

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.9.2>

УДК: 517.9

РЕЖИМЫ ОБОБЩЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ГРУБЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ШИРОКОПОЛОСНОГО СИГНАЛА ПРИ НАЛИЧИИ ЧАСТОТНЫХ ПОМЕХ В КАНАЛЕ СВЯЗИ

Д. О. Любченко^{1,2}, О. Б. Исаева^{1,3}

¹ Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
410019, Саратов, ул. Зеленая, 38

² Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
125009, Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7

³ Саратовский национальный исследовательский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского
410012, Саратов, ул. Астраханская, 83.

Статья поступила в редакцию 21 мая 2024 г.

Аннотация. Представлено исследование возможности наступления режимов обобщенной синхронизации и использования этих режимов для коммуникации в однонаправленно связанных генераторах широкополосного сигнала при наличии частотных помех в канале связи. Рассмотрены три варианта генераторов: 1) с грубым хаотическим аттрактором гиперболического типа; 2) с негрубым негиперболическим хаотическим аттрактором; 3) с грубым странным нехаотическим аттрактором. Приведены результаты для трех характерных случаев частотных помех: 1) потери в высокочастотной части спектра; 2) потери в низкочастотной части спектра; 3) спектральные потери в окрестности основной несущей частоты. Продемонстрированы преимущества гиперболического и странного нехаотического сигналов для передачи данных.

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

Финансирование: Работа выполнена по государственному заданию Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Автор для переписки: Любченко Дмитрий Олегович, dima4398lub@mail.ru

Введение

В недавней работе [1] предложен новый метод детектирования информационного сигнала, подмешанного к широкополосному, маскирующему его несущему сигналу в схемах конфиденциальной коммуникации. Метод успешно работает даже в условиях неидентичности передатчика и приемника и, в отличие от известных ранее основанных на обобщенной синхронизации методов [2-3], применим к передаче аналоговой информации. Успешность метода определяется использованием в качестве приемника и передатчика генераторов с грубой динамикой. Приведенные в работе [1] математические модели коммуникационных схем основаны на генераторе Кузнецова [4] и генераторе Жалнина-Кузнецова [5]. При различных значениях параметров генератор Кузнецова может продуцировать сигнал, отвечающий грубому странному гиперболическому хаотическому аттрактору и негрубому странному хаотическому аттрактору. Генератор Жалнина-Кузнецова сходной природы продуцирует отвечающий грубому странному нехаотическому аттрактору сигнал. Сигналы всех трех видов представляют собой модулированные колебания в виде периодической с периодом T последовательности цугов (рис. 1). Они также обладают схожим спектром, у всех есть два основных и множество побочных пиков (рис. 2).

В настоящей работе проведено исследование коммуникационных схем из [1] в случае возмущений, связанных не с неидентичностью приемника и передатчика, а с наличием частотных помех в канале связи: 1) полосы непропускания высоких частот $f > 2$; 2) полосы непропускания низких частот $f < 0.7$; 3) полосы непропускания $0.9 < f < 1.1$, захватывающей первый основной пик в спектре. При этом моделирование производилось в отсутствие информационного сигнала, то есть в контексте анализа режимов

синхронизации. Анализировалось соотношение между собой сигналов: S_1 – генерируемый передатчиком; S_2 – искаженный, прошедший через канал связи; S_3 – отклик на него приемника. Численное моделирование искажения сигнала в канале производилось путем применения преобразования Фурье, удаления части спектральных компонент и обратного преобразования Фурье.

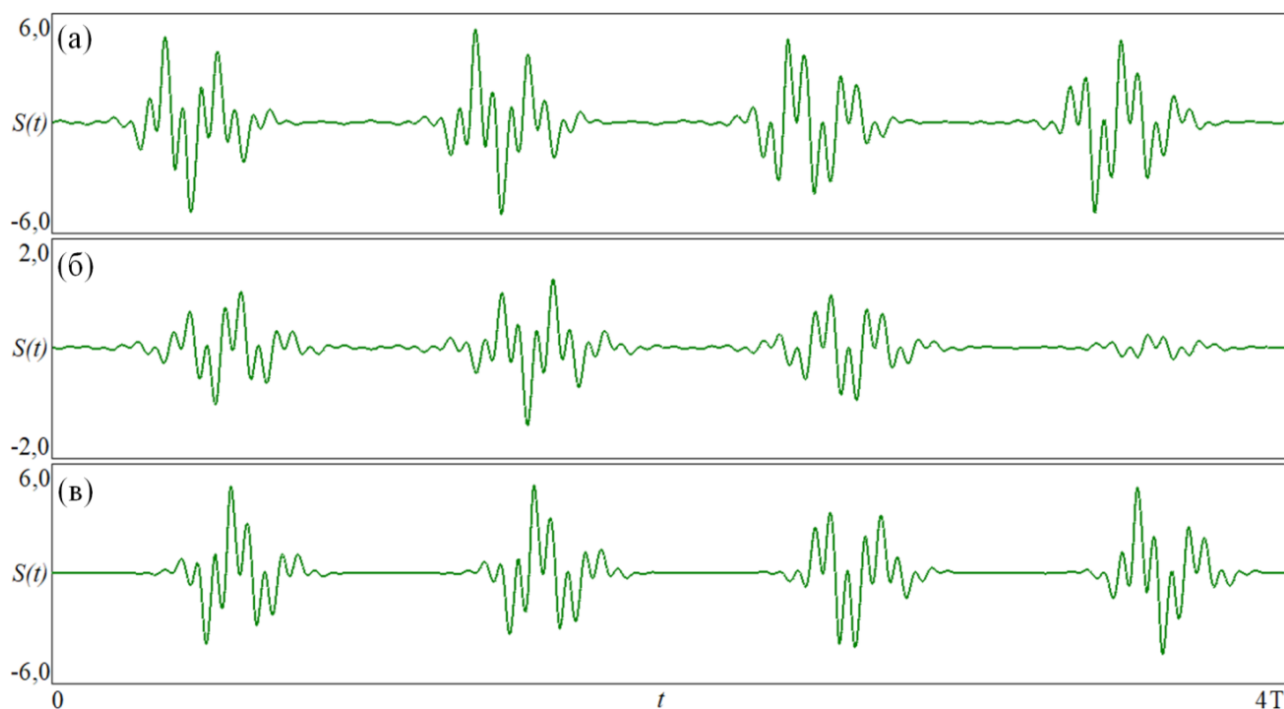


Рис. 1. Фрагмент временной реализации S_1 генератора гиперболического (а), негиперболического (б) хаоса и странной нехаотической динамики (в).

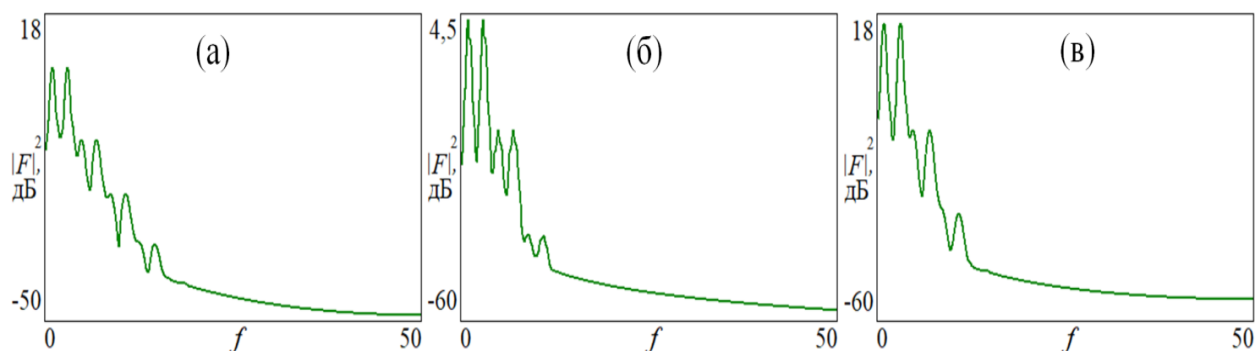


Рис. 2. Спектр мощности сигнала S_1 , генерируемого гиперболическим хаотическим (а) негиперболическим хаотическим (б) и странным нехаотическим генератором. Спектральные компоненты измеряются в дБ.

Основные результаты

На рис. 3, 4 и 5 приведены примеры диаграмм соотношения интенсивностей и фаз колебаний сигналов в стробоскопическом сечении для трех диапазонов полосы непропускания в спектре. Расположение структур на таких диаграммах на главной диагонали может отвечать полной (или близкой к ней) синхронизации. Несмазанные, структурированные объекты в окрестности диагонали могут свидетельствовать об обобщенной синхронизации, кольцеобразные объекты – о лаг синхронизации. Типизация обнаруженных режимов требует более подробного анализа с привлечением методов диагностики синхронизации, например, расчета спектра ляпуновских показателей или, метода ближайших соседей и метода вспомогательной системы.

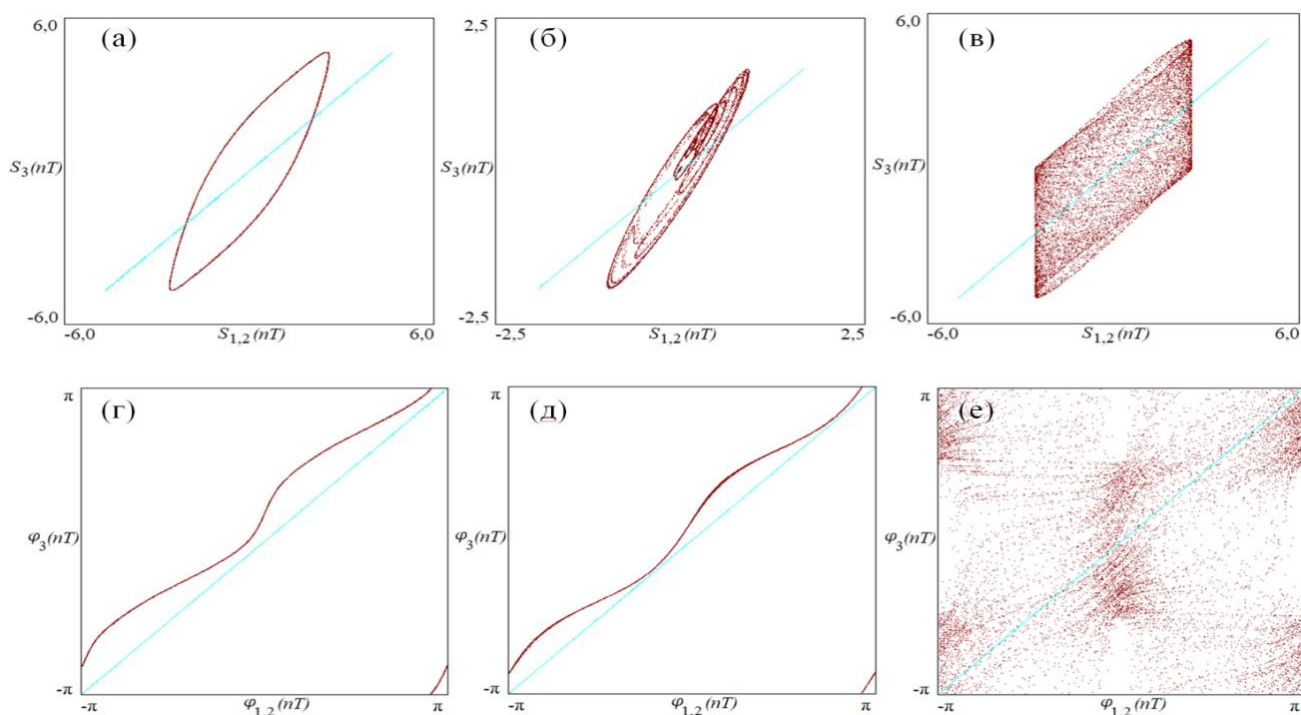


Рис. 3. Диаграммы, демонстрирующие соотношения друг с другом интенсивностей сигналов (а-в) и фаз их колебаний (г-е) в стробоскопическом сечении при потере высоких частот в канале связи. Голубой цвет отвечает индексу «1» в обозначении по оси абсцисс, красный – индексу «2». Фрагменты а и г соответствуют связанным генераторам гиперболического хаоса, фрагменты б и д – негиперболического, в и е – странной нехаотической динамики.

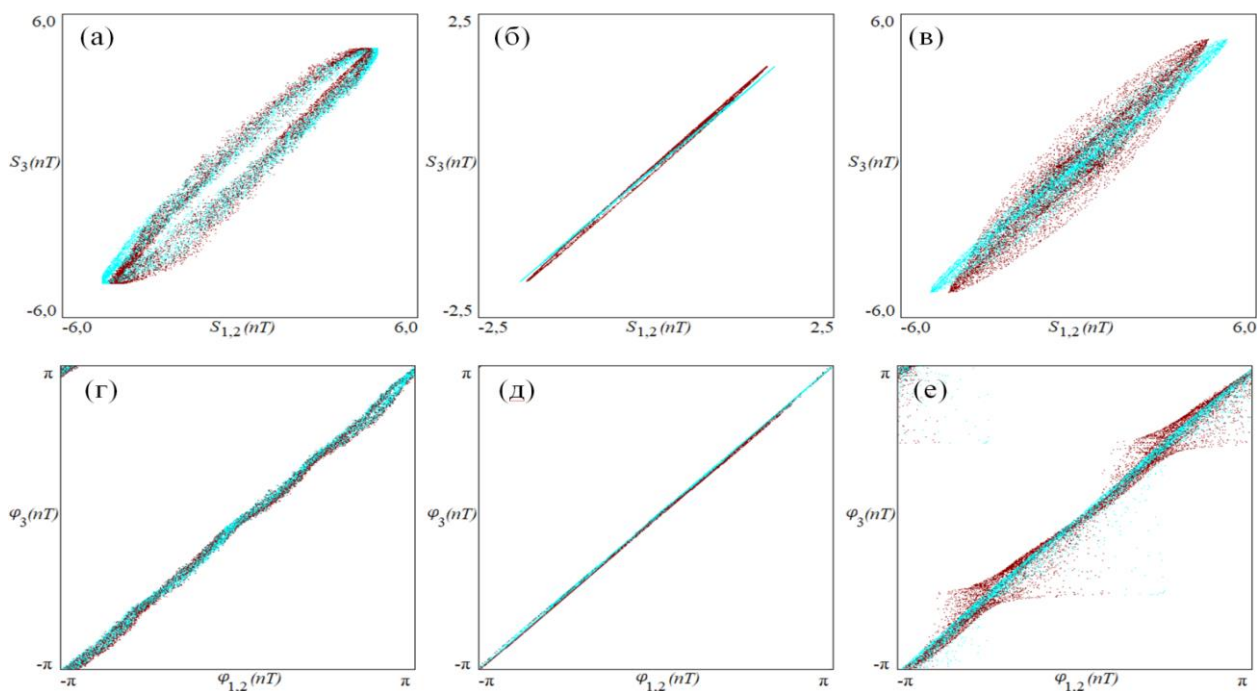


Рис. 4. То же, что на рис. 3, но при потере низких частот в канале связи.

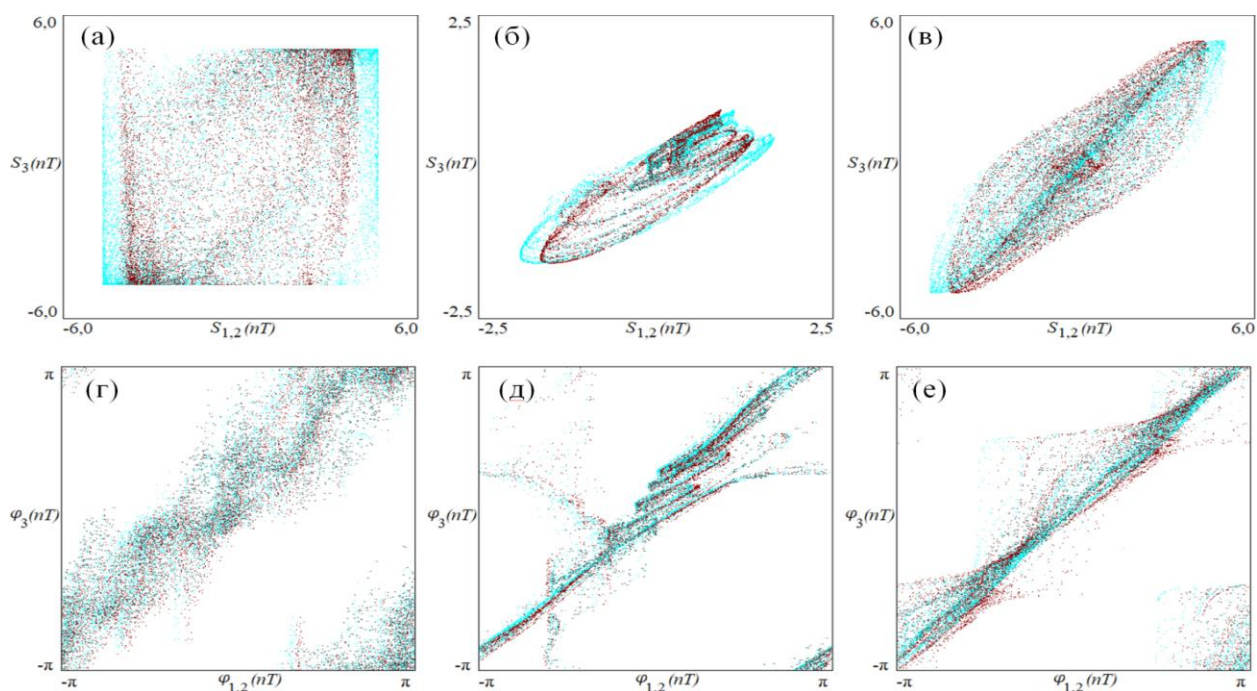


Рис. 5. То же, что на рис. 3, но при потерях в канале связи на основной несущей частоте.

В исследовании из работы [1] устойчивый к неидентичности передатчика и приемника метод коммуникации основывался на убеждении в том, что локальные характеристики вдоль траектории на аттракторе грубых систем (однородно гиперболических, нехаотических) должны вести себя однородно, и на гипотезе, что даже обобщенный режим синхронизации связанных таких

систем должен быть грубым в смысле сохранения этой однородности. В качестве однородно ведущей себя характеристики у связанных систем может выступать оцененная в скользящем окне (локальная) корреляция между значениями соответствующих друг другу переменных подсистем. Тогда из приходящей по каналу связи смеси маскирующего и медленно меняющегося информационного сигналов умножением на генерацию приемника и фильтрацией можно извлечь последний, домноженный на локальную корреляцию, не единичную, но постоянную во времени.

Проанализируем поведение локальной корреляции:

$$\psi(t) = \frac{1}{10T} \int_{t-5T}^{t+5T} S_i(\tau) S_j(\tau) d\tau, \quad (1)$$

в случае потерь в канале связи между сигналом передатчика и им же, искаженным в канале связи ($i = 1, j = 2$), между искаженным, воздействующим на приемник и его откликом ($i = 2, j = 3$) и между сигналами передатчика и приемника ($i = 1, j = 3$). Результаты вычислений представлены на рис. 6 в виде голубых, красных и зеленых графиков, соответственно. Рассмотрены такие же, как на рис. 3-5, варианты частотных помех. Корреляции сигналов в случае грубых генераторов при высокочастотной полосе не пропускания – почти горизонтальные линии со слабыми флуктуациями (рис. а, в). За счет такой устойчивой корреляции установившийся режим синхронизации позволил бы качественно расшифровать замаскированную информацию. В случае низкочастотных помех в канале из рис. г и е, следуют аналогичные выводы, однако качество расшифровки было бы хуже, поскольку горизонтальная линия стала иметь заметные медленные изменения.

Для всех трех рассматриваемых случаев частотных помех при использовании генераторов негиперболического хаоса (рис. б, д, з) локальная во времени корреляция между сигналами приемника и передатчика имеет характер всплесков порядка 0.1, что сравнимо со значениями долговременной корреляций (среднего значения графика). Причем, это происходит даже в режиме, близком к полной синхронизации (см. рис. 4 б, д) на рис. д.

Следовательно, независимо от режима синхронизации, при использовании негрубого хаоса передать информацию с помощью корреляции было бы невозможно.

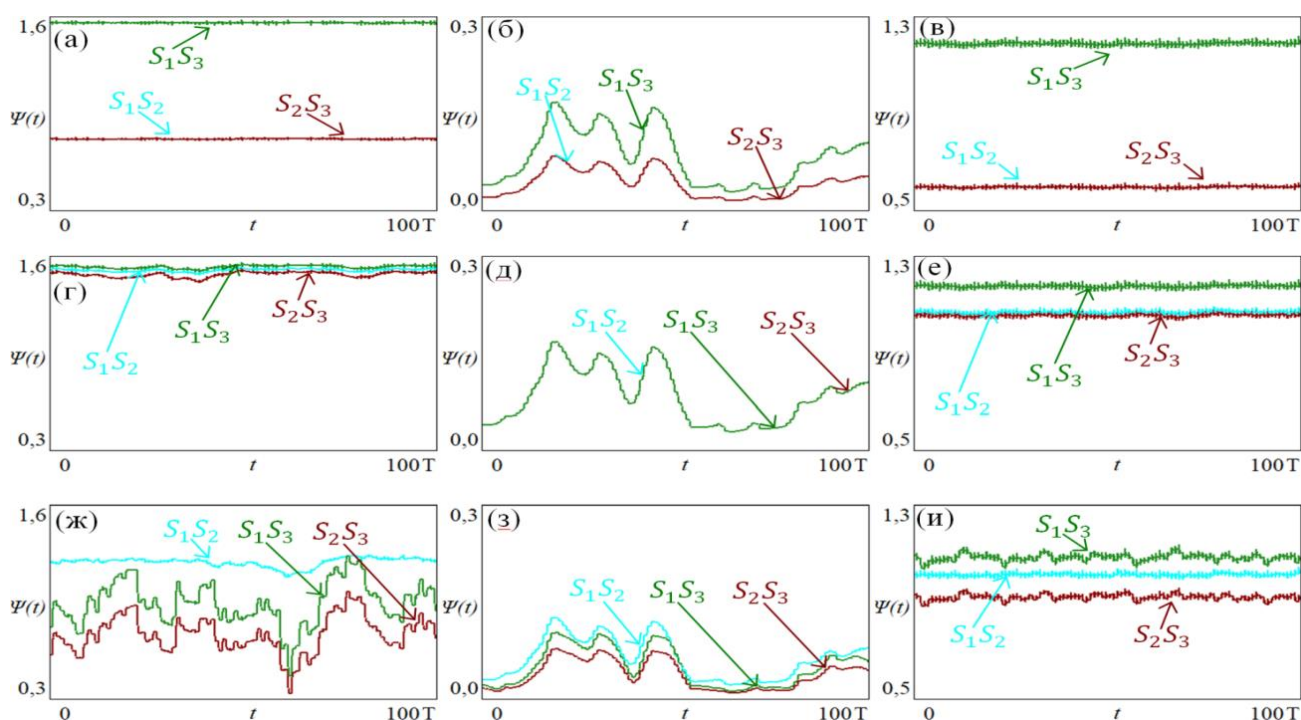


Рис. 6. Локальная во времени, оцененная в скользящем окне, корреляция (1) между сигналами S_1 , S_2 , и S_3 в ситуациях высокочастотных (а-в), низкочастотных (г-е) потерь в канале связи и потерь на основной несущей частоте (ж-и). (а, г, ж) и (б, д, з) – случаи передачи хаотического сигнала гиперболического и негиперболического типов, соответственно. (в, е, и) – случай передачи странного нехаотического сигнала.

При наличии полосы непропускания частот из диапазона, включающего в себя основную частоту колебаний, даже в случае гиперболических генераторов корреляция теряет устойчивость (рис. ж). Однако в такой же ситуации корреляции странных нехаотических сигналов выглядят лучше (рис. и), хотя и обладают флуктуациями заметной амплитуды, и, вероятно, существует возможность удовлетворительного детектирования информации в таких условиях.

Заключение

В работе представлено развитие исследования, обозначенного в [1], по поиску преимуществ использования для средств коммуникации генераторов, динамика которых ассоциируется со странными аттракторами, обладающими структурной устойчивостью. Достаточность наличия даже обобщенной синхронизации между приемником и передатчиком для передачи и успешного детектирования информации при использовании грубых широкополосных генераторов со структурно устойчивыми аттракторами в указанной работе продемонстрировано на примере расстроенных по параметрам подсистем коммуникационной схемы. В настоящей работе начато исследование ситуации идентичных этих подсистем, но при наличии потерь части спектральных компонент у сигнала в канале связи. Представленные результаты анализа режимов синхронизации между сигналами передающей и принимающей подсистем, локальной во времени корреляции между этими сигналами, вероятно, также указывают на необходимость предпочтения грубых генераторов в системах связи.

Финансирование: Работа выполнена по государственному заданию Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Литература

1. Исаева О.Б., Любченко Д.О. Сравнительный анализ схем скрытой коммуникации, основанных на генераторах со странным аттрактором гиперболического типа и со странным нехаотическим аттрактором // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2024. – Т. 32. – №. 1. – С. 31-41. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-003078>
2. Prokhorov M.D. et al. Resistant to noise chaotic communication scheme exploiting the regime of generalized synchronization // Nonlinear Dynamics. – 2017. – Т. 87. – №. 3. – С. 2039-2050. <https://doi.org/10.1007/s11071-016-3174-6>

3. Пономаренко В.И. и др. Метод диагностики обобщенной синхронизации и его приложение к системам передачи информации // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2015. – Т. 23. – №. 6. – С. 4-15. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2015-23-6-4-15>
4. Kuznetsov S.P. Example of a physical system with a hyperbolic attractor of the Smale-Williams type // Physical review letters. – 2005. – Т. 95. – №. 14. – С. 144101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.144101>
5. Жалнин А.Ю., Кузнецов С.П. О возможности реализации в физической системе странного нехаотического аттрактора Ханга и Отга // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77. – №. 4. – С. 10-18.

Для цитирования:

Любченко Д.О., Исаева О.В. Режимы обобщенной синхронизации грубых генераторов широкополосного сигнала при наличии частотных помех в канале связи // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.9.2>