

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ INFOCOMMUNICATION TECHNOLOGIES

УДК 621.391

DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-2-455-464

EDN TAGSYO

К вопросу об использовании методов нелинейной динамики для обнаружения сигналов в присутствии шумов

¹ Осипов Д.Л., ² Гавришев А.А.

¹ Северо-Кавказский федеральный университет,
Россия, 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1

² Московский государственный лингвистический университет,
Россия, 119034, г. Москва, ул. Остоженка, д. 38/1
alexxx.2008@inbox.ru

Аннотация. Целью данной статьи является разработка двухэтапного метода обнаружения сигналов на основе нелинейной динамики в присутствии шумов. Указано, что классическим подходом для обнаружения сигналов в условиях априорной неопределенности является использование энергетического обнаружителя и его различных модификаций. Показано, что указанный подход обладает определенными недостатками, в частности, зависимостью порога обнаружения от неизвестной в общем случае спектральной плотности мощности шума и некоторыми другими. Показано, что перспективным подходом к обнаружению сигналов является использование методов нелинейной динамики. Проведенные результаты из известных источников показывают, что различные методы обнаружения сигналов на основе нелинейной динамики обладают как своими достоинствами, так и своими недостатками. Перспективным подходом для того, чтобы использовать их лучшие качества и нивелировать влияние недостатков, является комплексное применение совокупности методов нелинейной динамики для обнаружения сигналов в присутствии шумов. С учетом результатов из отдельных научных работ разработан двухэтапный метод обнаружения сигналов на основе показателя Херста H и BDS-статистики $w(\epsilon)$, приведено его описание. Проведена оценка разработанного метода обнаружения сигналов на примере широко используемых в инфокоммуникационных системах сигналов. Обобщенные выводы по результатам проведенного исследования показывают, что совместное применение показателя Херста H и BDS-статистики $w(\epsilon)$ позволяет с достаточно высокой достоверностью обнаруживать различные классы сигналов, отношение сигнал/шум которых составляет порядка $SNR > -8$ дБ. Полученные результаты, в зависимости от области их приложения, в перспективе могут помочь в разработке усовершенствованных методов обеспечения надежной обработки информации и обеспечения помехоустойчивости информационных коммуникаций для целей передачи, хранения и защиты информации, а также оценке указанных показателей.

Ключевые слова: сигнал, шумы, показатель Херста, BDS-статистика, двухэтапный метод

Для цитирования: Осипов Д.Л., Гавришев А.А. 2025. К вопросу об использовании методов нелинейной динамики для обнаружения сигналов в присутствии шумов. *Экономика. Информатика*, 52(2): 455–464. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-2-455-464 EDN TAGSYO



On the Use of Nonlinear Dynamics Methods for Detecting Signals in the Presence of Noise

¹ Dmitriy L. Osipov, ² Aleksey A. Gavrishchev

¹North-Caucasus Federal University
1 Pushkin St., Stavropol 355017, Russia

²Moscow State Linguistic University
38/1 Ostozhenka St., Moscow 119034, Russia
alexxx.2008@inbox.ru

Abstract. The purpose of this article is to develop a two-stage method for detecting signals based on nonlinear dynamics in the presence of noise. It is indicated that the classical approach for detecting signals is the use of an energy detector and its various modifications. Certain disadvantages of this approach are shown, in particular, the dependence of the detection threshold on the generally unknown spectral noise power density and some others. The study reveals that a promising approach to the detection of signals is the use of nonlinear dynamics methods. The results obtained from known sources show that various methods of detecting signals based on nonlinear dynamics have both advantages and disadvantages. An integrated application of a set of nonlinear dynamics methods for detecting signals in the presence of noise is a promising approach which makes it possible to use their best qualities and offset the influence of disadvantages. Taking into account individual results from some sources, the authors have developed a two-stage method for detecting signals based on Hurst exponent H and BDS-statistics $w(\epsilon)$, providing a description. The evaluation of the developed method for detecting signals is carried out using the example of signals widely used in info-communication systems. The generalized conclusions based on the results of the study show that the combined use of Hurst exponent H and BDS-statistics $w(\epsilon)$ makes it possible to detect various classes of signals with sufficiently high reliability, the signal-to-noise ratio of which is on the order of $\text{SNR} > -8$ dB. The results obtained, depending on the field of their application, may help in future development of improved methods for ensuring reliable information processing and ensuring noise immunity of information communications for the purposes of transmitting, storing and protecting information, as well as evaluating these indicators.

Keywords: signal, noise, Hurst exponent, BDS-statistic, two-stage method

For citation: Osipov D.L., Gavrishchev A.A. 2025. On the Use of Nonlinear Dynamics Methods for Detecting Signals in the Presence of Noise. *Economics. Information technologies*, 52(2): 455–464 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-2-455-464 EDN TAGSYO

Введение

Обнаружение сигналов на фоне помех является одной из важнейших задач в различных инфокоммуникационных системах, например, в системах Интернета вещей, построенных на основе систем радиосвязи. Такие системы всегда функционируют в условиях априорной неопределенности относительно вероятностей появления обнаруживаемых сигналов, а также априорной неопределенности относительно статистических характеристик сигналов и помех. В указанных условиях разработка методов обеспечения надежной обработки информации и обеспечения помехоустойчивости информационных коммуникаций для целей передачи, хранения и защиты информации, а также оценка таких показателей является достаточно сложной задачей. Кроме того, это может накладывать определенные требования на структуру функциональных операций, выполняемых при обнаружении, когда форма обнаруживаемого сигнала заранее неизвестна и оптимальный приемник нереализуем [Варакин, 1985; Гавришев, Осипов, 2021; Мухамедов и др., 2021].

В настоящее время классическим подходом для обнаружения сигналов в условиях априорной неопределенности является использование энергетического обнаружителя и его различных модификаций [Варакин, 1985; Гавришев, Осипов, 2021; Мухамедов и др., 2021]. Обычно энергетический обнаружитель представляет собой каскадно соединенные линейный

полосовой фильтр, квадратор, интегратор на интервале времени наблюдения и пороговое устройство. Ввиду универсальности энергетический обнаружитель широко применяется в случае приема как детерминированных, так и случайных сигналов. Однако недостатком данного обнаружителя является зависимость порога обнаружения от неизвестной в общем случае спектральной плотности мощности шума, что не гарантирует постоянного уровня ложных тревог при изменяющейся интенсивности помех. Кроме того, прогресс в развитии радиотехнических систем в различных отраслях предопределяет переход к использованию сигналов с повышенной энергетической и структурной скрытностью [Варакин, 1985; Studenikin, Zhuk, 2021; Белов и др., 2023]. Все это обуславливает необходимость использования альтернативных способов обнаружения сигналов в условиях априорной неопределенности, которые возможно будет использовать для разработки методов обеспечения надежной обработки информации и обеспечения помехоустойчивости информационных коммуникаций для целей передачи, хранения и защиты информации, а также оценки таких показателей.

В последние годы набор традиционных методов обнаружения сигналов в условиях априорной неопределенности существенно расширен методами на основе нелинейной динамики [Васюта, 2010; Альтман и др., 2013; Кузовников, Семкин, 2014; Kehui Sun, 2016; Гавришев, Жук, 2018; Гавришев, 2018; Гавришев, Осипов, 2021; Мухамедов и др., 2021]. Эти методы позволяют выявлять закономерности в поведении процессов там, где ранее считалось, что их не существует. Нелинейные методы анализа сигналов позволяют отличать хаотические колебания от случайных процессов, различать «цвет шума» и др. Однако большинство из известных методов нелинейного анализа применяются в основном для идеализированных условий помеховой обстановки (сигналы наблюдаются без шума) [Васюта, 2010; Kehui Sun, 2016]. Такое упрощение реальной помеховой обстановки может значительно ограничивать возможности таких методов на практике. Поэтому важно оценить границы возможного применения методов нелинейного обнаружения сигналов при наличии шума.

Анализ предметной области

Рассмотрим известные подходы по обнаружению сигналов в условиях априорной неопределенности, основанные на использовании нелинейной динамики.

Так, в работе [Васюта, 2010] предложен алгоритм обнаружения различных классов сигналов с помощью показателя Херста H на основе использования R/S -статистики. Показано, что возможности данного метода анализа различных сигналов существенно ограничиваются с увеличением вклада шума в аддитивной смеси наблюдения.

В работе [Кузовников, Семкин, 2014] предложен способ обнаружения случайных низкоэнергетических гармонических сигналов, основанный на исследовании фрактальных свойств принимаемых сигналов. Их обнаружение, согласно приведенному источнику, выполняется путем оценки значения показателя Херста H и сравнения его с порогом. При этом способ позволяет получать достаточно достоверные результаты при отношениях сигнал/шум обрабатываемого сигнала порядка $SNR \geq -10$ дБ.

В ряде работ [Альтман и др., 2013; Гавришев, 2018] и списках литературы к ним предлагается использовать для обнаружения сигналов подход, основанный на использовании BDS-статистики $w(\varepsilon)$, которая базируется на статистических свойствах корреляционной размерности исследуемого процесса в фазовом пространстве и определяется корреляционным интегралом. Представленный подход, согласно приведенным источникам, позволяет обнаруживать сигналы уже при отрицательном отношении сигнал/шум.

В работе [Мухамедов и др., 2021] предложен подход по обнаружению широкополосных сигналов, основанный на использовании фрактального анализа спектрограмм сигнала. Представленный подход, согласно источнику, позволяет с определенной достоверностью обнаруживать широкополосные сигналы при отношении сигнал/шум $SNR \geq -7$ дБ.



Несмотря на свои достоинства, по сравнению с методами на основе энергетических показателей, у методов на основе нелинейной динамики так же имеются некоторые недостатки:

1) точность подходов на основе использования показателя Херста H ограничена тем, что она не учитывает информацию о структуре процесса, которая сохраняется в значениях корреляционных размерностей его образа в псевдофазовом пространстве вложения [Васюта, 2010]. Кроме того, некоторые авторы полагают [Поршнев, Соломаха, Пономарева, 2020], что показатель Херста H обладает недостатком, заключающимся в его зависимости от параметров исследуемого временного ряда, что также снижает его точность;

2) фрактальная размерность также не лишена недостатков, среди которых указываются, например, [Kehui Sun, 2016], что существует достаточно много методик оценки фрактальной размерности, которые могут приводить к несколько различным, но близким вычислительным результатам. Кроме того, известно [Ваврив, Рябов, 1989], что точность определения фрактальной размерности зависит от уровня разрешения, которого удастся достичь в конкретном численном эксперименте. Таким образом, возникает проблема построения численных алгоритмов, позволяющих при фиксированном (максимально возможном для данной ЭВМ) уровне разрешения получить наиболее точный результат при расчете фрактальной размерности;

3) BDS-статистика $w(\varepsilon)$ также не лишена недостатков, одним из таких недостатков является необходимость заранее определять некоторые ее параметры, из-за чего может быть также снижена ее точность [Kocenda, Briatka, 2005].

Несмотря на озвученные недостатки, методы обнаружения сигналов на основе нелинейной динамики являются перспективным направлением и требуют дальнейшей проработки.

Цель работы

Целью данной статьи является разработка двухэтапного метода обнаружения сигналов на основе нелинейной динамики в присутствии шумов.

Результаты и их обсуждение

Проведенные результаты из известных источников показывают, что различные методы обнаружения сигналов на основе нелинейной динамики обладают как своими достоинствами, так и своими недостатками. Перспективным подходом для того, чтобы использовать их лучшие качества и уменьшить влияние недостатков, является комплексное применение совокупности методов нелинейной динамики для обнаружения сигналов в присутствии шумов [Гавришев, 2018; Гавришев, Жук, 2018; Гавришев, Осипов, 2023].

С учетом отдельных результатов из работ [Васюта, 2010; Альтман и др., 2013; Кузовников, Семкин., 2014; Akintunde Mutairu Oyewale, 2015; Kehui Sun, 2016; Гавришев, 2018; Гавришев, Жук, 2018; Nazarychev et al., 2019; Гавришев, Осипов, 2021; Мухамедов и др., 2021; Гавришев, Осипов, 2023; Гавришев, Осипов, 2024], разработанный двухэтапный метод обнаружения сигналов будет иметь следующий вид:

- 1) прием сигнала в присутствии шумов;
- 2) вычисление значения показателя Херста H принятого сигнала с помощью выражения

$R / S = (\tau / 2)^H$, где R – нормированный размах вариации (разность максимального и минимального значений измеряемого параметра), S – стандартное отклонение (корень квадратный от дисперсии), τ – период (длина ряда) наблюдений;

- 3) сравнение полученного значения показателя Херста H с пороговым значением:

3.1) в случае значения показателя Херста $H < 0.5$ принимается решение об обнаружении сигнала;

3.2) в случае значения показателя Херста $H \geq 0.5$ принимается предварительное решение об отсутствии сигнала и осуществляется переход к следующему пункту;

4) вычисление значения BDS-статистики $w(\varepsilon)$ принятого сигнала с помощью выражения

$$w(\varepsilon) = \sqrt{N-m+1} \frac{C_{m,N}(\varepsilon) - C_{1,N-m}(\varepsilon)^m}{\sigma_{m,N}(\varepsilon)}, \text{ где } C_{m,N}(\varepsilon) \text{ и } C_{1,N-m}(\varepsilon) - \text{корреляционные интегралы, а}$$

$\sigma_{m,N}(\varepsilon)$ – среднеквадратическое отклонение;

5) сравнение полученного значения BDS-статистики $w(\varepsilon)$ с пороговым значением:

5.1) в случае значения показателя $w(\varepsilon) > |1.96|$, принимается решение об обнаружении сигнала;

5.2) в случае значения показателя $w(\varepsilon) \leq |1.96|$, принимается решение об отсутствии сигнала.

Блок-схема алгоритма, реализующего разработанный двухэтапный метод обнаружения сигналов, приведена рис. 1.

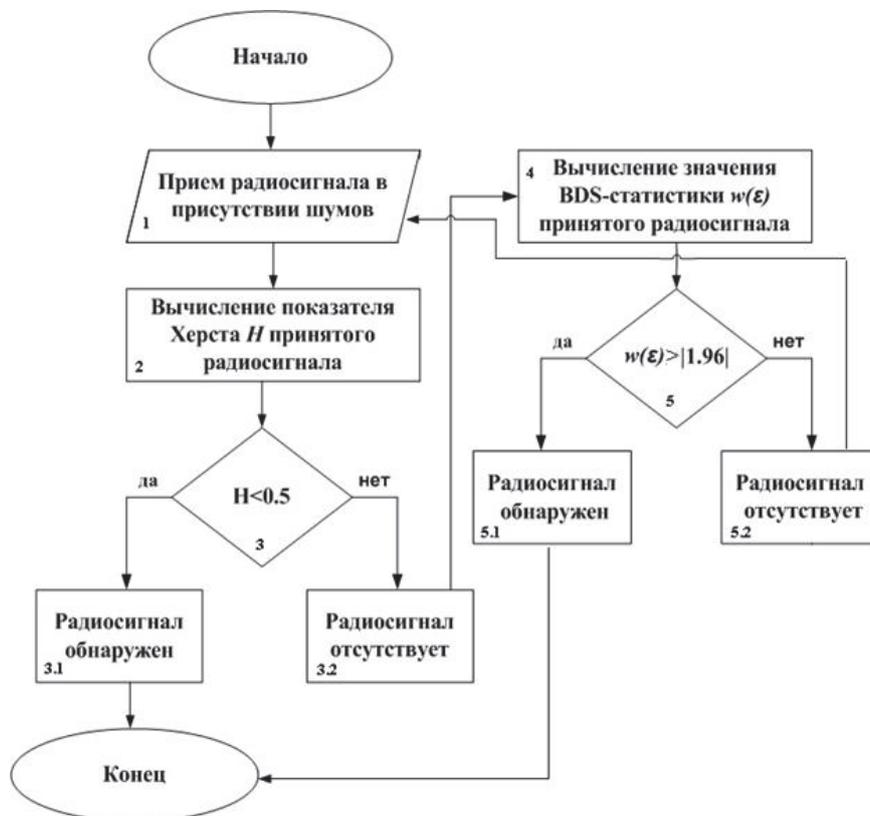


Рис. 1. Блок-схема алгоритма, реализующего разработанный двухэтапный метод обнаружения сигналов

Fig. 1. A block diagram of an algorithm implementing the developed two-stage method for detecting signals

Для оценки предлагаемого авторами метода обнаружения сигналов были взяты широко используемые в инфокоммуникационных системах сигналы [Варакин, 1985; Альтман и др., 2013; Гавришев, 2018; Гавришев, Жук, 2018; Мухамедов и др., 2021; Гавришев, Осипов, 2021; Гавришев, Осипов, 2023; Гавришев, Осипов, 2024]: гармонические сигналы (ГС), шумоподобные сигналы на основе m -последовательностей (ШПС), сверхширокополосные сигналы на основе моноцикла Гаусса (СШПС) и хаотические сигналы на основе возмущенного осциллятора Ван дер Поля (ХС). С помощью методов имитационного моделирования, на основе рекомендаций из работ [Варакин, 1985; Альтман и др., 2013; Гавришев, 2018; Гавришев, Жук, 2018; Мухамедов и др., 2021; Гавришев, Осипов, 2021; Гавришев, Осипов,

2023; Гавришев, Осипов, 2024], было получено 50 последовательностей для каждого из типов сигналов и проведено вычисление значений показателя Херста H и BDS-статистики $w(\varepsilon)$ при различных отношениях сигнал/шум SNR . В качестве шума использовался гауссов белый шум.

Полученные результаты приведены на рис. 2 и 3. Как видно из рис. 2, в среднем при отношении сигнал/шум $SNR < -5$ дБ показатель Херста становится равен $H=0.5$ для всех видов типов исследуемых сигналов, то есть показатель Херста H характеризует такие сигналы, как белый шум. При увеличении отношения сигнал/шум SNR показатель Херста H уменьшается и при больших значениях отношения сигнал/шум SNR стабилизируется. С помощью проведенного моделирования установлено, что использование показателя Херста H в качестве критерия обнаружения позволяет с достаточно высокой достоверностью обнаруживать исследуемые сигналы, отношение сигнал/шум которых составляет порядка $SNR > -5$ дБ. По сравнению с известными исследованиями при использовании показателя Херста H , например, [Кузовников, Семкин, 2014], уточнено, что ШПС обладают большей скрытностью, чем ГС. Также подтверждено, что ХС обладают скрытностью не хуже, чем известные ШПС и СШПС. Указанные результаты полностью согласуются с известными исследованиями [Варакин, 1985; Альтман и др., 2013; Гавришев, 2018; Гавришев, Жук, 2018; Мухамедов и др., 2021; Гавришев, Осипов, 2021; Гавришев, Осипов, 2023; Гавришев, Осипов, 2024].

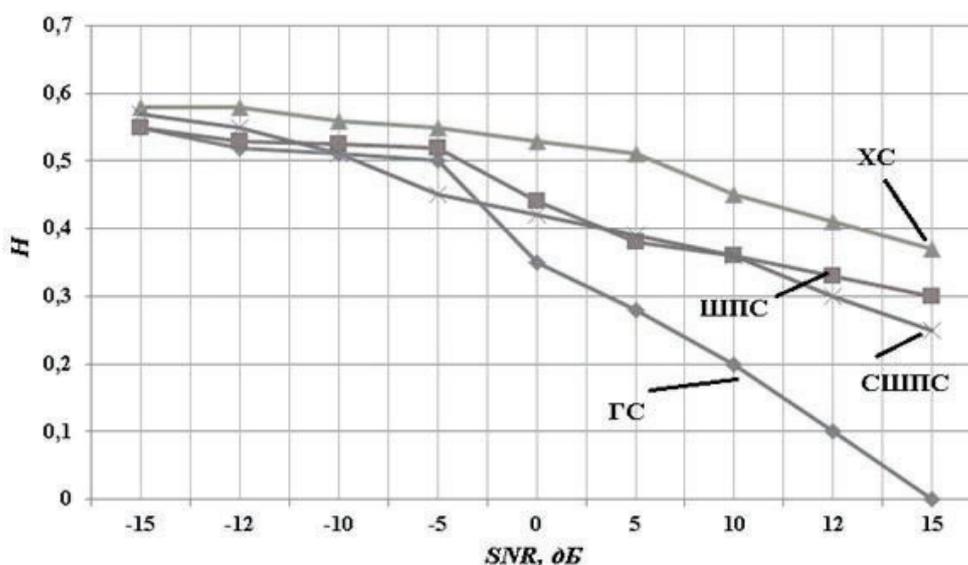


Рис. 2. График зависимости значения показателя Херста H для различных видов сигналов от отношения сигнал/шум SNR

Fig. 2. Graph of the dependence of the value of Hurst exponent H for various types of signals on the signal-to-noise ratio SNR

Как видно из рис. 3, в среднем при отношении сигнал/шум $SNR < -8$ дБ значение BDS-статистики $w(\varepsilon) \leq |1.96|$ для всех видов типов исследуемых сигналов, то есть BDS-статистика $w(\varepsilon)$ характеризует такие сигналы, как белый шум. При увеличении отношения сигнал/шум SNR значение BDS-статистики $w(\varepsilon)$ возрастает и при больших значениях отношения сигнал/шум SNR стабилизируется. С помощью проведенного моделирования установлено, что использование BDS-статистики $w(\varepsilon)$ в качестве критерия обнаружения позволяет с достаточно высокой достоверностью обнаруживать исследуемые сигналы, отношение сигнал/шум которых составляет порядка $SNR > -8$ дБ. По сравнению с известными исследованиями, например, [Мухамедов, Уткин, Войнов, 2021], удалось достичь несколько меньшего отношения сигнал/шум SNR , при котором возможно обнаружение сигналов. Также подтверждено, что ШПС обладают большей скрытностью, чем ГС, и то, что ХС обладают скрытностью не хуже, чем известные ШПС и СШПС. Указанные результаты

полностью согласуется с известными исследованиями [Варакин, 1985; Альтман и др., 2013; Гавришев, 2018; Гавришев, Жук, 2018; Мухамедов и др., 2021; Гавришев, Осипов, 2021; Гавришев, Осипов, 2023; Гавришев, Осипов, 2024].

Обобщенные выводы по результатам проведенного исследования показывают, что совместное применение показателя Херста H и BDS-статистики $w(\varepsilon)$ позволяет обнаруживать сигналы, отношение сигнал/шум которых составляет порядка $SNR > -8$ дБ. Кроме того, использование одновременно двух методов на основе нелинейной динамики в разработанном методе на различных этапах обнаружения сигналов в перспективе позволит увеличить вероятность их обнаружения по сравнению с методами, в которых используется один критерий.

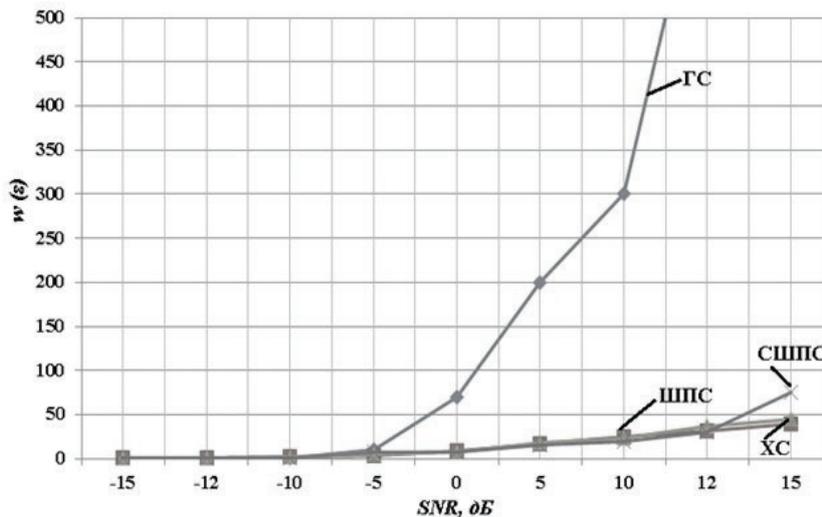


Рис. 3. График зависимости значения BDS-статистики $w(\varepsilon)$ для различных видов сигналов от отношения сигнал/шум SNR

Fig. 3. Graph of the dependence of the value of BDS-statistics $w(\varepsilon)$ for various types of signals on the signal-to-noise ratio SNR

Заключение

Таким образом, в данной работе разработан двухэтапный метод обнаружения сигналов на основе нелинейной динамики в присутствии шумов. Указано, что классическим подходом для обнаружения сигналов в условиях априорной неопределенности является использование энергетического обнаружителя и его различных модификаций. Показано, что указанный подход обладает определенными недостатками. Показано, что перспективным подходом к обнаружению сигналов является использование методов нелинейной динамики. Проведенные результаты из известных источников показывают, что различные методы обнаружения сигналов на основе нелинейной динамики обладают как своими достоинствами, так и своими недостатками. Перспективным подходом для того, чтобы использовать их лучшие качества и нивелировать влияние недостатков, является комплексное применение совокупности методов нелинейной динамики для обнаружения сигналов в присутствии шумов. С учетом результатов из отдельных работ разработан двухэтапный метод обнаружения сигналов в присутствии шумов на основе показателя Херста H и BDS-статистики $w(\varepsilon)$, приведено его описание. Проведена оценка разработанного метода обнаружения сигналов на примере широко используемых в инфокоммуникационных системах сигналов. Обобщенные выводы по результатам проведенного исследования показывают, что совместное применение показателя Херста H и BDS-статистики $w(\varepsilon)$ позволяет с достаточно высокой достоверностью обнаруживать сигналы, отношение сигнал/шум которых составляет порядка $SNR > -8$ дБ. Кроме того, использование одновременно двух методов на основе нелинейной динамики в разработанном методе на различных этапах обнаружения сигналов в перспективе позволит увеличить вероятность их обнаружения по сравнению с методами, в которых используется один критерий.

Полученные результаты, в зависимости от области их приложения, например, для технологии Интернета вещей, в перспективе могут помочь в разработке усовершенствованных методов обеспечения надежной обработки информации и обеспечения помехоустойчивости информационных коммуникаций для целей передачи, хранения и защиты информации, а также оценке указанных показателей.

Список литературы

- Альтман Е.А., Малютин А.Г., Чижма С.Н. 2013. Повышение скрытности шумоподобных сигналов в системах радиосвязи. Радиотехника, электроника и связь («РЭиС-2013»): Сборник докладов II Международной научно-технической конференции. Омск: Омский научно-исследовательский институт приборостроения: 329–337.
- Белов С.П., Сердюков В.С., Белов А.С., Скобченко Е.В. 2023. О формировании и обработке сложных канальных сигналов на основе частотно-временных матриц. *Экономика. Информатика*, 50(1): 211–218. DOI 10.52575/2687-0932-2023-50-1-211-218
- Ваврив Д.М., Рябов В.Б. 1989. Фрактальная размерность: проблемы вычислений. *Журнал вычислительной математики и математической физики*, (7): 987–999.
- Варакин Л.Е. 1985. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 384 с.
- Васюта К.С. 2010. Оценка границ применимости R/S-статистики для фрактального анализа хаотических процессов, искаженных аддитивным белым гауссовским шумом. *ЗНИХУПС*, (1): 75–79.
- Гавришев А.А. 2018. Моделирование и количественно-качественный анализ распространенных защищенных систем связи. *Прикладная информатика*, (5): 84–122.
- Гавришев А.А., Жук А.П. 2018. Применение методов нелинейной динамики для исследования хаотичности сигналов-переносчиков защищенных систем связи на основе динамического хаоса. *Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии*, (1): 50–60. DOI 10.25205/1818-7900-2018-16-1-50-60
- Гавришев А.А., Осипов Д.Л. 2021. Применение методов нелинейной динамики для обнаружения радиосигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты, используемых в каналах связи беспилотных летательных аппаратов. *Сибирский пожарно-спасательный вестник*, (1): 68–74. DOI 10.34987/vestnik.sibpsa.2021.20.1.012.
- Гавришев А.А., Осипов Д.Л. 2023. Построение обобщенного критерия оценки качества криптостойких кодовых последовательностей, используемых в защищенных беспроводных системах связи. *Научное приборостроение*, (4): 111–118.
- Гавришев А.А., Осипов Д.Л. 2024. Анализ свойств сверхширокополосных сигналов, влияющих на скрытность и надежность передачи данных в системах радиосвязи. *Научное приборостроение*, (2): 112–120.
- Кузовников А.В., Семкин П.В. 2014. Способ обнаружения случайных низкоэнергетических сигналов. Патент РФ 2511598: 8.
- Мухамедов Р.Р., Уткин В.В., Войнов Д.С. 2021. Способ обнаружения шумовых сигналов источников радиоизлучения на основе фрактального анализа. *Программные продукты и системы*, (1): 195–200. DOI: 10.15827/0236-235X.133.195-200
- Поршнева С.В., Соломаха Э.В., Пономарева О.А. 2020. Об особенностях оценок показателя Херста классического броуновского движения, вычисляемых с помощью метода R/S-анализа. *International Journal of Open Information Technologies*, (10): 45–50.
- Akintunde Mutairu Oyewale. 2015. Detection of Non-Linearity in the Time Series Using BDS Test. *Journal of Applied Mathematics and Statistics*. (3):184. DOI:10.11648/j.sjams.20150304.13
- Kehui Sun. 2016. Chaotic Secure Communication: Principles and Technologies. Tsinghua University Press and Walter de Gruyter GmbH, 333 p.
- Kočenda E., Briatka L. 2005. Optimal Range for the IID Test Based on Integration across the Correlation Integral. *Econometric Reviews, Taylor & Francis Journals*, (24): 265–296.
- Nazarychev S.A. et al. 2019. Classification of time series using the Hurst exponent. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series (1328):012056. DOI:10.1088/1742-6596/1328/1/012056
- Studenikin A.V., Zhuk A.P. 2021. Software model for the synthesis of increased volumes of systems of discrete orthogonal code sequences. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 1069(1):012039. DOI:10.1088/1757-899X/1069/1/012039

References

- Al'tman E.A., Maljutin A.G., Chizhma S.N. 2013. Povyshenie skrytnosti shumopodobnyh signalov v sistemah radiosvjazi [Increasing the stealth of noise-like signals in radio communication systems]. Radio engineering, electronics and communications ("REIS-2013"): collection of reports of the II International Scientific and Technical Conference. Omsk: Omskij nauchno-issledovatel'skij institut priborostroenija Publ.: 329–337.
- Belov S.P., Serdyukov V.S., Belov A.S., Skobchenko E.V. 2023. On the Formation and Processing of Complex Channel Signals Based on Time-Frequency Matrices. *Economics. Information technologies*, 50(1): 211–218 (in Russian). DOI: 10.52575/2687-0932-2023-50-1-211-218
- Vavriv D.M., Ryabov V.B. 1989. Fraktal'naja razmernost': problemy vychislenij [Fractal dimension: problems of calculations]. *Journal of Computational mathematics and mathematical physics*, (7): 987–999.
- Varakin L.E. 1985. Sistemy svjazi s shumopodobnymi signalami [Communication systems with noise-like signals]. Moscow: Radio i svjaz' Publ., 384.
- Vasyuta C.S. 2010. Assessment of the limits of applicability of R/S statistics for fractal analysis of chaotic processes distorted by additive white Gaussian noise. *ZNPHUPS*, (1): 75–79 (in Russian).
- Gavrishev A.A. 2018. Modeling and quantitative and qualitative analysis of common secure communication systems. *Journal of Applied Informatics*, (5): 84–122 (in Russian).
- 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*, (1): 50–60 (in Russian). DOI 10.25205/1818-7900-2018-16-1-50-60. ISSN 1818-7900.
- Gavrishev A.A., Osipov D.L. 2021. Application of nonlinear dynamics methods for detecting radio signals with frequency-hopping spread spectrum used in communication channels of unmanned aerial vehicles. *Siberian Fire and Rescue Bulletin*, (1): 68–74 (in Russian). DOI 10.34987/vestnik.sibpsa.2021.20.1.012.
- Gavrishev A.A., Osipov D.L. 2023. Building of a generalized quality assessment criterion cryptographic code sequences used in secure wireless communication systems. *Nauchnoe priborostroenie*, (4): 111–118 (in Russian).
- Gavrishev A.A., Osipov D.L. 2024. Analysis of the properties of ultra-wideband signals affecting the secrecy and reliability of data transmission in radio communication systems. *Nauchnoe priborostroenie*, (2): 112–120 (in Russian).
- Kuzovnikov A.V., Semkin P.V. 2014. Method of detecting random low-energy signals. Patent RF, no. 2511598: 8. (in Russian).
- Mukhamedov R.R., Utkin V.V., Voinov D.S. 2021. Method for detecting source noise signals of the radio emission based on fractal analysis. *Software & Systems*, (1): 195–200 (in Russian). DOI: 10.15827/0236-235X.133.195-200.
- Porshnev S.V., Solomaha Je.V., Ponomareva O.A. 2020. Peculiarities of estimating the Hurst exponent of classical brownian motion, using the R/S analysis. *International Journal of Open Information Technologies*, (10): 45–50 (in Russian).
- Akintunde Mutairu Oyewale. 2015. Detection of Non-Linearity in the Time Series Using BDS Test. *Journal of Applied Mathematics and Statistics*, (3):184. DOI:10.11648/j.sjams.20150304.13
- Kehui Sun. 2016. Chaotic Secure Communication: Principles and Technologies. Tsinghua University Press and Walter de Gruyter GmbH, 333 p.
- Kočenda E., Briatka L. 2005. Optimal Range for the IID Test Based on Integration across the Correlation Integral. *Econometric Reviews, Taylor & Francis Journals*, (24): 265–296.
- Nazarychev S.A. et al. 2019. Classification of time series using the Hurst exponent. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series (1328):012056. DOI:10.1088/1742-6596/1328/1/012056
- Studenikin A.V., Zhuk A.P. 2021. Software model for the synthesis of increased volumes of systems of discrete orthogonal code sequences. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 1069(1):012039. DOI:10.1088/1757-899X/1069/1/012039

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 16.12.2024

Received December 16, 2024

Поступила после рецензирования 19.04.2025

Revised April 19, 2025

Принята к публикации 22.04.2025

Accepted April 22, 2025



ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Осипов Дмитрий Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерной безопасности, Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Россия

Гавришев Алексей Андреевич, кандидат технических наук, доцент кафедры международной информационной безопасности, Московский государственный лингвистический университет, г. Москва, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitrij L. Osipov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Security, North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

Aleksey A. Gavrishev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of International Information Security, Moscow State Linguistic University, Moscow, Russia