

УДК 614.8: 621.396
doi: 10.34987/vestnik.sibpsa.2021.20.1.012

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ С ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В КАНАЛАХ СВЯЗИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*Гавришев А.А.; Осипов Д.Л., к.т.н., доцент
ФГАОУ ВО Северо-Кавказский федеральный университет*

Аннотация. Проведен анализ известных подходов для радиочастотного обнаружения каналов связи беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), основанных на использовании радиосигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ). Установлено, что в большинстве работ для обнаружения радиосигналов данного типа используются в основном методы, основанные на энергетических показателях. Указано [21-24], что энергетические показатели дают заниженные показатели обнаружения радиосигналов и, таким образом, усложняют задачу их обнаружения. В качестве альтернативного решения задачи обнаружения радиосигналов предлагается обратиться к известным методам на основе нелинейной динамики, в частности к показателю Херста и BDS-статистике. Показано, что средства радиочастотного обнаружения каналов управления БПЛА с ППРЧ, в основу которых будет положено использование показателя Херста, потенциально не смогут их обнаружить. Показано, что средства радиочастотного обнаружения каналов управления БПЛА с ППРЧ, в основу которых будет положено использование BDS-статистики, потенциально смогут их обнаружить. Полученные результаты имеют достаточно важное практическое значение, так как потенциально позволяют, при соответствующей адаптации, осуществлять более эффективное радиочастотное обнаружение БПЛА, использующих радиосигналы с ППРЧ.

Ключевые слова: БПЛА, каналы связи, ППРЧ, радиочастотное обнаружение, нелинейная динамика.

APPLICATION OF NONLINEAR DYNAMICS METHODS FOR DETECTING RADIO SIGNALS WITH FREQUENCY-HOPPING SPREAD SPECTRUM USED IN COMMUNICATION CHANNELS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

*Gavrishev A.A.; Osipov D.L., Ph.D. of Engineering Sciences, Docent
FSAEI HPE NCFU*

Abstract. The analysis of known approaches for radio frequency detection of communication channels of unmanned aerial vehicles (UAVs) based on the use of radio signals with frequency-hopping spread spectrum (FHSS) is carried out. It is established that in most studies methods, based on energy indicators are mainly used to detect radio signals of this type. It is indicated [21-24] that energy indicators give underestimated indicators for detecting radio signals and, thus, complicate the task of detecting them. As an alternative solution to the problem of detecting radio signals, it is proposed to use well-known methods based on nonlinear dynamics, in particular, the Hurst exponent and BDS-statistics. It is shown that the means of radio-frequency detection of UAV control channels with FHSS, which will be based on the use of the Hurst exponent, will potentially not be able to detect them. It is shown that the means of radio-frequency detection of UAV control channels with FHSS, which will be based on the use of BDS-statistics, will potentially be able to detect them. The results obtained are of rather important practical significance, as they potentially allow, with appropriate adaptation, to perform more effective radio frequency detection of UAVs using radio signals with FHSS.

Keywords: UAV, communication channels, FHSS, radio frequency detection, nonlinear dynamics.

Введение

С появлением средних и малых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) задачи противодействия их применению в особо контролируемых зонах (например, промышленные предприятия, объекты топливно-энергетической отрасли и другие), существенно актуализировались. Начиная с середины 2000-х годов в средствах массовой информации стали регулярно появляться сообщения об опасном использовании малых БПЛА в районах аэропортов, а с середины 2010-х – об применении БПЛА для ведения несанкционированного наблюдения за охраняемыми объектами, транспортировки запрещенных грузов, и широком использовании БПЛА в криминальных и других противоправных целях [1]. Неслучайно сегодня актуальными задачами являются проектирование систем обнаружения БПЛА, а так же разработка мер и средств по снижению возникающих от них угроз. Однако, отличить БПЛА от других летательных аппаратов непросто, что объясняется следующими факторами [2;3]: визуальное и звуковое обнаружение затруднено из-за ошибок, вносимых условиями окружающей среды и приводящих к ухудшению производительности системы обнаружения БПЛА; радары могут не обнаружить БПЛА малых форм-факторов; электрооптические датчики могут оказаться неэффективными в неблагоприятных погодных условиях (дождь или туман) и т.д.

Вместе с тем известно [1-6], что большинству современных БПЛА для выполнения задач управляемого полета и передачи видеоданных, требуется наличие действующего постоянного канала связи между БПЛА и пунктом управления. Так же канал связи используется для передачи служебной и иной информации. Из литературы известно [1-6], что во многих распространённых БПЛА используется технология псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ). В связи со сказанным, средства радиочастотного обнаружения, как одни из ключевых элементов систем обнаружения гражданских БПЛА, обладают преимуществами перед другими технологиями в скорости и возможности их обнаружения [1-6]. Отсюда можно заключить, что средства радиочастотного обнаружения БПЛА напрямую соотносятся с радиоразведкой [7], а именно предназначены для обнаружения радиосигналов с ППРЧ. Вместе с тем из литературы известно [7], что помимо обнаружения сигналов, так же существуют и другие шаги: необходимо так же определить структуру передаваемого сигнала и, при необходимости, определить передаваемую информацию. С помощью указанных шагов потенциально возможно подавить или навязать ложные режимы работы радиолиниям передачи данных БПЛА. Однако задача определения факта наличия радиосигналов с ППРЧ является достаточно трудоемкой, так как создание систем связи с ППРЧ предполагает функционирование датчиков псевдослучайных чисел с соответствующими параметрами. Эти параметры отражаются в вероятностной структуре частотно-временной матрицы. Основопологающий принцип построения таких систем предполагает равномерное использование всего множества рабочих частот и псевдошумовую эксплуатацию эфира. Следовательно, правильно спроектированная система связи с ППРЧ обладает шумоподобной структурой эксплуатации частотного ресурса [8-11]. Отсюда следует, что при использовании систем связи с ППРЧ радиоразведка сталкивается с большим количеством разнообразных частотно-временных траекторий, что значительно затрудняет сам факт обнаружения радиосигналов с ППРЧ [8-11].

В данной работе авторы рассматривают первичный этап радиочастотного обнаружения БПЛА по их радиосигналам. С учетом того, что широкое распространение для управления БПЛА получили системы связи с ППРЧ, в данной работе основное внимание будет уделено им.

Целью статьи является экспериментальное исследование возможности обнаружения с помощью методов нелинейной динамики радиосигналов с ППРЧ, применяемых для управления БПЛА.

Краткий обзор известных работ по обнаружению радиосигналов с ППРЧ

Известен ряд подходов для радиочастотного обнаружения каналов связи БПЛА, основанных на использовании радиосигналов с ППРЧ. Так в работах [1-3] приведено краткое описание некоторых коммерческих систем противодействия радиоуправляемым БПЛА. Отмечается [1-3], что в целом коммерческие комплексы для противодействия БПЛА являются эффективным средством решения задач обнаружения и подавления каналов управления исключительно широко распространённых малых коммерческих БПЛА-квадрокоптеров. Наличие априорных данных о стандартах связи, используемых для управления БПЛА, а также об уязвимостях криптографических протоколов защиты, встроенных в эти стандарты, позволяет

производителям комплексов реализовывать в них режимы автоматического «взлома» каналов управления, с последующим формированием для них помех, прицельных по частоте и структуре полезного сигнала, имитирующих команды управления «посадка» или «снижение» [1-3]. Однако такая строгая ориентированность комплексов на малые коммерческие БПЛА существенно снижает возможности данных комплексов по противодействию БПЛА, имеющим другие, отличные от широко используемых, частоты и стандарты каналов управления. В работе [12] для обнаружения радиосигналов с ППРЧ предлагается использовать энергетические обнаружители. Приведено подробное описание их структур и принципов работы. В работе [13] предложен алгоритм обнаружения радиосигналов дистанционного управления БПЛА с ППРЧ, в основе которого лежит накопление значений частот, соответствующих максимумам спектральной плотности мощности последовательных реализаций быстрого преобразования Фурье, и их дальнейшая обработка с формированием статистики – квадрата отклонений элементов данного вектора от некоторого среднего значения, а также ее сравнение с предельными значениями. В работе [14] для успешного обнаружения частотных характеристик радиосигналов с ППРЧ предлагается использовать оконное и быстрое преобразование Фурье. В работе [15] предложен быстрый алгоритм обнаружения радиосигнала с ППРЧ с преамбулой в виде отрезка комплексной синусоиды. Предложенный алгоритм оказался незначительно хуже, чем оптимальный алгоритм обнаружения сигналов с ППРЧ, при этом время выполнения оказалось в 64 раза более быстрым. В работах [16, 17] разработан метод, позволяющий обнаружить сигналы управления группы БПЛА с ППРЧ, классифицировать обнаруженные сигналы (определить закон чередования частот) и подать сигналы управления за время нахождения БПЛА в зоне подавления. Предложен оптимальный по обобщенному критерию максимального правдоподобия алгоритм различения гипотез о наличии части пакета сигнала управления БПЛА в контрольной выборке. В работе [18] рассматривается задача обнаружения системы связи с БПЛА на основе ППРЧ, работающей в реальных условиях (холмистая местность, наличие деревьев). Для решения указанной задачи применяются технологии оконного преобразования Фурье и автокорреляционной функции, что позволяет проводить дифференциацию каждого БПЛА. В работе [19] рассмотрена вероятность перехвата сигналов с ППРЧ для одноканального и многоканального передатчика при одночастотных скачках в различных типах перекрывающихся частотных диапазонов. По разработанным аналитическим выражениям производится расчет вероятности перехвата единичного сигнала с ППРЧ. В результате проведенных исследований было расширено применение методов обнаружения сигналов с ППРЧ для случаев, когда полоса частот передатчика и приемника отличаются. В работе [20] рассматриваются методы обнаружения сигналов с ППРЧ, основанные на использовании последовательного сканирования небольших участков спектра с помощью известной технологии «Sweeping Spectrum Analyzer», позволяющей проводить спектральный анализ в широких частотных диапазонах. Предложен подход, который позволяет использовать технологию «Sweeping Spectrum Analyzer» без ее основных недостатков (например, низкой производительности).

Проведенный обзор работ по обнаружению радиосигналов с ППРЧ показывает, что в большинстве работ для обнаружения радиосигналов данного типа используются различные линейные методы, в особенности, основанные на энергетических показателях. Вместе с тем, в ряде работ, например [21-24], показано, что энергетические показатели дают заниженные показатели обнаружения радиосигналов и, таким образом, усложняют задачу их обнаружения. В качестве альтернативного решения задачи обнаружения радиосигналов в настоящее время возможно выделить относительно новое направление, основанное на методах нелинейной динамики [21-24]. К таким методам можно отнести, например, показатель Хёрста H , BDS-статистику $\bar{w}(\varepsilon)$ и некоторые другие [21-25]. Рассмотрим их более подробно.

Как известно [25], показатель Хёрста H позволяет разделить между собой периодические и случайные процессы. Показатель Хёрста H описывается выражением, представленным формулой (1) [25]:

$$R / S = (\tau / 2)^H \quad (1)$$

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

В соответствии с [25], 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.

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 [23; 24].

BDS-статистика основана на статистической величине $w(x)$, описываемой формулой (2) [23; 24]:

$$w_{m,N}(\varepsilon) = \sqrt{N-m+1} \frac{C_{m,N}(\varepsilon) - C_{1,N-m}(\varepsilon)^m}{\sigma_{m,N}(\varepsilon)} \quad (2)$$

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

Задача анализа передаваемого сигнала рассматривается как непараметрическая проверка одной из гипотез: H_0 – наблюдаемые данные $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 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 отсутствие шумов наблюдения применение критерия значимости к статистике $w_{m,N}^{(\varepsilon)}$ позволяет эффективно решать задачу по классификации наблюдений ($w_{m,N}(\varepsilon) \leq |1,96|$) [23; 24].

Вместе с тем, в известной литературе, использование указанных методов нелинейной динамики для обнаружения радиосигналов с ППРЧ встречается относительно редко. Исходя из этого, практический и научный интерес представляет дальнейшее изучение приложений нелинейной динамики к обнаружению радиосигналов с ППРЧ.

Исследовательская часть

Известно [8; 9; 12], что в общем случае система связи на основе ППРЧ состоит из передающей части, включающей в себя кодер данных, модулятор, генератор псевдослучайной последовательности (ПСП), синтезатор частоты, микшер и приемной части, включающей в себя микшер, синтезатор частоты, генератор ПСП, блок синхронизации, демодулятор, декодер данных. На передающей и приемной сторонах используются одинаковые генераторы ПСП, которые позволяют, как расширить спектр передаваемого сообщения, так и сжать его в приемной части. Упрощенная структурная схема системы связи с ППРЧ изображена рисунке 1 [8; 9; 12].



Рис. 1. Упрощенная структурная схема системы связи с ППРЧ

В пакете программ ScicosLab, в соответствии с рисунком 1, авторами построена модель системы связи с ППРЧ. Более подробно с ней возможно ознакомиться в работе [26]. При моделировании авторами получены примерно 50 различных временных реализаций радиосигналов с ППРЧ, длина каждой из них – 5000. В качестве примера на рисунке 2 приведена временная диаграмма передаваемого радиосигнала с ППРЧ, полученного с помощью моделирования [26].

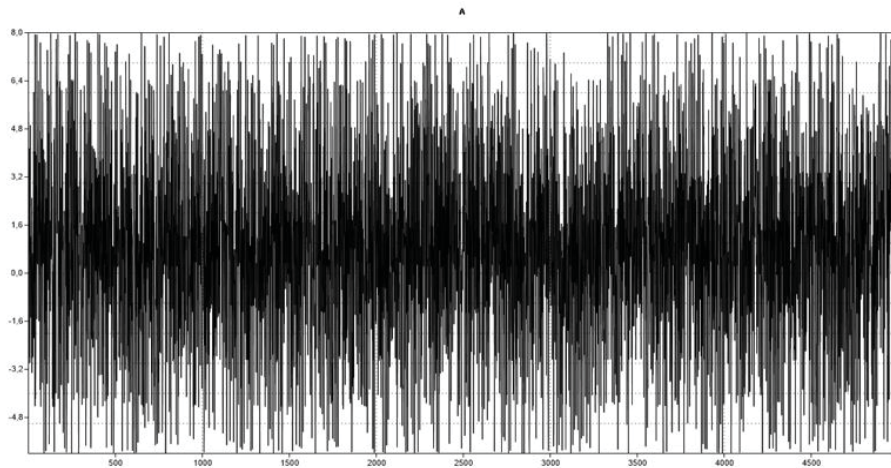


Рис. 2. Временная диаграмма радиосигнала с ППРЧ

Проведем исследование полученных временных реализаций с помощью методов нелинейной динамики. В качестве первого метода нелинейной динамики обратимся к показателю Херста H . Проведем расчеты показателя Херста H для полученных данных. В результате вычислений, проведенных с помощью программы Fractan [22], для радиосигналов с ППРЧ были получены значения показателя Херста, примерно равные $H \approx 0,55$. В соответствии с работами [22; 25; 27], это указывает на то, что радиосигналы с ППРЧ являются близкими к белому шуму, который обладает значением показателя Херста $H \approx 0,5$. Таким образом, можно заключить, что радиосигналы с ППРЧ обладают скрытностью от постороннего наблюдателя [22; 27], в случае использования в качестве метода обнаружения показателя Херста. Это указывает на то, что, в перспективе, средства радиочастотного обнаружения каналов управления БПЛА с ППРЧ, в основу которых будет положено использование показателя Херста, не смогут их обнаружить.

Далее, для обнаружения радиосигналов с ППРЧ, обратимся к BDS-статистике $\bar{w}(\varepsilon)$. Авторами статьи в программе Eviews Student Version Lite были проведены расчеты BDS-статистики $\bar{w}(\varepsilon)$ для полученных данных [22]. В результате вычислений для радиосигналов с ППРЧ были получены значения BDS-статистики, примерно равные $\bar{w}(\varepsilon) \approx 36$. Проведем сравнение полученных результатов с известными исследованиями из данной предметной области. В соответствии с [28] известно, что значения BDS-статистики для известных подходов формирования шумоподобных сигналов и их производных, например фазоманипулированные сигналы, находятся около значений $\bar{w}(\varepsilon) \approx 40$. В работе [22] показано, что система связи на основе прямого расширения спектра, использующая в качестве ПСП m -последовательности, обладает значением BDS-статистики, равным $\bar{w}(\varepsilon) \approx 40$. Обратим внимание на работу [24], в которой приводятся значения BDS-статистики $\bar{w}(\varepsilon)$ для различных моделей сигналов и процессов для систем связи. В соответствии с ней, значению BDS-статистики $\bar{w}(\varepsilon) \approx 40$ соответствует авторегрессионный процесс. Вместе с тем из работы [29] известно, что одной из возможных моделей представления генераторов ПСП, например регистра сдвига с линейной обратной связью и некоторых других, является авторегрессионный процесс. Таким образом, можно заключить, что радиосигналы с ППРЧ потенциально обнаруживаются с помощью BDS-статистики и, таким образом, обладают недостаточной скрытностью от постороннего наблюдателя. Это доказывает перспективность применения BDS-статистики в средствах радиочастотного обнаружения каналов управления БПЛА с ППРЧ.

Заключение

В данной работе авторами проведен анализ известных подходов для радиочастотного обнаружения каналов связи БПЛА [1-3; 12-20], основанных на использовании радиосигналов с ППРЧ. Установлено, что в большинстве работ для обнаружения радиосигналов данного типа используются различные линейные методы, в особенности, основанные на энергетических показателях. Указано [21-24], что энергетические показатели дают заниженные показатели обнаружения радиосигналов и, таким образом, усложняют задачу их обнаружения. В качестве альтернативного решения задачи обнаружения радиосигналов предлагается

обратиться к методам на основе нелинейной динамики [21-24]. Проведено исследование радиосигналов с ППРЧ, полученных в пакете программ ScicosLab [26], с помощью показателя Херста H и BDS-статистики $\bar{w}(\varepsilon)$.

Показано, что радиосигналы с ППРЧ обладают скрытностью от постороннего наблюдателя [22; 27], в случае использования в качестве метода обнаружения показателя Херста, так как они обладают значением показателя Херста ($H \approx 0,55$), близким к значению показателя Херста белого шума ($H \approx 0,5$). Это указывает на то, что, в перспективе, средства радиочастотного обнаружения каналов управления БПЛА с ППРЧ, в основу которых будет положено использование показателя Херста, не смогут их обнаружить. Показано, что радиосигналы с ППРЧ потенциально обнаруживаются с помощью BDS-статистики и, таким образом, обладают недостаточной скрытностью от постороннего наблюдателя, так как они обладают значением BDS-статистики $\bar{w}(\varepsilon) \approx 36$, близким к значению BDS-статистики для известных подходов формирования шумоподобных сигналов и их производных ($\bar{w}(\varepsilon) \approx 40$) [22; 24; 28]. Это указывает на то, что, в перспективе, средства радиочастотного обнаружения каналов управления БПЛА с ППРЧ, в основу которых будет положено использование BDS-статистики, смогут их обнаружить.

Полученные результаты имеют достаточно важное практическое значение, так как потенциально позволяют осуществлять более эффективное радиочастотное обнаружение БПЛА, использующих радиосигналы с ППРЧ. Кроме того, методы BDS-статистики, в соответствии с известными работами [22; 24], потенциально позволяют обнаруживать и другие типы сложных сигналов. Совокупное применение, при соответствующей адаптации, методов BDS-статистики, как радиочастотных методов, и иных подходов по обнаружению БПЛА, позволит в перспективе создать достаточно эффективную систему по обнаружению и противодействию БПЛА.

Литература

1. Макаренко С.И. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 3. Радиоэлектронное подавление систем навигации и радиосвязи // Системы управления, связи и безопасности. 2020. №2. С. 101-175. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10205
2. Кострыкин П.А., Назаров А.И., Карабанов И.В. Анализ возможности радиоэлектронного подавления командной радиолинии систем связи // Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны. 2020. № 2 (9). С. 9-13.
3. Макушин М. Системы обнаружения радиоуправляемых БПЛА // Электроника: наука, технология, бизнес. 2017. № №6 (00166). С. 82-88.
4. Phuan Y. Drone alert! // Rohde & Schwarz News Magazine. 2016. V. 216/16. Pp. 58–65.
5. Специфика обнаружения сигналов летательного аппарата. URL: http://specintek.ru/media/uav/uav_videolink/ (дата обращения: 20.10.2020).
6. Общие сведения о каналах управления и передачи данных БПЛА .URL: http://specintek.ru/media/uav/uav_detection/ (дата обращения: 20.10.2020).
7. Тузов Г.И., Сивов В.А., Прытков В.И., Урядников Ю.Ф., Дергачев Ю.А., Сулиманов А.А. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.
8. Макаренко С.И., Иванов М.С., Попов С.А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография. – СПб.: Свое издательство, 2013. 166 с.
9. Кокорева Е.В., Белезекова А.С. Теоретические основы современных технологий беспроводной связи: методические указания к лабораторной работе. Томск: Факультет дистанционного обучения, ТУСУР, 2014. 81 с.
10. Золотых В.Г., Пашенко М.С., Перерва Л.М., Юдин В.В. Структурный анализ частотно-временной матрицы системы связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 1 (114). С. 43-50.
11. Юдин В.В., Перерва Л.М., Пашенко М.С., Титов П.Л., Гряник В.Н. Критические корреляционные индексы в оценке фрактальности функционирования систем ППРЧ // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 2 (103). С. 7-13.

12. Борисов В.И. и др. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. М.: Радио и связь, 2000. 384 с.
13. Павлюк В.В., Бугайов М.В. Алгоритм виявлення радіосигналів із псевдовипадковим перестроюванням робочої частоти каналів дистанційного керування безпілотними літальними апаратами // Сбірник наукових праць ЖВІ. 2017. В. 14. С. 5-15.
14. Naeng-Bok Kil, Jae-Sin Lee, Eui-Rim Jeong Analysis of Frequency Hopping Signals in Commercial Drones // International Journal of Pure and Applied Mathematics. 2018. Vol. 118. No. 19. Pp. 2015-2024.
15. Ушаков А.П., Венедиктов В.Т. Разработка и исследование обнаружителя сигналов с псевдослучайной перестройкой частоты на базе сигнального процессора // Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт физики, наноэлектроники и телекоммуникаций СПбГПУ. Ч. 1. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 63-66.
16. Галл Р.Д., Макаров С.Б. Имитационная модель устройства определения периода псевдослучайной перестройки рабочей частоты сигнала управления БПЛА при наличии ошибок детектирования // Доклады 20-й Междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение - DSPA-2018». М.: 2018. Т. 2. С. 458-462.
17. Галл Р.Д., Макаров С.Б. Совместное обнаружение и подавление сигналов управления группы беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. 2018. № 12. С. 29-38. DOI: 10.18127/j00338486-201812-04.
18. Batuhan Kaplan, Ibrahim Kahraman, Ali Gorg, Hakan Ali C., Ali Rıza Ekti Measurement based FHSS-type Drone Controller Detection at 2.4GHz: An STFT Approach // IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring). 2020. arXiv:2003.03614v1 [eess.SP]. 6 P.
19. Ерохин В.Ф., Рома. А.Н., Василенко С.В., Бездрабко Д.Е. Математическая модель перехвата одиночного скачка сигнала передатчика с ППРЧ // Вісник Національного технічного університету України «КПІ» Серія — Радиотехніка. Радіоапаратобудування. 2016. № 64. С. 75-85.
20. Feng Liu, Michael W. Marcellin, Nathan A. Goodman, Ali Bilgin Compressive Sampling for Detection of Frequency-Hopping Spread Spectrum Signals // IEEE Transactions On Signal Processing. 2016. Vol. 64. No. 21. Pp. 5513-5524. DOI: 10.1109/TSP.2016.2597122.
21. Васюта К.С., Озеров С.В., Зоц Ф.Ф. Анализ пропускной способности и скрытности ММО-системы радиосвязи на хаотической несущей // Системи обробки інформації. 2012. В. 9 (107) С. 21-24.
22. Гавришев А.А. Моделирование и количественно-качественный анализ распространенных защищенных систем связи // Прикладная информатика. 2018. Т. 13. № 5 (77). С. 84-122.
23. Васюта К.С. Новый подход к оценке параметров хаотических сигналов, наблюдаемых на фоне шума, с использованием «нелинейной динамической статистики» // Проблемы телекоммуникаций. 2010. № 1(1). С. 109-114.
24. Васюта К.С. Классификация процессов в инфокоммуникационных радиотехнических системах с применением BDS-статистики // Проблемы телекоммуникаций. 2012. № 4(90). С. 63-71.
25. Карманов А.П., Кочева Л.С., Щемелинина Т.Н. Применение методов нелинейной динамики для анализа результатов мониторинга сточных вод // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2014. № 6. С. 129-137.
26. Гавришев А.А. Применение пакета программ ScicosLab для моделирования системы связи с ППРЧ // Математические методы и информационно-технические средства: материалы XVI Всерос. науч.-практ. конф. Краснодар: Краснодарский университет МВД России, 2020. С. 21-24.
27. Кузовников А.В., Семкин П.В. Способ обнаружения случайных низкоэнергетических сигналов // Патент РФ на изобретение № 2511598 от 10.04.2014.
28. 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.
29. Бодягин И.А., Дернакова О. В. Статистический анализ частично наблюдаемых выходных последовательностей криптографических генераторов с использованием модели DAR(p) // Веснік сувязі. 2018. № 1(147). С. 51–55