностей // Сб. докл. 19-й междунар. конф. "Цифровая обработка сигналов и ее применение" (DSPA-2017). М.: РНТОРЭС им. А. С. Попова, 2017. Т. 1. С. 61–65.
14. Кренгель Е.И. О взаимной корреляции некоторых пар почти идеальных троичных последовательностей // Сб. докл. 9-й междунар. конф. "Цифровая обработка сигналов и ее применение" (DSPA-2007). М.: ИПУ РАН, 2007. С. 17–20.
URL: <http://autex.spb.su/dspa/dspa2007/dspa2007.php>
15. Кренгель Е.И., Иванов П.В. Новые троичные последовательности с двумя ненулевыми боковыми лепестками периодической автокорреляционной функции и пик-фактором, близким к единице // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2016. Т. 6, № 1. С. 173–177.
URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32721524>
16. Соколов А.В., Жданов О.Н. Криптографические конструкции на основе функций многозначной логики. М.: ИНФРА-М, 2022. 192 с.
17. Гюнтер А.В. Применение кодов с нулевой зоной корреляции в системах с CDMA и OFDM // Телекоммуникации. 2012. № 3. С. 8–12. URL: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=1614#
18. Гюнтер А.В. Метод построения троичных последовательностей с пулевой зоной корреляции // Цифровая обработка сигналов. 2011. № 1. С. 33–36.
19. Arshad A., Emran A., Ahsan H. et al. Pseudo Random Ternary Sequence and Its Autocorrelation Property Over Finite Field // I. J. Computer Network and Information Security. 2017. No. 9. P. 54–63.
DOI: 10.5815/ijcnis.2017.09.07
20. Егоров В.В., Мингалев А.Н., Середенко В.А. Построение квазиортогонального базиса на основе троичных псевдослучайных последовательностей // Сб. докл. Второй всероссийской научной конференции "Радиотехнические, оптические и биотехнические системы. Устройства и методы обработки информации". СПб: ГУАП, 2021. С. 157–161. URL: <https://elibrary.ru/yjfflw>
21. 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. Т. 16. № 9. С. 13–19. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-9-13-19
22. Белюченко И.М. Разновидности троичного кода // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2011. № 3. С. 17–20.
23. Гавришев А.А., Гавришев А.Н. К вопросу о расчете значений пик-фактора сигналов, генерируемых распространенными скрытными системами связи // Вестник НЦБЖД. 2020. № 3 (45). С. 149–157. URL: https://ncbgd.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub_2478119.pdf
24. Кузовников А.В., Семкин П.В. Способ обнаружения случайных низкоэнергетических сигналов. Патент РФ RU 2511598C2. 2014. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2511598C2_20140410
25. Дворников С.В., Манаенко С.С., Дворников С.С. Параметрическая мимикрия сигналов, модулированных колебаниями и сформированных в различных функциональных базисах // Информационные технологии. 2015. № 4. С. 259–263.
URL: http://novtex.ru/IT/it2015/it415_web-259-263.pdf

МГЛУ, Москва, Россия (Гавришев А.А.)

СКФУ, Ставрополь, Россия (Осипов Д.Л.)

Контакты: Гавришев Алексей Андреевич,
alexxx.2008@inbox.ru

Материал поступил в редакцию 19.05.2025

APPLICATION OF NONLINEAR DYNAMICS METHODS FOR ANALYZING THE PROPERTIES OF SIGNALS FORMED ON THE BASIS OF TERNARY SEQUENCES

A. A. Gavrishev¹, D. L. Osipov²

¹MSLU, Moscow, Russia

²NCFU, Stavropol, Russia

It is shown that complex signals based on pseudorandom sequences (PRS) are currently being actively used in various fields of activity. It is indicated that many well-known binary PRS, for example, Barker codes, m-sequences, etc., have various disadvantages that make it difficult to use them in practice. Therefore, it seems reasonable to explore ways to complicate the structure of a signal not by increasing the number of characters in its period, but by increasing the number of values that a numeric sequence can take. One of the most obvious and least computationally expensive approaches to complicate the signal structure is the use of ternary sequences (TS). It is noted that, despite the availability of a large number of works on this topic, some issues are not fully disclosed, for example, the secrecy and reliability of such signals when used in data transmission systems. It is proposed to use nonlinear dynamics methods (BDS-statistics, Hurst exponent, peak factor) to evaluate the secrecy and reliability of signals generated on the basis of TS. Based on the conducted research, it has been confirmed that signals generated on the basis of TS are detected using nonlinear dynamics methods, in particular, using BDS-statistics. At the same time, using the Hurst exponent, such signals are not detected, since they are classified as close to white noise. It is noted that all signals generated on the basis of TS have a good peak factor. It is noted that most of the studied signals formed on the basis of TS are close to the signals formed on the basis of classical binary PRS. Based on this, they can be recommended for use in hidden data transmission systems – although they can be detected, however, disclosure of their structure will present certain difficulties, since they have the characteristics of classical binary PRS.

Keywords: ternary sequences, data transmission systems, secrecy, reliability, nonlinear dynamics

REFERENCES

1. Tereshchenko S.A., Fedorov G.A., Antakov M.A., Bur-naevsky I.S. [Families of point-spread functions of hexagonal coding collimators]. *Izvestiya vuzov. Elektronika* [News of universities. Electronics], 2013, no. 5 (103), pp. 70–74. (In Russ.).
URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20362496>
2. Fedorov G.A., Tereshchenko S.A., Antakov M.A., Bur-naevsky I.S. [Integral code measurement systems with multiple-pinhole hexagonal coding collimators based on ternary sequences]. *Vestnik nazional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI"* [Bulletin of the National Research Nuclear University "MEPhI"], 2013, no. 1, pp. 40–46. (In Russ.).
DOI: 10.1134/S2304487X13010094
3. Sirotenko P.T., Roman V.I., Yunolainen A.V., Marukh-nenko V.P. *Ustroystvo sinkhronizatsii istochnikov seysmi-cheskikh signalov* [Device for synchronization of seismic signal sources]. *Patent RF no. SU 1787278 A3*. 1993. (In Russ.). URL: <https://patenton.ru/patent/SU1787278A3>
4. Varakin L.E. *Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami* [Communication systems with noise-like signals]. Moscow, "Radio and Communications" Publ., 1985. 384 p. (In Russ.).
5. Ipatov V.P. *Periodicheskiye diskretnyye signaly s optim-al'nymi korrelyatsionnymi svoystvami* [Periodic discrete signals with optimal correlation properties], Moscow, "Radio and Communications" Publ., 1992. 152 p. (In Russ.).
6. Kovalev M.A., Makarov A.A., Pavskiy V.F., Pete-lin Yu.V. [On the existence of ternary pseudorandom sequences similar to binary Barker codes]. *Trudy Voennokosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhayskogo* [Proc. of the A.F. Mozhaisky Military Space Academy], 2016, vol. 650, pp. 54–56. (In Russ.). URL: http://trudvka.ru/download/2016/650_march_2016.pdf
7. Petelin Yu.V., Kovalev M.A., Makarov A.A. [Prospects for using the signal-code constructions of the type of ternary m-sequences in satellite communication channels]. *Informatsionno-upravlyayushchiye systemy* [Information and control systems], 2006, no. 5, pp. 32–35. (In Russ.). URL: <https://i-us.ru/index.php/ius/article/view/14579>
8. Sukharev E.M. *Obshchesistemnyye voprosy zashchity in-formatsii. Kollektivnaya monografiya. Kn. 1.* [General system issues of information security. Collective monograph. Book 1]. Moscow, "Radio Engineering" Publ., 2003. 292 p. (In Russ.).

9. Gavrishev A.A. [Comparative analysis of chaotic signals and known noise-like signals based on the secrecy criterion]. *Materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy Vsemirnomu dnyu grazhdanskoy oborony, "Grazhdanskaya oborona na strazhe mira i bezopasnosti"* [Proc. of the IV International Scientific and Practical Conference dedicated to the World Civil Defense Day "Civil Defense on Guard of Peace and Security". In 3 parts], Moscow, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2020, pp. 470–475. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42632144>
10. Gavrishev A.A. [Modeling and quantitative-qualitative analysis of common secure communication systems]. *Prikladnaya informatika* [Applied Informatics], 2018, vol. 13, no. 5 (77), pp. 84–122. (In Russ.). URL: http://www.appliedinformatics.ru/r/articles/article/index.php?article_id_4=2300
11. Zhuk A.P., Studenikin A.V., Makarov I.V., Besedin A.A. [Structural secrecy evaluation of ensembles of multiphase orthogonal code sequences]. *Telekommunikatsii* [Telecommunications], 2024, no. 3, pp. 13–21. DOI: 10.31044/1684-2588-2024-0-3-13-21. (In Russ.).
12. Edemskiy V.A. [Synthesis of interleaved ternary sequences with good autocorrelation and high linear complexity]. *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], el. resurs., 2014, no. 2. (In Russ.). URL: <http://jre.cplire.ru/jre/feb14/2/abstract.html>
13. Krengel E.I. [Construction of new perfect ternary sequences]. *Sb. dokl. 19-y mezhdunar. konf. "Tsifrovaya obrabotka signalov i yeye primeneniye"* [Proc. of the 19th Int. Conf. "Digital signal processing and its application"], Moscow, ICS RAS, 2017, pp. 61–65. (In Russ.).
14. Krengel E.I. [On the cross-correlation of some pairs of almost ideal ternary sequences]. *Dokl. 9-y mezhdunar. konf. "Tsifrovaya obrabotka signalov i yeye primeneniye (DSPA-2007)"* [Reports of the 9th International Conference "Digital Signal Processing and Its Applications (DSPA-2007)"], Moscow, ICS RAS, 2007, pp. 17–20. (In Russ.). URL: <http://autex.spb.su/dspa/dspa2007/dspa2007.php>
15. Krengel E.I., Ivanov P.V. [New ternary sequences with two non-zero sidelobes of the periodic autocorrelation function and a peak factor close to unity]. *DSPA, Voprosy primeneniya tsifrovoy obrabotki signalov* [DSPA: Application Issues of Digital Signal Processing], 2016, no. 1, pp. 173–177. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32721524>
16. Sokolov A.V., Zhdanov O.N. *Kriptograficheskiye konstruksii na osnove funktsiy mnogoznachnoy logiki* [Cryptographic constructions based on functions of multivalued logic]. Moscow, INFRA-M Publ., 2022. 192 p. (In Russ.).
17. Gunter A.V. [Application of codes with zero correlation zone in CDMA and OFDM systems]. *Telekommunikatsii* [Telecommunications], 2012, no. 3, pp. 8–12. URL: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=1614# (In Russ.).
18. Gunter A.V. [Method for constructing ternary sequences with zero correlation zone]. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital Signal Processing], 2011, no. 1, pp. 33–36. (In Russ.).
19. Arshad A., Emran A., Ahsan H. et al. Pseudo Random Ternary Sequence and Its Autocorrelation Property Over Finite Field. *I. J. Computer Network and Information Security*, 2017, №. 9, pp. 54–63. DOI: 10.5815/ijcnis.2017.09.07
20. Egorov V.V., Mingalev A.N., Seredenko V.A. [Construction of a quasi-orthogonal basis based on ternary pseudorandom sequences]. *Sb. dokl. Vtoroy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii "Radiotekhnicheskiye, opticheskiye i biotekhnicheskiye sistemy. Ustroystva i metody obrabotki informatsii"* [Abstracts of the Second All-Russian Scientific Conference "Radio, optical and biotechnical systems. Devices and methods of information processing"], St. Petersburg, GUAP, 2021, pp. 157–161. (In Russ.).
21. Gavrishev A.A., Osipov D.L. [Estimation of the Secrecy of OFDM Signals Based on BPSK Modulation Using Nonlinear Dynamics Methods]. *T-Comm, Telekommunikatsii i transport* [T-Comm: Telecommunications and Transport], 2022, vol. 16, no. 9, pp. 13–19. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-9-13-19 (In Russ.).
22. Belyuchenko I.M. [Types of ternary code]. *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy* [Electrical and information complexes and systems], 2011, no. 3, pp. 17–20. (In Russ.).
23. Gavrishev A.A., Gavrishev A.N. [On the issue of calculating the peak factor values of signals generated by common covert communication systems]. *Vestnik NTsBZhD* [Bulletin of the Scientific Center for Life Safety], 2020, no. 3 (45), pp. 149–157. (In Russ.). https://ncbgd.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub_2478119.pdf
24. Kuzovnikov A.V., Semkin P.V. *Sposob obnaruzheniya sluchaynykh nizkoenergeticheskikh signalov*. [Method for detecting random low-energy signals], *Patent RF no. RU 2511598C2*. 2014. (In Russ.). URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2511598C2_20140410
25. Dvornikov S.V., Manaenko S.S., Dvornikov S.S. [Parametric mimicry of signals modulated by oscillations and formed in various functional bases]. *Informatsionnyye tekhnologii* [Information technologies], 2015, no. 4, pp. 259–263. URL: http://novtex.ru/IT/it2015/it415_web-259-263.pdf (In Russ.).

Contacts: Gavrishev Aleksej Andreevich,
alexex.2008@inbox.ru

Article received by the editorial office on 19.05.2025

INTRODUCTION

Currently, complex signals constructed on the basis of pseudo-random sequences (PRS) are actively used in various fields, for example, in medicine, data transmission systems, radiation safety, geophysical engineering, etc. [1–5]. One of the main properties that determines the advantages of PRS over other types of sequences is the optimal autocorrelation functions (ACF). Usually, an optimal ACF is understood as an ACF in which the side peaks are significantly smaller than the amplitude of the central peak. Despite the diversity of PRS classes, the only class of binary PRS with optimal ACF properties is binary Barker codes. Meanwhile, the number of Barker codes is negligible, and their lengths do not exceed 13. Therefore, their active use is currently out of the question [1–5]. Another class of PRS widely used in practice is m-sequences. They, in contrast to Barker codes, have somewhat worse correlation properties but in comparison with them, a relatively large number of code structures. Therefore, up to the present time, taking into account the simplicity of their implementation, they are actively used to construct complex signals in various systems. However, these sequences also have disadvantages, among which we highlight the following [4, 5]: belonging to the category of PSPs with a small volume of sequences, insufficient linear complexity, etc.

As indicated in numerous studies [4–11], it seems reasonable to study the ways of complicating the signal structure not by increasing the number of symbols in its period, but by increasing the number of values that a numerical sequence can take, i.e., to study multilevel sequences. One of the most obvious and least computationally expensive approaches to complicating the signal structure is the use of ternary sequences (TS) [1–5, 12–20]. Their distinctive feature is the ability to create sequences with almost ideal correlation properties, a large volume of sequences, etc. At the same time, in comparison with binary PRSs, there is a slight complication of the equipment for their formation and processing. Among their disadvantages are an increased peak factor compared to binary PRSs, as well as uneven spectral representation. However, these disadvantages do not interfere with the active use of TSs, since their advantages allow them to successfully compete with the best binary PRSs against the background of multilevel and multiphase sequences, the algorithms for creating which can be quite difficult to implement.

At the same time, despite the presence of a large number of works on the specified topic, some issues are not fully disclosed. In particular, insufficient attention has been paid to the assessment of the secrecy and reliability of such signals when used in data transmission systems. In numerous publications [5–7,

12–20], the main attention is paid to classical indicators, in particular, the correlation and cross-correlation properties of such signals, their number, linear complexity, etc. are studied. A number of works analyze the peak factor of the TS [5, 15].

As stated in works [9, 10, 21], to assess the properties of code sequences of various natures, it is possible to use not only classical indicators based on linear methods but also nonlinear methods based on the theory of nonlinear dynamics. Such a problem is of interest and requires additional study.

MATERIALS AND METHODS

It is widely known [4–11] that one of the most common areas of using PRS-based complex signals is their application in data transmission systems. The use of complex signals with good correlation properties in such systems is of considerable interest, since it allows achieving increased noise immunity, high reliability of information transmission, high energy and structural secrecy of radiation, high data transmission speed, etc.

Taking into account the recommendations from [5, 12–20], the transmitted signals formed on the basis of the TS were simulated. The initial transmitted data (logical zero and one) were specified using a binary PRS generator and then converted to the basis $\{-1, 1\}$. Then the received signals were transformed into a noise-like signal with BPSK modulation, whereby a direct TS was used to transmit "1", and an inverse TS was used to transmit "-1". Thus, for each of the TS types, 50 sequences were obtained. The properties of the obtained sequences were then studied using nonlinear dynamics methods.

RESEARCH OBJECTIVE

The purpose of the study is to evaluate the properties of signals formed on the basis of ternary sequences using nonlinear dynamics methods for their use in data transmission systems.

RESEARCH RESULTS

A review of publications conducted by the authors showed [5, 12–20, 22] that at present two large classes of TS are distinguished for data transmission systems:

1) $TS X_s = \{x_0, \dots, x_i, \dots, x_{N-1}\}, \quad x_i \in \{0, \pm 1\},$

where N is the sequence period;

2) $TS X_p = \{x_0, \dots, x_j, \dots, x_{N-1}\}, \quad x_j \in \{0, 1, 2\},$

where N is the sequence period.

A distinctive feature of the first class of TS X_s is the presence of pauses at those time positions where $x_i = 0$, while at other positions standard pulses are

transmitted ($x_i = \pm 1$). A distinctive feature of the second class of TS X_p is the use of a ternary number system represented by positive integers. In accordance with [22], we shall refer to the first class of TS as symmetric TS (STS) and the second class as positional TS (PTS) in the following.

Typical schematic spectral diagrams of the studied signals formed on the basis of TS are presented in Tab. 1.

Tab. 1. Schematic spectral diagrams of the studied ternary sequences

We will study the signals formed on the basis of STS and PTS using known methods of nonlinear dynamics [10, 21, 23], given in Tab. 2.

Tab. 2. Some of the methods of nonlinear dynamics used to assess the properties of ternary sequences

It is known [10, 21] that BDS statistics $\overline{w(\varepsilon)}$ are based on the statistical properties of the correlation dimension of the process under study in the phase space, the correlation dimension in turn is determined by the correlation integral. These data often provide more information about the class of the process (random, chaotic, regular) than energy indicators. In accordance with [10, 21], BDS statistics in some cases can act as a measure of the secrecy of transmitted signals. In turn, the Hurst exponent H allows us to separate periodic and random processes and also allows us to detect signals with a harmonic carrier [10, 21]. Another important indicator is the peak factor of signals P . An increased value of the peak factor limits the realized values of the energy efficiency of the radio transmitting device, reduces the noise immunity of reception, complicates and increases the cost of the equipment used, and also reduces the secrecy of the transmitted signals [23].

Table 3 shows the calculated values of the BDS statistics $\overline{w(\varepsilon)}$, the Hurst exponent H , and the peak factor P for the studied signals formed on the basis of the STS and PTS.

As can be seen from the data obtained for the signals formed on the basis of the STS (Tab. 3), such sequences in general have BDS statistics values of $\overline{w(\varepsilon)} \in [45.00, 60.00]$, with the exception of those presented in works [13, 14]. Their BDS statistics value is $\overline{w(\varepsilon)} \in [15.00, 25.00]$. The obtained results show that the signals generated on the basis of the STS are, in general, close to the signals generated on the basis of classical binary PRS [10, 21], the BDS

statistics value of which is $\overline{w(\varepsilon)} \in [40.00, 50.00]$. The signals generated on the basis of the STS from [13, 14] are close to black noise [10, 21], the BDS statistics value of which is $\overline{w(\varepsilon)} \in [3.00, 19.00]$. Regarding the results of calculating the Hurst exponent H , it should be noted that all the obtained values are either $H \approx 0.5$ or $H > 0.5$. According to [21, 24], we can talk about the closeness of such sequences to white noise. In addition, all signals generated on the basis of the STS have a fairly good peak factor $P < 2.50$, since do not exceed the threshold recommended for data transmission systems $P < 4.00$ [23].

As can be seen from the data obtained for the signals generated on the basis of the PTS (Tab. 3), they generally have BDS statistics values of $\overline{w(\varepsilon)} \in [31.00, 42.00]$. The results obtained show that the signals generated on the basis of the PTS are generally close to the signals generated on the basis of classical binary PRSs [10, 21], the BDS statistics value of the latter is $\overline{w(\varepsilon)} \in [40.00, 50.00]$. It should be emphasized that the value of the BDS statistics of signals generated on the basis of the PTS is less than the value of the BDS statistics of signals generated on the basis of the STS and is closer to white noise [10, 21], the BDS statistics of which is $\overline{w(\varepsilon)} \leq |1.96|$. Regarding the given values of the Hurst exponent H , it should be noted that $H \geq 0.5$ in all obtained results. According to [21, 24], such an indicator shows that the sequences are close to white noise. In addition, all signals generated on the basis of the PTS have a fairly good peak factor $P < 2.50$, which does not exceed the recommended one for data transmission systems ($P < 4.00$) [23]. In general, the peak factor of signals generated on the basis of the PTS exceeds the peak factor of signals generated on the basis of the STS.

DISCUSSION

Taking into account the introduced restrictions, we will first of all pay attention to the discussion of the TS characteristics that are important for data transmission systems. The obtained results confirm that the signals generated on the basis of STS and PTS are detected using nonlinear dynamics methods, in particular, using BDS statistics. It was found that the signals generated on the basis of TS are close to the signals generated on the basis of classical binary PRS. Such signals are not detected using the Hurst exponent, since they are classified as close to white noise. Commenting on the obtained values of the peak factor for such signals, we note that all signals generated on the basis of TS have a good peak factor. We will especially highlight the signals generated on the basis of STS, given in [13, 14]. According to the Hurst expo-

nent and crest factor values, they are similar to other signals generated on the basis of TS, but their BDS statistics value indicates that they belong to black noise. Therefore, it is recommended to use them in data transmission systems with increased secrecy requirements, since of all the considered signals generated on the basis of TS, they are the closest to white noise, which BDS statistics are $\overline{w(\varepsilon)} \leq |1.96|$. The obtained result is also confirmed by their schematic spectral diagram (see Tab. 1), which has a more uniform and wider spectrum than most other signals generated on the basis of TS, many of which have a predominantly jagged and uneven spectrum on the spectral diagram.

In addition, it is known [4, 5, 8, 11, 25] that recently special attention has been paid to issues of ensuring the structural secrecy of data transmission systems. First of all, this is due to the fact that other technologies for implementing stealth, for example, energy stealth, lead to deterioration of the electromagnetic availability of subscribers of data transmission systems, and the signs of information stealth provoke unauthorized subscribers to use destructive means, which is generally an undesirable fact. In general, structural stealth depends on the method of synthesis of a specific signal [4, 5, 8, 11, 25]. One of the promising areas of ensuring structural stealth can be the so-called parametric mimicry [25]. In general, it is understood as structural stealth, which manifests itself as a result of an intruder's incorrect choice of the analysis basis. This occurs because the generated signal, which is based on a special function, has external signs of a known modulated oscillation. As an example, we can note the proximity of the structures of a wavelet and a harmonic signal represented by a sinusoid [25]. The studies conducted by the authors show (see Tab. 3) that most of the studied signals generated on the basis of TS are close to signals generated on the basis of classical binary PRS. Based on this, it is also possible to recommend their use in covert data transmission systems: although they can be detected, disclosing their structure will present certain difficulties, since they have the characteristics of classical binary PRS.

Tab. 3. Calculations for the studied signals generated on the basis of STS and PTS

CONCLUSION

In this paper, an assessment of the properties of signals generated on the basis of TS using nonlinear dynamics methods was carried out for the purpose of their use in data transmission systems.

It is noted that at present, complex signals constructed on the basis of PRS are actively used in various fields of activity, for example, in medicine, data transmission systems, radiation safety, geophysical engineering, etc. [1–5]. It is indicated that many known binary PRSs, such as Barker codes, m-sequences, etc., have various shortcomings that complicate their use in practice. Therefore, according to [4–11], it seems reasonable to study the ways of complicating the signal structure not by increasing the number of symbols in its period, but by increasing the number of values that a numerical sequence can take, i.e., to study multi-level sequences. One of the most obvious and least computationally expensive approaches to complicating the signal structure is the use of TS [1–5, 12–20]. It is noted that, despite the presence of a large number of works on this topic, some issues have not been fully disclosed. In particular, insufficient attention has been paid to the assessment of the secrecy and reliability of such signals when used in data transmission systems. It is proposed to use nonlinear dynamics methods to assess the reliability of signals generated on the basis of TS.

Taking into account the recommendations from [5, 12–20], the transmitted signals generated on the basis of symmetric and positional TS were simulated. The properties of the obtained sequences were then studied using nonlinear dynamics methods (BDS statistics, Hurst exponent, peak factor). It was confirmed that signals generated on the basis of STS and PTS are detected using nonlinear dynamics methods, in particular, using BDS statistics. Such signals are not detected using the Hurst exponent, since they are classified as close to white noise. It is noted that all signals generated on the basis of TS have a good peak factor. The signals generated on the basis of STS from [13, 14] are especially highlighted. Thus, according to the values of the Hurst exponent and the peak factor, they are similar to other signals formed on the basis of the TS, but their BDS statistics value indicates that they belong to black noise. Therefore, they are recommended for use in data transmission systems with increased secrecy requirements, since of all the considered signals formed on the basis of the TS, they are the closest to white noise. It is noted that most of the studied signals formed on the basis of the TS are close to the signals formed on the basis of classical binary PRS. Based on this, they can also be recommended for use in covert data transmission systems — they can be detected but disclosing their structure will create certain difficulties, since they have the characteristics of classical binary PRS. This indicates that [25] they have parametric mimicry due to the possession of external characteristics of a known signal.