

**Особенности широкополосной коммуникации на базе генераторов с грубой динамикой**Д. О. Любченко<sup>1,2,\*</sup>, О. Б. Исаева<sup>1,3,†</sup><sup>1</sup>Саратовский филиал института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова, СФ-7  
Россия, 410019, Саратов, ул. Зеленая, д. 38<sup>2</sup>Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова, аспирантура  
Россия, 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7<sup>3</sup>Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, институт физики, институт физики  
Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

(Поступила в редакцию 30.05.2023; подписана в печать 14.05.2024)

В статье проводится сравнение эффективности передачи информации на основе синхронизации разных генераторов широкополосного сигнала как при наличии шума в канале связи, так и в условиях частотного искажения передаваемого в канал связи сигнала. Генераторы гиперболического хаоса и странного нехаотического аттрактора, которые используются в настоящей работе в качестве генераторов несущего сигнала, демонстрируют сложную динамику и обладают широким непрерывным спектром. В исследовании показано, что метод коммуникации на основе гиперболического хаоса более чувствителен к шуму, чем на основе генератора странного нехаотического аттрактора. Наличие полосы непропускания в низкочастотной и высокочастотной областях, тем не менее, позволяет детектировать информацию с минимальными искажениями с помощью коммуникационных схем на основе обоих генераторов.

PACS: 5.45.Vx, 05.45.Xt, 05.45.Gg

УДК: 621.391

Ключевые слова: хаотическая коммуникация, гиперболический хаос, странный нехаотический аттрактор.

**ВВЕДЕНИЕ**

Задача передачи информации с помощью хаотического сигнала представляет большой интерес с прикладной точки зрения, поскольку такой сигнал обладал бы рядом преимуществ:

1. передача сигнала происходит в широком диапазоне частот;
2. хаотический сигнал более устойчив к шуму, чем периодический;
3. безопасность передачи обеспечивается за счет того, что для декодирования информации необходимо восстановить динамику хаотического передатчика [1].

Наиболее перспективной представляется коммуникация на основе гиперболического хаоса, поскольку присущие ему свойства грубости (структурной устойчивости ассоциирующегося с ним аттрактора) и спектр, схожий с широкополосным белым шумом, должны давать некоторые преимущества по сравнению с негиперболическими системами [2].

Еще одним интересным направлением в коммуникации является реализация передачи данных с помощью странного нехаотического аттрактора. Такие аттракторы возникают в системах с квазипериодическим воздействием на границе регулярной и хаотической динамики [3]. Странный нехаотический аттрактор обладает

фрактальной структурой в фазовом пространстве, хотя и устойчив по Ляпунову. Ранее считалось, что странные нехаотические аттракторы характерны для таких динамических систем, как отображения, и могут появляться только при вырожденных параметрах. Однако более детальные исследования показали, что в некоторых системах странные нехаотические аттракторы наблюдаются в широком диапазоне значений параметров и могут появляться в потоковых системах [4, 5].

В настоящей работе исследуется метод, описанный в [6], который основан на синхронизации идентичных генераторов грубой динамики, используемых в качестве передатчика и приемника. К сигналу передатчика подмешивается полезная информация, а детектирование информационного сигнала приемником происходит в случае его устойчивой синхронизации с передаваемым сигналом. Таким образом высокая скрытность передачи получается благодаря сложной грубой динамике несущего сигнала, а высокая помехоустойчивость сигнала в канале связи достигается за счет широкополосности несущего сигнала. Однако для того, чтобы использовать такие генераторы на практике, передатчик и приемник должны синхронизироваться даже в случае искажения сигнала при передаче и наличии шума в канале связи. Также в настоящей работе исследуется возможность применения на практике описанного метода, основанного как на генераторе гиперболического хаоса, так и на генераторе странного нехаотического аттрактора. В работе проводится сравнение эффективности передачи информации при использовании разных генераторов в условии искажения передаваемого сигнала и наличия шума в канале связи.

Структура настоящей статьи выглядит следующим образом. В разд. 2 описываются особенности генераторов, используемые в данной работе. В разд. 3 описы-

\* dima4398lub@mail.ru

† isaevao@rambler.ru

вается способ передачи и расшифровки информации. В разд. 4 показывается (не)устойчивость передачи при наличии в канале связи шума или частотных искажений. В Заключение подводятся итоги.

## 1. Описание генераторов

### 1.1. Генератор гиперболического хаоса

Первым используемым генератором является система с гиперболическим хаосом — генератор Кузнецова [7]:

$$\begin{cases} \ddot{x} - (A \cos w_0 t / T - x^2) \dot{x} + w_0^2 x = \varepsilon y \cos w_0 t, \\ \ddot{y} - (-A \cos w_0 t / T - y^2) \dot{y} + (2w_0)^2 y = \varepsilon x^2. \end{cases} \quad (1)$$

Генератор состоит из двух связанных неавтономных осцилляторов Ван-дер-Поля, фазы колебаний которых в стробоскопическом сечении подчиняются хаотическому растягивающему отображению окружности. Важный теоретический анализ генератора (1) приведен в работах [8, 9], значительный экспериментальный — в работе [10]. Значения параметров, которые используются в статье для генератора гиперболического хаоса, следующие:  $A = 3.5$ ,  $T = 10$ ,  $w_0 = 2\pi$ ,  $\varepsilon = 0.5$ .

Система (1) генерирует аттрактор типа Смейла-Вильямса, который можно наблюдать в стробоскопическом сечении ( $t = T$ ) в проекциях  $(x, \dot{x})$  и  $(y, \dot{y})$  (показано на рис. 1, а). Спектр Фурье любой переменной системы в стробоскопическом сечении подобен шуму. На рис. 1, б показан усредненный спектр переменной  $y$  в стробоскопическом сечении. На рис. 1, в показана типичная для аттрактора Смейла-Вильямса итерационная диаграмма фазы генератора ( $\varphi_n = \arg(y_n + i \frac{\dot{y}_n}{w_0})$ ).

### 1.2. Генератор странного нехаотического аттрактора

Второй рассматриваемый генератор реализует странный нехаотический аттрактор Ханта-Отта, состоящий из двух связанных неавтономных осцилляторов Ван-дер-Поля, находящихся под внешним квазипериодическим воздействием [11]:

$$\begin{cases} \ddot{x} - (A \sin w_0 t / T - x^2) \dot{x} + w_0^2 x = \varepsilon y \sin(w_0 t + \theta), \\ \ddot{y} - (-A \sin w_0 t / T - y^2) \dot{y} + (2w_0)^2 y = \varepsilon x \sin w_0 t, \\ \dot{\theta} = w_0 w / T. \end{cases} \quad (2)$$

Аналогичный генератор, демонстрирующий странный нехаотический аттрактор Ханта-Отта, в виде электронного устройства был исследован в [12]. Поскольку структура генератора (2) аналогична (1), реализация данного генератора на практике не должна вызывать затруднений. Значения параметров, которые используются в статье для генератора странного нехаотическо-

го аттрактора, следующие:  $A = 13$ ,  $T = 6$ ,  $w_0 = 2\pi$ ,  $w = (\sqrt{5} - 1)/2$  (обратное золотое сечение),  $\varepsilon = 0.6$ .

Система (2) генерирует аттрактор типа Ханта-Отта, который можно наблюдать в стробоскопическом сечении ( $t = T$ ) в проекциях  $(x, \dot{x})$  (показано на рис. 2, а) и  $(y, \dot{y})$ . Один из самых простых способов убедиться, что аттрактор является странным нехаотическим — метод рациональной аппроксимации для  $w$ , который для золотого сечения представляет собой отношение чисел Фибоначчи  $w_k = F_{k-1}/F_k$ . Аттракторы, полученные методом рациональных аппроксимаций, имеют  $F_k$  частот в спектре Фурье. Поскольку переход к иррациональному числу происходит в пределе  $k \rightarrow \infty$ , это означает, что частотный спектр сингулярно непрерывен. Соответствующий усредненный спектр переменной  $x$  в стробоскопическом сечении показан на рис. 2, б. Динамику странного нехаотического аттрактора удобно рассматривать на диаграмме зависимости фазы генератора от фазы внешнего воздействия  $(\phi_n, \theta_n)$ ,  $\phi_n = \pi + \arg(y_n + i \frac{\dot{y}_n}{w_0})$ . На рис. 2, в показана типичная для аттрактора Ханта-Отта такая итерационная диаграмма.

## 2. Метод передачи информации

Свяжем два генератора (1) способом описанным в [6]:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 - (A \cos w_0 t / T - x_1^2) \dot{x}_1 + w_0^2 x_1 = \varepsilon y_1 \cos(w_0 t + \varepsilon(t)), \\ \ddot{y}_1 - (-A \cos w_0 t / T - y_1^2) \dot{y}_1 + (2w_0)^2 y_1 = \varepsilon x_1^2, \\ \ddot{x}_2 - (A \cos w_0 t / T - x_2^2) \dot{x}_2 + w_0^2 x_2 = \varepsilon S(t), \\ \ddot{y}_2 - (-A \cos w_0 t / T - y_2^2) \dot{y}_2 + (2w_0)^2 y_2 = \varepsilon x_2^2, \\ S(t) = y_1 \cos(w_0 t + \xi(t)). \end{cases} \quad (3)$$

Аналогично для генератора (2):

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 - (A \sin w_0 t / T - x_1^2) \dot{x}_1 + w_0^2 x_1 = \varepsilon y_1 \sin(w_0 t + \theta), \\ \ddot{y}_1 - (-A \sin w_0 t / T - y_1^2) \dot{y}_1 + (2w_0)^2 y_1 = \\ = \varepsilon x_1 \sin(w_0 t + \xi(t)), \\ \ddot{x}_2 - (A \sin w_0 t / T - x_2^2) \dot{x}_2 + w_0^2 x_2 = \varepsilon y_2 \sin(w_0 t + \theta), \\ \ddot{y}_2 - (-A \sin w_0 t / T - y_2^2) \dot{y}_2 + (2w_0)^2 y_2 = \varepsilon S(t), \\ \dot{\theta} = w_0 w / T, \\ S(t) = x_1 \sin(w_0 t + \xi(t)). \end{cases} \quad (4)$$

В системах (3) и (4):  $\xi(t)$  — информационный сигнал;  $S(t)$  — передаваемый в канале связи сигнал;  $x_1, y_1$  задают динамику передатчика;  $x_2, y_2$  задают динамику приемника, на которую воздействует передатчик посредством передаваемого сигнала. При полной синхронизации приемника и передатчика  $y_1 = y_2, x_1 = x_2$ . Расшифровать информацию можно двумя способами.

Первый способ больше подходит для численного моделирования, но не подходит для применения на практике. Нужно передаваемый сигнал  $S(t)$  поделить на  $x_2$  или  $y_2$  в зависимости от того, какие генераторы используются. Таким образом, получается

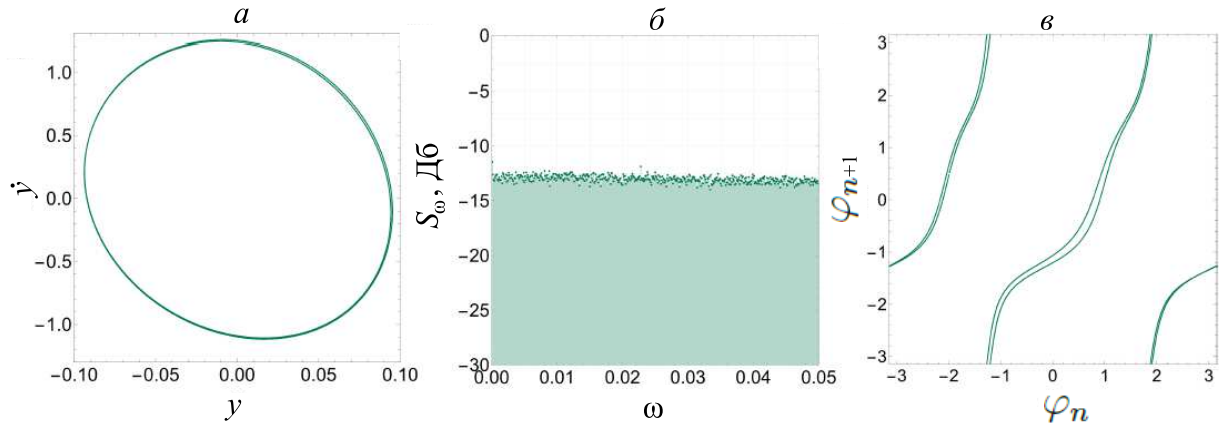


Рис. 1. *a* — Проекция аттрактора типа Смейла–Вильямса системы (1) на плоскость  $(y, \dot{y})$ ; *б* — усредненный частотный спектр переменной  $y$  в стробоскопическом сечении; *в* — итерационная диаграмма фазы генератора (1)

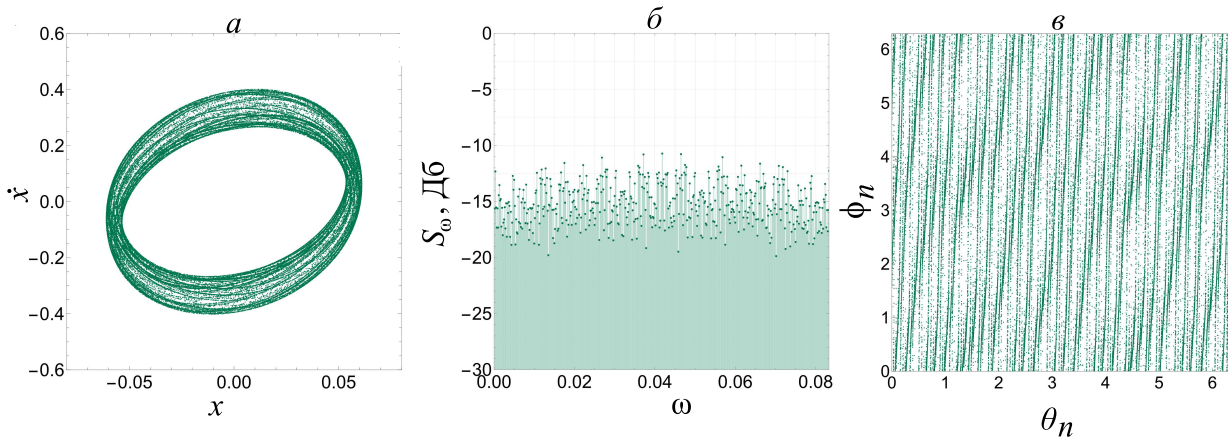


Рис. 2. *a* — Проекция аттрактора типа Ханта–Отта системы (2) на плоскость  $(x, \dot{x})$ ; *б* — усредненный частотный спектр переменной  $x$  в стробоскопическом сечении; *в* — диаграмма фазы генератора и фазы внешнего воздействия (2)

$\cos(w_0t + \xi(t))$  в случае синхронизации гиперболических генераторов и  $\sin(w_0t + \xi(t))$  в случае странных нехаотических аттракторов. Далее нужно взять арккосинус или арксинус от полученной разности, и тогда останется вычесть  $w_0t$ , отнормированную на  $2\pi$ , чтобы получить информацию  $\xi(t)$ . Для улучшения качества расшифровки нужно исключить из рассмотрения временные окрестности, в которых значения  $y_2$  или  $\sin w_0t$  в случае использования системы (3) или  $\cos w_0t$  при использовании системы (4), находится около нуля.

Второй способ уже можно реализовать на практике, но при численном моделировании способ работает медленно. Первый шаг аналогичен, нужно  $S(t)$  поделить на  $x_2$  (или  $y_2$ ), а затем умножить полученную разность на  $\sin w_0t$  в случае использования гиперболических генераторов (или на  $\cos w_0t$  в случае генераторов странных нехаотических аттракторов). Разложив произведение синуса и косинуса, получим следующие выражения:

$$\cos(w_0t + \xi(t)) \sin w_0t = -\frac{1}{2}[\sin \xi(t) - \sin(2w_0t + \xi(t))], \tag{5}$$

$$\sin(w_0t + \xi(t)) \cos w_0t = \frac{1}{2}[\sin \xi(t) + \sin(2w_0t + \xi(t))]. \tag{6}$$

Если сделать усреднение выражений (5) и (6) по периоду высокочастотного колебания  $2\pi/w_0$  и в предположении, что  $\xi(t) \ll 1, \dot{\xi}(t) \ll w_0$ , высокочастотное слагаемое  $\sin(\xi(t) + 2w_0t)$  исчезнет и останется только информация  $\xi(t)$ , поскольку она медленно меняется.

### 3. Определение характеристик передачи сигнала

#### 3.1. Влияние информации на аттрактор

Поскольку информация подмешивается к динамике генератора в виде сдвига фазы, то она должна влиять



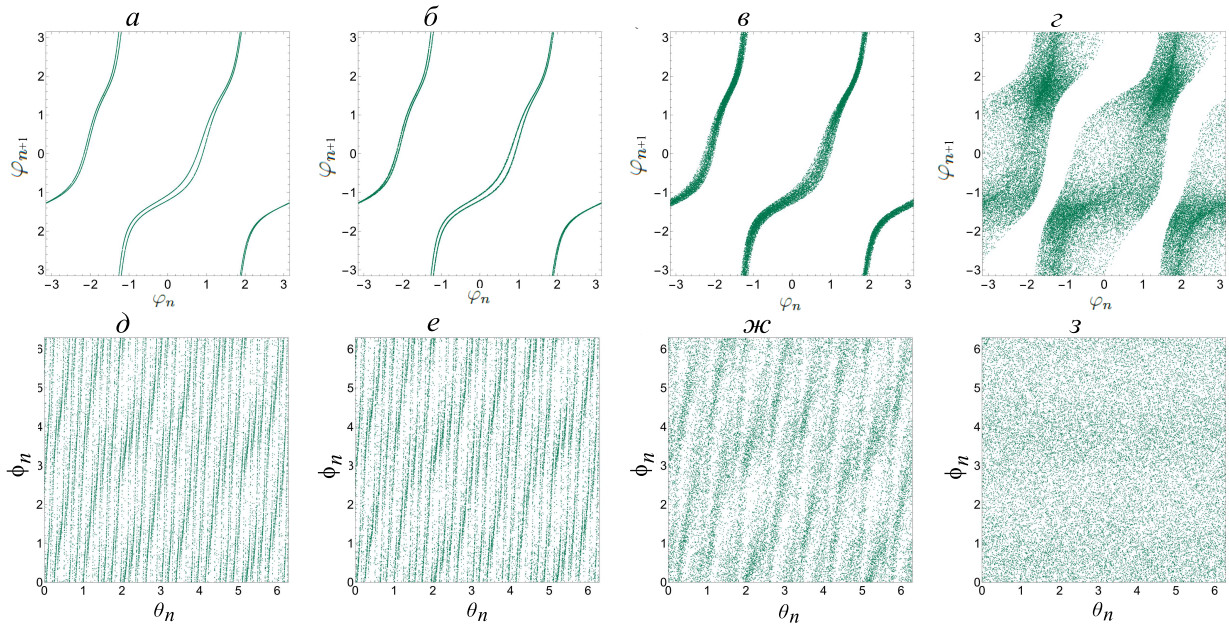


Рис. 3. Итерационные диаграммы гиперболического хаоса с подмешанной информацией амплитуда которой:  $a$  —  $a_i = 0.001$ ,  $б$  —  $a_i = 0.01$ ,  $в$  —  $a_i = 0.1$ ,  $г$  —  $a_i = 1.0$ . Фазовая диаграмма странного нехаотического аттрактора с подмешанной информацией амплитуда которой:  $д$  —  $a_i = 0.001$ ,  $е$  —  $a_i = 0.01$ ,  $ж$  —  $a_i = 0.1$ ,  $з$  —  $a_i = 1.0$

на вид аттрактора, а то, на сколько сильно, зависит от амплитуды информационного сигнала. Далее в работе будет использоваться тестовая информация, которая задается следующей функцией:

$$a_i \cos(O_1 t + A \cos O_2 t) \sin O_w t; \quad (7)$$

при параметрах:  $O_1 = 0.001$ ;  $O_2 = \frac{\sqrt{5}-1}{2} O_1$ ;  $O_w = 0.9 O_1$ ;  $A = 2.0$ ;  $a_i$  — амплитуда информационного сигнала, которую можно менять как раз для оценки влияния информации на аттрактор.

На рис. 3, (а-г) представлены итерационные диаграммы  $(\phi_{i+1}, \phi_i)$  при разных значениях амплитуды  $a_i$ , на которых видно, как ломается тонкая структура гиперболического аттрактора. При малой амплитуде  $a_i = 0.001$  информационного сигнала, визуальных отличий не наблюдается (рис. 3, а). С ростом амплитуды видно, что немного смазывается фрактальная структура аттрактора. Однако, пока воздействие со стороны информации остается слабым, аттрактор топологически не ломается и система, по-видимому, ведет себя гиперболически. Хотя уже при амплитуде  $a_i = 0.1$  тракторию достаточно сильно срывает с аттрактора, а при дальнейшем увеличении амплитуды гиперболическую структуру все сильнее размывает (рис. 3, в).

Аналогичное наблюдается в динамике странного нехаотического аттрактора. На рис. 3, (д-з) представлены фазовые диаграммы  $(\phi_i, \theta_i)$  при разных значениях амплитуды. Поскольку фазовая диаграмма распределена по плоскости из-за фрактальности странного нехаотического аттрактора, найти отличия достаточно сложно, но в целом наблюдается аналогичная ситуация, как и с гиперболическим аттрактором. При

амплитуде  $a_i = 0.001$  (рис. 3, д) визуальных отличий также не наблюдается, и ощутимые искажения возникают при  $a_i = 0.1$  (рис. 3, ж). При амплитуде  $a_i = 1.0$  (рис. 3, з) информация настолько сильно меняет фазу колебаний на аттракторе, что наблюдается картина, которая характерна для хаоса.

Можно сделать вывод, что для сохранения особенности динамики используемых аттракторов нужно брать амплитуду информационного сигнала  $a_i < 0.1$ , что в свою очередь удовлетворяет условию  $\xi(t) \ll 1$ .

### 3.2. Влияние шума на передачу информации

Теперь рассмотрим, при какой амплитуде шума будет реализовываться удовлетворительная расшифровка аналоговой информации. Далее  $a_n$  — амплитуда шума.

На рис. 4 (а-г) представлена расшифровка информации при коммуникации с помощью гиперболического хаоса. На рис. 4: синяя кривая — исходная информация, красная кривая — расшифрованная информация. При  $a_i = 0.001$  и  $a_n = 0.0001$  (рис. 4, а) можно видеть, что плохая расшифровка происходит при смене монотонности и когда информационный сигнал за период колеблется с малой амплитудой. При увеличении уровня шума  $a_n = 0.001$  (рис. 4, б) областей, в которых сигнал плохо расшифровывается, становится больше, хотя  $SNR = 62$  дБ (соотношение сигнал/шум рассчитанный для сигнала в канале связи). Проверим, улучшится ли расшифровка, если увеличить амплитуду информационного сигнала. На рис. 4, в информация имеет амплитуду  $a_i = 0.01$ , амплитуда шума в канале свя-

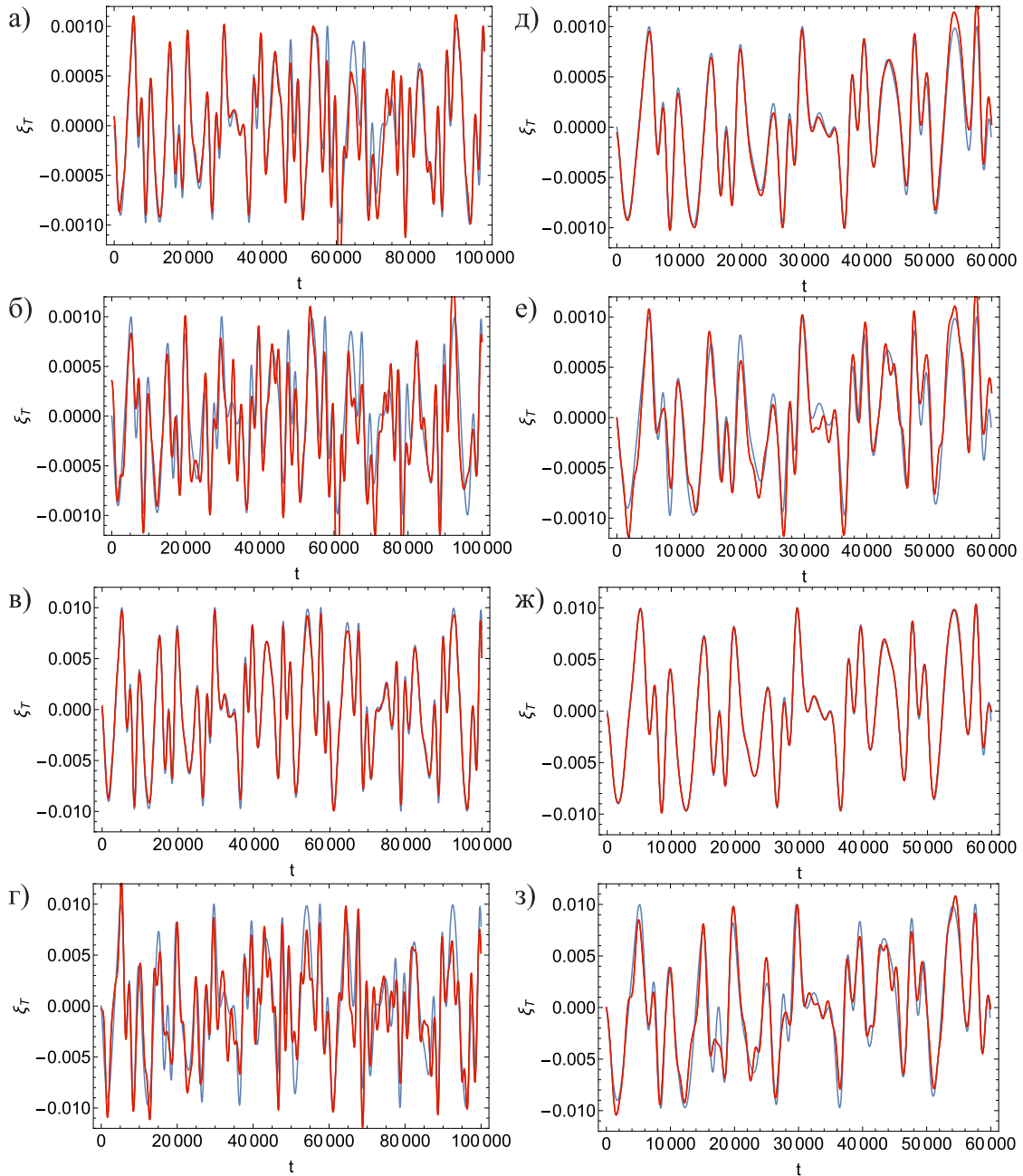


Рис. 4. Расшифрованная информация при наличии в канале связи шума. Коммуникация гиперболическим хаосом:  $a - a_i = 0.001, a_n = 0.0001, SNR = 82$  дБ;  $б - a_i = 0.001, a_n = 0.01, SNR = 62$  дБ;  $в - a_i = 0.01, a_n = 0.001, SNR = 62$  дБ;  $г - a_i = 0.01, a_n = 0.1, SNR = 42$  дБ. Коммуникация странным нехаотическим аттрактором:  $д - a_i = 0.001, a_n = 0.01, SNR = 50$  дБ;  $е - a_i = 0.001, a_n = 0.1, SNR = 30$  дБ;  $ж - a_i = 0.01, a_n = 0.1, SNR = 30$  дБ;  $з - a_i = 0.01, a_n = 0.1, SNR = 10$  дБ.  $a_i$  – амплитуда информации,  $a_n$  – амплитуда подмешиваемого к сигналу шума

зи  $a_n = 0.001$  и расшифровка удовлетворительная. На рис. 4,  $г$   $a_i = 0.01, a_n = 0.1$ , расшифровка выглядит не сильно лучше, чем на рис. 4,  $а$ , при этом  $SNR = 42$  дБ.

Казалось бы, аналогичная ситуация должна быть при передаче сигнала с помощью странного нехаотического аттрактора (рис. 4 (д-з)). На рис. 4, д показана расшифровка при амплитуде информационного сигнала  $a_i = 0.001$  и шуме  $a_n = 0.01$ , что уже больше, чем

в случае использования гиперболического хаоса. При этом расшифровка происходит с минимальными потерями. Неплохая расшифровка сигнала и при  $a_n = 0.1$  (рис. 4, е). Соотношение сигнал/шум при этом 30 дБ. Ситуация улучшится, если увеличить амплитуду информационного сигнала до  $a_i = 0.01$  (рис. 4, ж). Даже при  $a_n = 1.0$  (рис. 4, з) расшифровка происходит с несильными помехами ( $SNR = 10$  дБ).

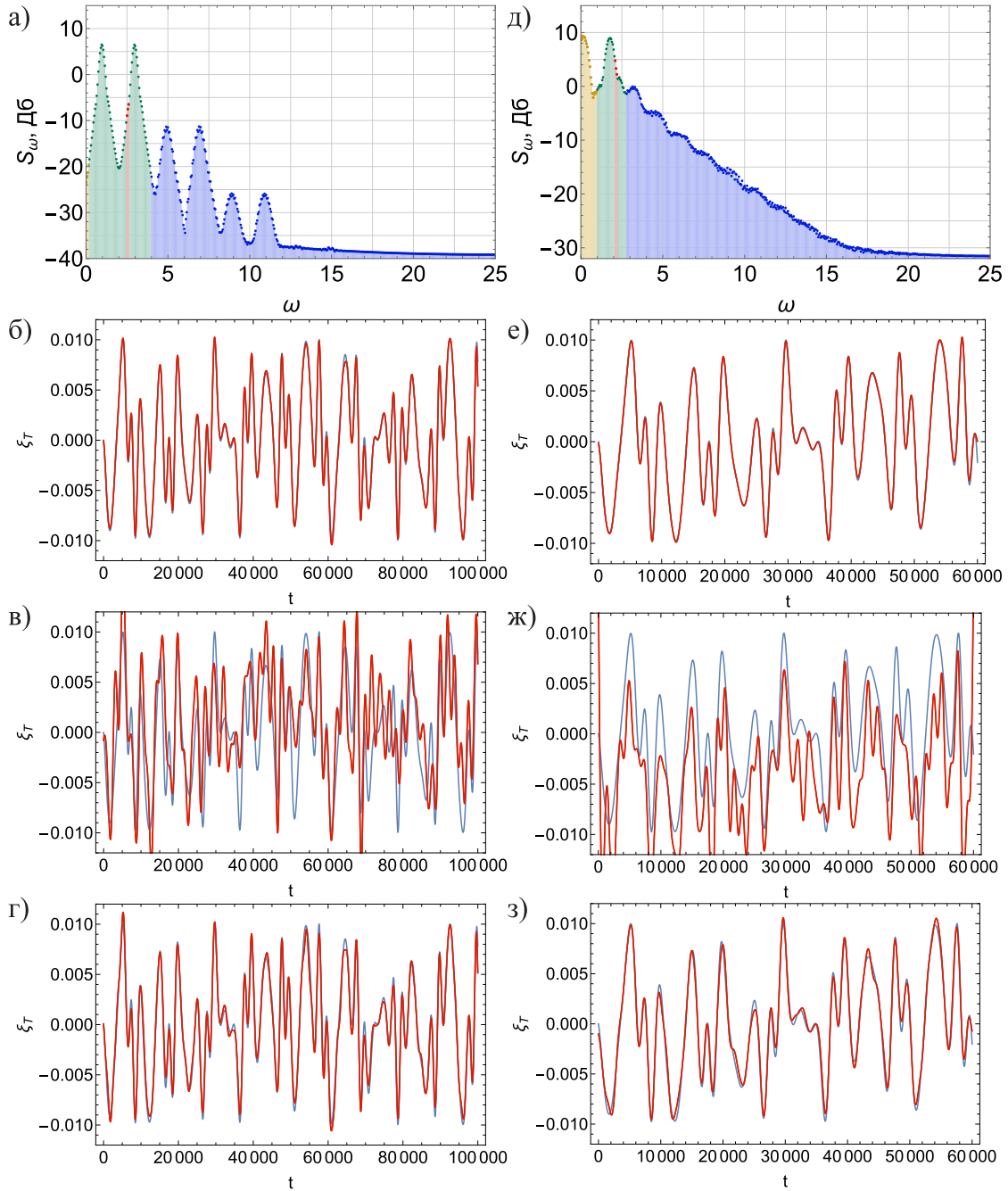


Рис. 5. а — Спектр хаотического (гиперболического) несущего сигнала. Вырезанию желтого диапазона  $\omega \in (0.0, 0.2)$  соответствует расшифровка б; красного  $\omega \in (2.5, 2.6)$  — в; синего  $\omega \in (4.0, \infty)$  — г. д — Спектр странного нехаотического несущего сигнала. Вырезанию желтого диапазона  $\omega \in (0.0, 1.0)$  соответствует расшифровка е; красного  $\omega \in (2.1, 2.2)$  — ж; синего  $\omega \in (2.6, \infty)$  — з

Можно сделать вывод о том, что передача аналогового сигнала с помощью гиперболического хаоса возможна только в слабоза шумленных средах ( $SNR > 40$  дБ). С лучшей стороны себя показывает коммуникация на основе странного нехаотического аттрактора, аналоговый информационный сигнал можно передать с небольшими искажениями в умеренно за шумленных средах ( $SNR > 10$  дБ).

### 3.3. Влияние частотных искажений на передачу информации

Помимо шума, в канале связи могут возникать частотные искажения. Для того, чтобы выявить наиболее «чувствительные» частоты, моделируется прохождение сигнала через полосу не пропускания. Для этого нужно из частотного спектра вырезать различные частотные диапазоны.

На рис. 5, а представлен спектр хаотического (гиперболического) несущего сигнала. Он характеризуется двумя основными пиками и множеством побочных. Также разными цветами обозначены области, которые вырезаются для моделирования полосы непропускания. При вырезании низкочастотной области — желтого диапазона  $\omega \in (0.0, 0.2)$  расшифровка происходит с минимумом помех (рис. 5, б). При вырезании частот в области одного из главных пиков — красного диапазона  $\omega \in (2.5, 2.6)$  расшифровка терпит неудачу (рис. 5, в). При вырезании высокочастотной области — синего диапазона  $\omega \in (4.0, \infty)$  расшифровка также происходит с минимумом помех (рис. 5, г).

На рис. 5, д представлен спектр странного нехаотического несущего сигнала. Он, судя по всему, также характеризуется двумя основными пиками и множеством побочных. При вырезании из низкочастотной области — желтого диапазона  $\omega \in (0.0, 1.0)$  расшифровка удовлетворительна (рис. 5, е). Поэтому спектр характеризуется одним пиком, так что при вырезании из него небольшой частотной области — красного диапазона  $\omega \in (2.1, 2.2)$  происходит смещение и искажение информационного сигнала (рис. 5, ж). При вырезании высокочастотной области — синего диапазона  $\omega \in (4.0, \infty)$  расшифровка проходит удовлетворительно (рис. 5, з).

Таким образом, удаление из спектра хаотического (гиперболического) передаваемого сигнала низкочастотной области не сильно сказывается на расшифровке, также как и удаление высокочастотной области, но при потере даже маленького кусочка в одном из

главных пиков приводит к неудовлетворительной расшифровке. Аналогичное происходит и при передаче информации с помощью генератора странного нехаотического аттрактора. Однако при использовании нехаотического несущего сигнала область частот, необходимая для успешной расшифровки, значительно уже, чем у сигнала на основе гиперболического хаоса, что дает такому способу коммуникации преимущество над последним.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе продемонстрирована возможность передачи данных с помощью синхронизации генераторов гиперболического хаоса и генераторов странного нехаотического аттрактора, а также проведено их сравнение. Была проанализирована и подтверждена возможность удовлетворительного детектирования информации при наличии в канале связи шума ограниченной интенсивности.

Были смоделированы частотные искажения сигнала в канале связи при передаче аналоговой информации. Выяснилось, что существенные потери при расшифровке информации возникают в основном при наличии искажений в окрестности одного из главных пиков спектра широкополосного несущего сигнала.

Работа поддержана грантом РФФИ № 21-12-00121, <https://rscf.ru/project/21-12-00121/>

- [1] Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. // УФН. **179**, № 12. 1281 (2009).
- [2] Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Изд. Физ.-мат. лит. 2002.
- [3] Feudel U., Kuznetsov S., Pikovsky A. Strange Nonchaotic Attractors: Dynamics Between Order and Chaos in Quasiperiodically Forced Systems. Nucl. World Scientific Publishing. 2006.
- [4] Srinivasan K., Senthilkumar D.V., Suresh R., Thamilmaran K., Lakshmanan M. // IJBC. **19**, N 12. 4131 (2009).
- [5] Prasad A., Nandi A., Ramaswamy R. // IJBC. **10**, N 17. 3397 (2007).
- [6] Isaeva O.B., Jalnine A.Yu., Kuznetsov S.P. Progress In

- Electromagnetics Research Symposium. Proceedings: St Petersburg, Russia. P. 3129–3136. (2017).
- [7] Kuznetsov S.P. // Phys. Rev. Lett. **95**. 144101. (2005).
- [8] Jalnine A.Yu., Kuznetsov S.P. // Phys. Rev. E. **77**. 036220. (2008).
- [9] Kuznetsov S.P., Sataev I.R. // Phys. Lett. **A365**. 97 (2007).
- [10] Isaeva O.B., Savin D.V., Seleznev E.P., Stankevich N.V. Progress In Electromagnetics Research Symposium. Proceedings: St Petersburg, Russia. pp. 3109–3113. (2017).
- [11] Jalnine A.Yu., Kuznetsov S.P. // Tech. Phys. **52**. 401 (2007).
- [12] Kuznetsov S.P. // Izv. VUZ. Appl. Nonl. Dynam. **27**. 61 (2019).



## Special Properties of Wideband Communication Based on Generators with Rough Dynamics

D. O. Lubchenko<sup>1,2,a</sup>, O. B. Isaeva<sup>1,3,b</sup>

<sup>1</sup>*Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS,  
Laboratory of Theoretical Nonlinear Dynamics. Saratov 410019, Russia*

<sup>2</sup>*Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Moscow 125009, Russia*

<sup>3</sup>*Saratov State University, Institute of Physics, Base Department of Dynamic Systems  
Saratov 410012, Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>dima4398lub@mail.ru, <sup>b</sup>isaevao@rambler.ru*

The article compares the efficiency of the information transmission based on the synchronization of different wideband signal generators, both in the presence of noise in the communication channel and in the conditions of frequency distortion of the signal transmitted in the communication channel. The generators of a hyperbolic chaos and a strange nonchaotic attractor, which are used in this work as generators of a signal, demonstrate complex dynamics and have a wide continuous spectrum. It was shown that the communication method based on a hyperbolic chaos is more sensitive to noise than on the generator of a strange nonchaotic attractor. The presence of a stopband in the low-frequency and high-frequency regions, however, makes it possible to detect the information with minimal distortion using communication circuits based on both generators.

PACS: 05.45.Vx, 05.45.Xt, 05.45.Gg.

*Keywords:* chaotic communications, hyperbolic chaos, strange nonchaotic attractor.

*Received 30 May 2023.*

### Сведения об авторах

1. Любченко Дмитрий Олегович — инженер; e-mail: dima4398lub@mail.ru.
2. Исаева Ольга Борисовна — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: isaevao@rambler.ru.