

УДК 614.8: 621.396

doi: 10.34987/vestnik.sibpsa.2021.71.49.011

РАЗВИТИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ С ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В КАНАЛАХ СВЯЗИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Гавришев А.А.; Осипов Д.Л., канд. техн. наук, доцент

Северо-Кавказский федеральный университет

Аннотация. В данной работе показано развитие использования методов нелинейной динамики для обнаружения радиосигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ), используемых в каналах связи беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). На основе результатов из работ [2; 3], проведено моделирование отображения Энона и его исследование с помощью показателя Херста и BDS-статистики. Доказано, что отображение Энона является приближенной моделью радиосигналов с ППРЧ. Полученные результаты, а также результаты из $\bar{w}(\varepsilon)$ работ [4; 5], имеют важное практическое значение, так как доказывают, что применение методов нелинейной динамики, при соответствующей адаптации, как радиочастотных методов, позволит, наряду с другими подходами по обнаружению БПЛА, в перспективе создать достаточно эффективную систему по обнаружению и противодействию БПЛА.

Ключевые слова: БПЛА, ППРЧ, радиочастотное обнаружение, отображение Энона, приближенная модель, нелинейная динамика.

DEVELOPMENT OF THE USE 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

North-Caucasus Federal University

Abstract. This paper shows the development of the use of nonlinear dynamics methods for detecting radio signals with frequency-hopping spread spectrum (FHSS) used in communication channels of unmanned aerial vehicles (UAVs). Based on results from works [2; 3], modeling of the Hénon map, and its study using the Hurst exponent and BDS-statistics was carried out. It is proved that the Hénon map is an approximate model of radio signals with FHSS. The results obtained, as well as the results from the works [4; 5], are of great practical importance, since they prove that the use of nonlinear dynamics methods, with appropriate adaptation, as radio frequency methods, will allow, along with other approaches to UAV detection, in the future to create a sufficiently effective system for detecting and countering UAVs.

Key words: UAV, FHSS, radio frequency detection, Hénon map, approximate model, nonlinear dynamics

Введение

Как известно [1], в настоящее время широкое распространение для дистанционного управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) получили системы связи с расширением спектра методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ). Основополагающий принцип построения таких систем предполагает равномерное использование всего множества рабочих частот и псевдошумовую эксплуатацию эфира. Следовательно, правильно спроектированная система связи с ППРЧ должна обладать шумоподобной структурой эксплуатации частотного ресурса [1-3]. Исходя из этого, при использовании систем связи с ППРЧ, предназначенных для управления БПЛА, радиоразведка должна сталкиваться с большим количеством разнообразных частотно-временных траекторий. В связи с этим, актуальным является разработка и исследование новых подходов к обнаружению радиолиний с ППРЧ, предназначенных для управления БПЛА [1-5]. В предыдущих своих работах авторы уже обращались к данной тематике, например, в работах [4; 5]. В этих работах показано, что методы на основе нелинейной динамики, при соответствующей адаптации, могут потенциально быть полезными для радиочастотного обнаружения систем связи с ППРЧ. В данной работе авторы хотят продолжить исследование данной тематики, опираясь на результаты работ [2; 3]. В работах [1-3] указано, что в настоящее время общепринятой точкой зрения на борьбу с системами связи с ППРЧ является подавление таких систем с помощью постановки прицельных по частоте помех, предсказанных путем определения параметров генератора псевдослучайных чисел. За счет этого возможно нарушить функционирование одиночных БПЛА или группы БПЛА, управляемых по одному каналу связи [1]. Вместе с тем считается [1-3], что если не удастся определить параметры генератора псевдослучайных чисел, то эффективная борьба с системой связи с ППРЧ становится маловероятной. Авторы работ [2; 3] предлагают альтернативный метод борьбы с системами связи с ППРЧ, основанный на установлении специфических особенностей функционирования систем связи с ППРЧ и позволяющий существенно упростить задачу обнаружения таких сигналов. В таком случае нет необходимости решать задачу раскрытия полного алгоритма работы генератора псевдослучайных чисел. В качестве такого метода обнаружения предлагается использовать методы нелинейной динамики. В частности, показано [2; 3], что радиосигналы с ППРЧ имеют характер структурной организации, схожий с отображением Энона. Исходя из этого, практический и научный интерес представляет дальнейшее изучение приложений нелинейной динамики к радиочастотному обнаружению сигналов с ППРЧ.

Целью данной статьи является развитие использования методов нелинейной динамики для обнаружения радиосигналов с ППРЧ.

Задачей данной статьи является моделирование отображения Энона, исследование полученных данных с помощью показателя Херста H и BDS-статистики $\bar{w}(\varepsilon)$, и сравнение полученных результатов с известными исследованиями из данной области.

Основная часть

В соответствии с [6], отображение Энона описывается следующим выражением:

$$\begin{cases} x_{n+1} = 1 - ax_n^2 + y_n, \\ y_{n+1} = bx_n \end{cases} \quad (1)$$

где a и b – управляющие параметры.

Получим с помощью выражения (1) временные реализации отображения Энона при значениях $a=1,4$ и $b=0,3$. В соответствии с работами [2-5], длина временных реализаций будет составлять 2000 и 5000 соответственно. Моделирование отображения Энона, описываемого выражением (1), проведено с помощью программы E&F Chaos [7]. Полученные временные реализации приведены на рис. 1-2.

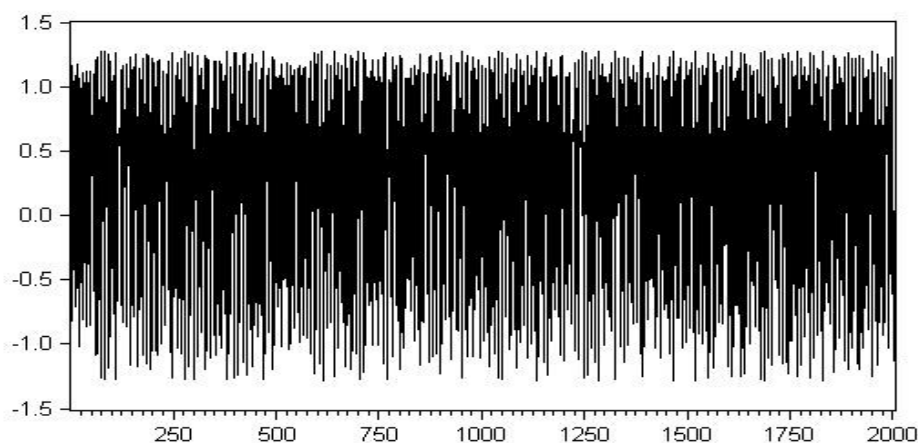


Рис. 1. Временная реализация отображения Энона при значениях $a=1,4$ и $b=0,3$ с длиной 2000

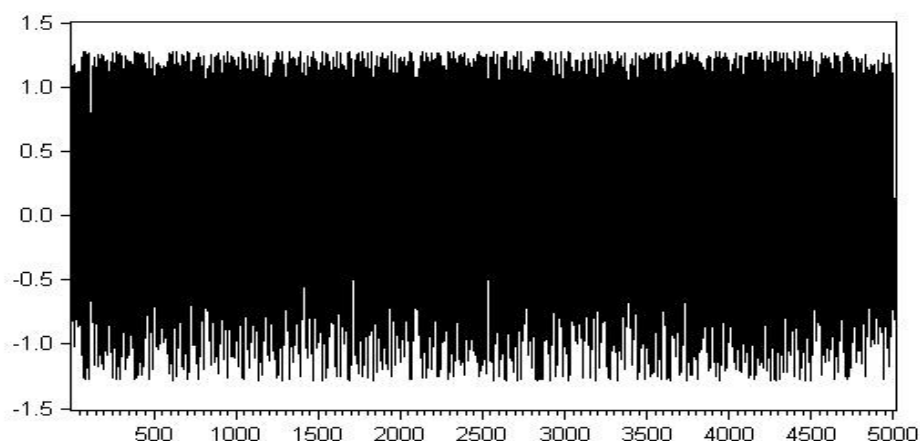


Рис. 2. Временная реализация отображения Энона при значениях $a=1,4$ и $b=0,3$ с длиной 5000

Так же получим с помощью выражения (1) временные реализации отображения Энона при значениях $a=1,2$ и $b=0,3$. Длина временных реализаций будет составлять 2000 и 5000 соответственно. Полученные временные реализации имеют вид, схожий с рис. 1-2.

Как видно из полученных данных (рис. 1-2), временные реализации отображения Энона являются шумоподобными и потенциально способны описывать радиосигналы с ППРЧ. Проверим полученные результаты с помощью методов нелинейной динамики. Для этого, по аналогии с ранее проведенными авторами исследованиями [4; 5], применим для количественной оценки полученных временных реализаций отображения Энона показатель Херста H и BDS-статистику $\bar{w}(\varepsilon)$. С их более подробным описанием можно ознакомиться в работах [2-9].

Проведем расчеты показателя Херста H и BDS-статистики $\bar{w}(\varepsilon)$ для полученных данных. Расчеты проведены в программах Fractan, Eviews Student Version Lite и сведены в табл. 1.

Таблица 1. Полученные значения показателя Херста H и BDS-статистики $\bar{w}(\varepsilon)$

№	Значение параметров a и b	Длина последовательности	Значение показателя Херста, H	Значение BDS-статистики $\bar{w}(\varepsilon)$
1	$a=1,4$ и $b=0,3$	2000	$\approx 0,46$	$\approx 21,9$
2	$a=1,4$ и $b=0,3$	5000	$\approx 0,49$	$\approx 37,4$
3	$a=1,2$ и $b=0,3$	2000	$\approx 0,52$	$\approx 30,7$
4	$a=1,2$ и $b=0,3$	5000	$\approx 0,48$	$\approx 45,0$

Как видно из табл. 1, значения показателя Херста и BDS-статистики для случая $a=1,4$ и $b=0,3$ находятся примерно в диапазоне

$$H \in [0,46 - 0,49] \text{ и } \bar{w}(\varepsilon) \in [21,9 - 37,4],$$

а для случая $a=1,2$ и $b=0,3$ – примерно в диапазоне $H \in [0,48 - 0,52]$ и

$$\bar{w}(\varepsilon) \in [30,7 - 45].$$

Сравнение полученных результатов с результатами, полученными авторами в работах [4; 5], показывает их достаточно близкое совпадение. В частности, радиосигналы системы связи с ППРЧ, полученные при моделировании в пакете программ ScicosLab [4; 5], обладают значениями показателя Херста $H \approx 0,55$ и BDS-статистики $\bar{w}(\varepsilon) \approx 36$ для длины 5000.

Таким образом, проведенное моделирование отображения Энона и исследование полученных данных с помощью показателя Херста H и BDS-статистики $\bar{w}(\varepsilon)$ доказывает, что отображение Энона является приближенной моделью радиосигналов с ППРЧ.

Заключение

В данной работе показано развитие использования методов нелинейной динамики для обнаружения радиосигналов с ППРЧ. Проведено моделирование отображения Энона. Получены временные реализации отображения Энона. Осуществлена их количественная оценка с помощью показателя Херста H и BDS-статистики $\bar{w}(\varepsilon)$. Установлено, что значения показателя Херста и BDS-статистики для случая $a=1,4$ и $b=0,3$ находятся примерно в диапазоне

$$H \in [0,46 - 0,49] \text{ и } \bar{w}(\varepsilon) \in [21,9 - 37,4],$$

а для случая $a=1,2$ и $b=0,3$ – примерно в диапазоне

$$H \in [0,48 - 0,52] \text{ и } \bar{w}(\varepsilon) \in [30,7 - 45].$$

Указанные результаты согласуются с известными исследованиями из данной области, в частности с работами [4; 5], в которых получены схожие количественные значения для радиосигналов с ППРЧ. Это доказывает, что отображение Энона действительно является приближенной моделью радиосигналов с ППРЧ.

Полученные результаты имеют важное практическое значение, так как показывают, что применение методов нелинейной динамики, при соответствующей адаптации, как радиочастотных методов, позволит, наряду с другими подходами по обнаружению БПЛА, 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. Золотых В.Г., Пащенко 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.
3. Юдин В.В., Перерва Л.М., Пащенко 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.
4. Гавришев А.А., Осипов Д.Л. Применение методов нелинейной динамики для обнаружения радиосигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты, используемых в каналах связи беспилотных летательных аппаратов // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2021. № 1(20). С. 68-74. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2021.20.1.012.
5. 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.
6. Шахтарин Б.И. и др. Генераторы хаотических колебаний. – М.: Гелиос АРВ, 2014. – 248 с.
7. Diks C., Hommes C., Panchenko V. et al. E&F Chaos: A User Friendly Software Package for Nonlinear Economic Dynamics // Comput Econ. 2008. No. 32. Pp. 221–244. DOI: 10.1007/s10614-008-9130-x
8. Гавришев А.А. Моделирование и количественно-качественный анализ распространенных защищенных систем связи // Прикладная информатика. 2018. Т. 13. № 5 (77). С. 84-122.
9. Васюта К.С. Классификация процессов в инфокоммуникационных радиотехнических системах с применением BDS-статистики // Проблемы телекоммуникаций. 2012. № 4(90). С. 63-71.