

## ДИНАМИЧЕСКИЙ ХАОС В РАДИОФИЗИКЕ И ЭЛЕКТРОНИКЕ

УДК 517.9

### ВЛИЯНИЕ ШУМА И ЧАСТОТНЫХ ИСКАЖЕНИЙ В КАНАЛЕ СВЯЗИ НА КОММУНИКАЦИОННУЮ СХЕМУ НА ОСНОВЕ ГЕНЕРАТОРА ГИПЕРБОЛИЧЕСКОГО ХАОСА<sup>1</sup>

© 2023 г. Д. О. Любченко<sup>a, b, \*</sup>, О. Б. Исаева<sup>a, c</sup><sup>a</sup> Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
ул. Зеленая, 38, Саратов, 410019 Российская Федерация<sup>b</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125009 Российская Федерация<sup>c</sup> Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,  
ул. Астраханская, 83, Саратов, 410012 Российская Федерация

\*E-mail: dima4398lub@mail.ru

Поступила в редакцию 17.05.2023 г.

После доработки 17.05.2023 г.

Принята к публикации 25.05.2023 г.

Проведен анализ возможности использования схемы хаотической коммуникации, основанной на синхронизации приемника и передатчика, в качестве которых использованы генераторы гиперболического хаоса. Показано, что нелинейно подмешиваемая к сигналу передатчика полезная информация может быть детектирована приемником в случае его устойчивой синхронизации с передаваемым сигналом. Проведены исследования, направленные на подтверждение гипотезы о том, что грубость, сильные хаотические свойства и шумоподобный широкополосный спектр генератора такого типа обеспечивают большую надежность и устойчивость передачи. Также показано влияние шумового и частотного искажений сигнала в канале связи на качество детектирования информации приемником.

DOI: 10.31857/S0033849423100108, EDN: ZWIAGK

Начиная с работы [1] ведется активная разработка генераторов с динамикой гиперболического типа, некоторые из этих моделей реализованы в виде радиофизических устройств [2, 3]. Значительное преимущество данным генераторам дают свойства, присущие гиперболическому хаосу, такие как свойство грубости (структурной устойчивости ассоциирующегося с ним аттрактора), и спектр, схожий с широкополосным белым шумом. Представляется целесообразным использование подобных генераторов в некоторых приложениях динамического хаоса вместо негиперболических, например, для известного метода конфиденциальной и широкополосной коммуникации [4]. Метод основан на синхронизации передатчика и приемника, в качестве которых выступают генераторы гиперболического хаоса. В данной работе используется генератор Кузнецова [1], динамика которого ассоциируется с аттрактором Смейла–Вильямса (рис. 1а).

Согласно работе [5] изучаемая схема для передатчика имеет вид

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 - (A \cos(\omega t/N) - x_1^2)\dot{x}_1 + \omega^2 x_1 = \\ = \varepsilon y_1 \cos(\omega t + \rho(t)), \\ \ddot{y}_1 - (-A \cos(\omega t/N) - y_1^2)\dot{y}_1 + (2\omega)^2 y_1 = \varepsilon x_1^2, \end{cases} \quad (1)$$

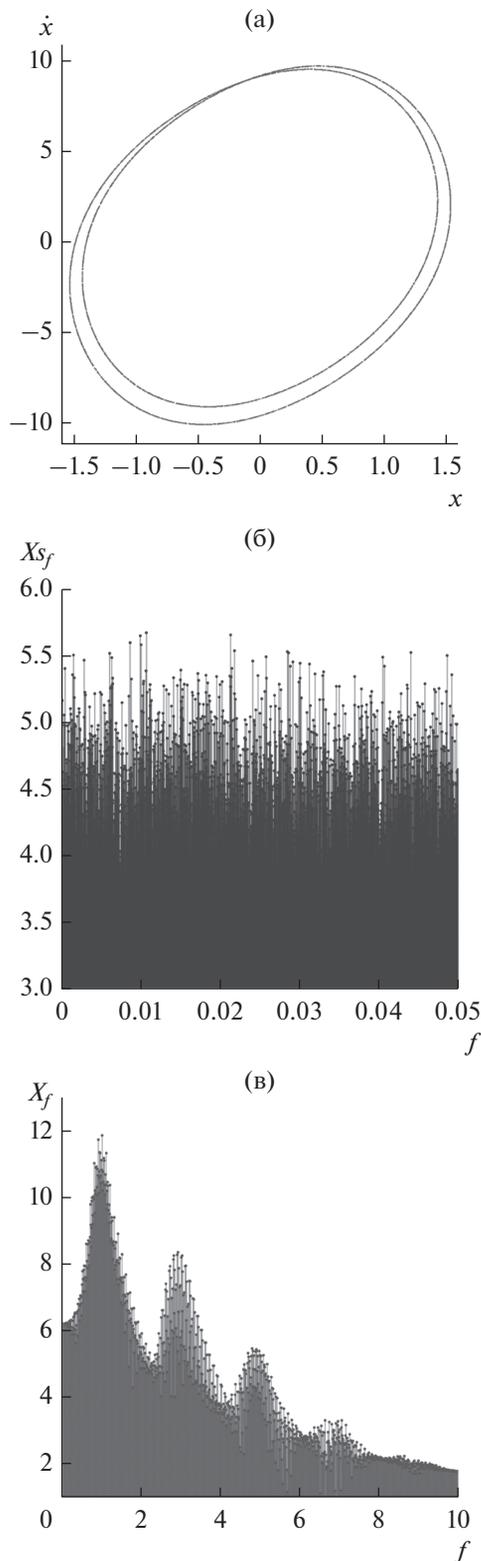
$$S(t) = y_1(t) \cos(\omega t + \rho(t)), \quad (2)$$

для приемника –

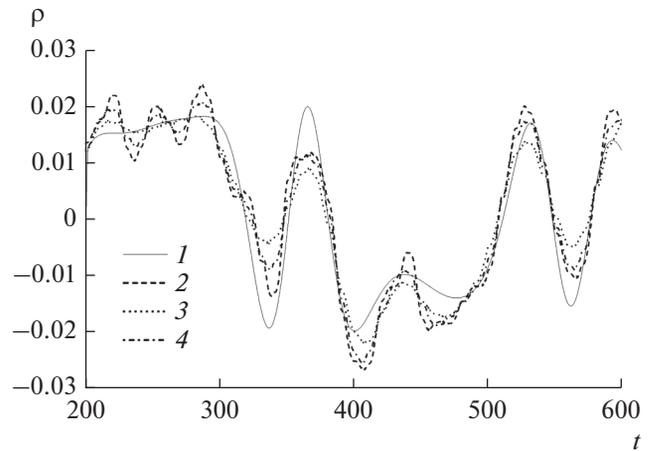
$$\begin{cases} \ddot{x}_2 - (A \cos(\omega t/N) - x_2^2)\dot{x}_2 + \omega^2 x_2 = \varepsilon S(t), \\ \ddot{y}_2 - (-A \cos(\omega t/N) - y_2^2)\dot{y}_2 + (2\omega)^2 y_2 = \varepsilon x_2^2, \end{cases} \quad (3)$$

где  $S(t)$  – передаваемый сигнал, а  $\rho(t)$  – полезная информация. Информация подмешивается к хаотическому сигналу передатчика и допускает детектирование приемником при условии его синхронизации с передатчиком [6]. При этом используется метод нелинейного подмешивания [7, 8], который выигрывает наиболее перспективным для передачи аналоговой информации с точки зрения повышения конфиденциальности. В таких схемах информационный сигнал воздействует на передатчик через петлю обратной связи. Передаваем

<sup>1</sup> Работа удостоена премии на 19-м конкурсе молодых ученых имени Ивана Анисимкина.



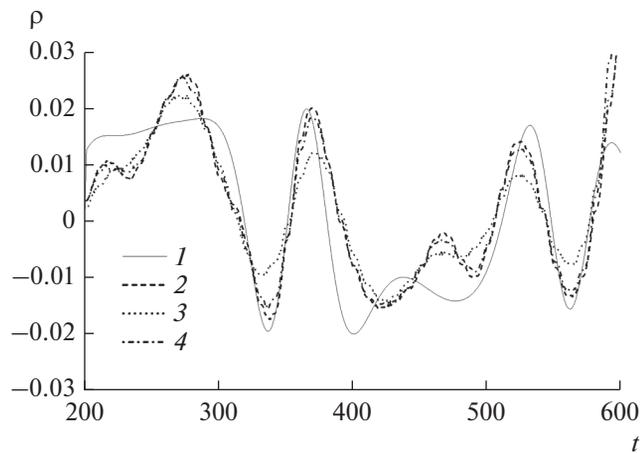
**Рис. 1.** Стробоскопическое сечение аттрактора на плоскость  $(x, \dot{x})$  через период  $T = \omega/N$  (а); спектр стробоскопического отображения (б); полный спектр потоковой переменной  $x$  генератора Кузнецова – системы (1) при  $\rho(t) = 0$  (в), при  $A = 3.0$ ,  $\omega = 2\pi$ ,  $N = 10$ ,  $\varepsilon = 0.5$ .



**Рис. 2.** Иллюстрация расшифрованной информации при наличии шумовых помех в канале связи: 1 – исходная информация; 2 – после получения сигнала из зашумленного канала связи с применением фильтра нижних частот; 3 – с применением медианного фильтра; 4 – после применения комбинированного фильтра.

мый по каналу связи сигнал вызывает синхронный отклик принимающей системы, тем самым реконструируется динамика передатчика на приемнике. Выделенный через разомкнутую петлю обратной связи хаотический сигнал приемника  $y_2$  позволяет извлечь полезную информацию из переданного композитного сигнала путем деления  $S(t)/y_2(t)$ , умножения результата на  $\cos \omega t$  и дальнейшей низкочастотной фильтрации.

Гиперболический генератор-передатчик обеспечивает устойчивую хаотическую генерацию даже в присутствии внутренних возмущений и шумов. Для успешного декодирования информации должен быть достигнут режим стабильной грубой (пусть и обобщенной) синхронизации даже неидентичных, в определенной мере, передатчика и приемника, что оказывается возможным именно при использовании гиперболических систем. А сложная динамика несущего сигнала, обеспеченная его гиперболичностью, обладает статистическими свойствами белого шума (рис. 1б), что повышает скрытность передачи. Помимо этого, однородность и широкополосность спектра такого сигнала (рис. 1в) должны обеспечивать высокую помехоустойчивость сигнала в канале связи. Для проверки данного утверждения было проведено численное моделирование коммуникационной схемы при наличии шумовых помех в канале связи (рис. 2). При наличии шума в канале связи с амплитудой 0.01 расшифровка сигнала после фильтрации выглядит более-менее удовлетворительной. Кроме того, проведен анализ возможности детектирования информации при потере в канале связи части спектральных компонент. Спектр сигнала, подава-



**Рис. 3.** Иллюстрация расшифрованной информации при наличии частотных искажений в канале связи: 1 – исходная информация; 2 – после получения сигнала из зашумленного канала связи с применением фильтра нижних частот; 3 – с применением медианного фильтра; 4 – после применения комбинированного фильтра.

емого в канал связи, характеризуется двумя основными пиками и множеством побочных. Оказывается, что детектирование терпит неудачу, только если потери будут возникать в окрестности одного из главных пиков. Такое искажение приводит к кардинальному изменению сигнала в канале, и синхронизация с приемником теряется. Однако при относительно небольшой полосе не пропускания в районе основного пика расшифровка информа-

ции в определенной мере оказывается удовлетворительной (рис. 3).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-12-00121).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kuznetsov S.P.* // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 95. № 14. Article No. 144101.
2. *Кузнецов С.П., Селезнев Е.П.* // ЖЭТФ. 2006. Т. 129. № 2. С. 400.
3. *Isaeva O.B., Kuznetsov S.P., Sataev I.R. et al.* // Int. J. Bifurcation and Chaos. 2015. V. 25. № 12. Article No. 1530033.
4. *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос: Новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
5. *Isaeva O.B., Jalnina A.Yu., Kuznetsov S.P.* // 2017 Progress in Electromagnetics Research Symp. – Spring (PIERS). St. Petersburg. 22–25 May. N.Y.: IEEE, 2017. P. 3129.
6. *Ликовский А., Розенблюм М., Куртс Ю.* Синхронизация: Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003.
7. *Волковский А.Р., Рудьков Н.В.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. № 3. С. 71.
8. *Жалнин А.Ю.* // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2014. Т. 22. № 5. С. 3.