

ДИНАМИЧЕСКИЙ ХАОС В РАДИОФИЗИКЕ И ЭЛЕКТРОНИКЕ

УДК 621.396,621.391

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО КОГЕРЕНТНОМУ СЛОЖЕНИЮ ХАОТИЧЕСКИХ РАДИОИМПУЛЬСОВ В БЕСПРОВОДНОМ КАНАЛЕ

© 2023 г. Л. В. Кузьмин^{а, *}, Е. В. Ефремова^а, В. В. Ицков^а, А. С. Зубков^{а, б}

^а Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125009 Российская Федерация

^б Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Институтский пер. 9, Долгопрудный, Московской области, 140701 Российская Федерация

*E-mail: lvkuzmin@gmail.com

Поступила в редакцию 28.09.2023 г.

После доработки 28.09.2023 г.

Принята к публикации 09.10.2023 г.

Экспериментально продемонстрирована возможность когерентного сложения хаотических радиоимпульсов в беспроводном канале. Описан способ получения хаотических радиоимпульсов, имеющих начальный участок с близкими по форме колебаниями. Хаотические радиоимпульсы формируются и излучаются независимыми конструктивно идентичными генераторами хаотических колебаний, каждый из которых модулируется последовательностью видеоимпульсов питания. Показано, что на выходе антенны, принимающей сигналы от двух излучателей, наблюдается когерентное сложение хаотических радиоимпульсов.

DOI: 10.31857/S0033849423120100, EDN: HLUBDD

ВВЕДЕНИЕ

Применение хаотических сигналов в задачах передачи информации — это популярная область прикладных исследований [1–3], где такие сигналы используются для расширения спектра, ортогонализации, обеспечения многопользовательского доступа, в качестве несущих колебаний в сверхширокополосных системах связи радиодиапазона [4–8].

Необходимым условием для организации когерентных методов обработки сигналов является обеспечение повторяемости их формы в том или ином виде при передаче и приеме. Традиционно для этого используют цифровые методы синтеза сигналов. Например, в [9] рассматриваются кодовые последовательности ультракоротких импульсов на базе хаотических кодовых последовательностей в сочетании с позиционной модуляцией. В [10] описывается способ синтеза последовательностей из ультракоротких импульсов, формируемых при помощи логистического отображения. В [11] предлагаются расширяющие последовательности, получаемые на базе пространственно-временных отображений с хаосом. В [12] анализируется возможность использования дискретных хаотических последовательностей для расширения спектра в CDMA. В [13] рассматриваются хаотические расширяющие последовательности в комбинации с преобразованием Фурье.

В контексте использования хаотических сигналов в задачах диаграммообразования в [14] описывается радар на основе ММО с большим расстоянием между антеннами. В [15] ставится задача по формированию узких диаграмм направленности для радаров на хаотических сигналах. В [16] обсуждается проблема направленной передачи информации за счет пространственно-частотного разделения, достигаемого при помощи хаотических последовательностей.

Создание способов направленной беспроводной передачи и диаграммообразования в сверхширокополосных (СШП) системах особенно актуально, так как допустимая излучаемая мощность отдельных СШП-приемопередатчиков не может превышать предельных значений, которые на несколько порядков меньше аналогичных уровней спектральной плотности мощности для узкополосных систем. Поэтому управление направленностью излучения СШП-сигналов является важным способом увеличения отношения сигнал/шум в точке приема.

Цель данной работы — экспериментальная демонстрация когерентного сложения близких по форме хаотических радиоимпульсов в беспроводном канале. Импульсы при этом формируются не цифровым, а аналоговым образом при помощи генераторов хаоса. Метод их получения основан на результатах работ [3, 17, 18], где было показано,

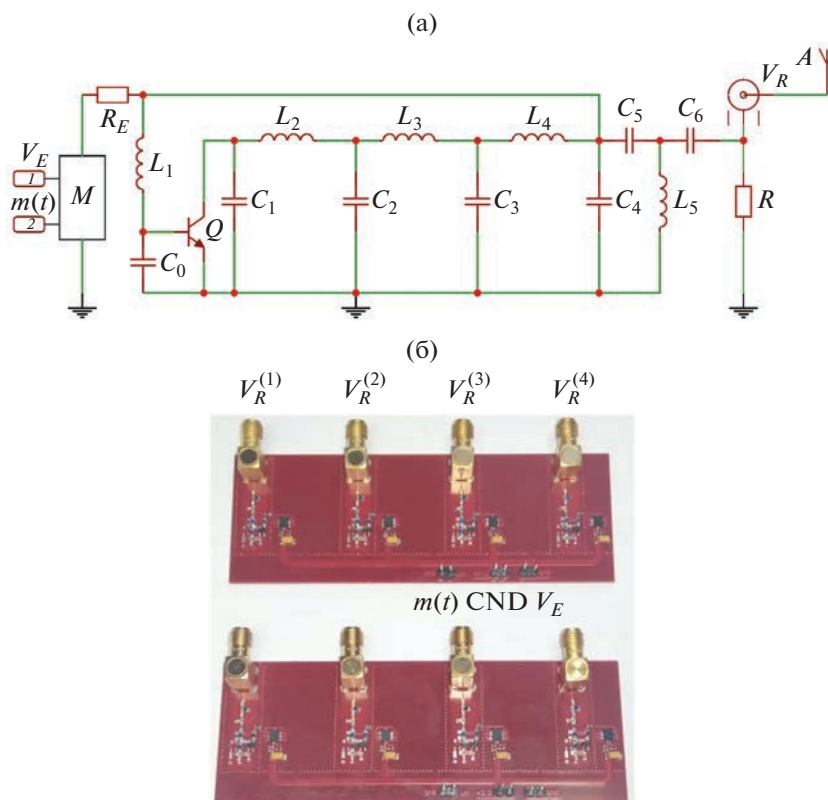


Рис. 1. Схема генератора хаотических колебаний (а): 1 — вход питания с амплитудой V_E ; 2 — вход для подачи видеоимпульсов питания $m(t)$; V_R — сигнал на выходе генератора для подачи на антенну. Макеты генераторов хаоса (б), применяемых в эксперименте: GND — земля, $V_R^{(1)}$, $V_R^{(2)}$, $V_R^{(3)}$, $V_R^{(4)}$ — СВЧ-выходы генераторов.

что имеется физически и инженерно реализуемый способ получения таких импульсов с повторяющейся формой. С практической точки зрения это интересно, так как временная когерентность при излучении импульсов потенциально дает возможность использовать независимые излучатели хаотических радиопульсов для организации заданной диаграммы направленности. Для реализации этого необходимо убедиться в возможности когерентного сложения импульсов в заданной точке пространства, что и показывается в данной статье.

1. ГЕНЕРАТОР ХАОТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Генератор хаоса, используемый в данной работе, относится к семейству одностранторных генераторов, теоретические и экспериментальные подходы к созданию которых разрабатывались в течение ряда лет [19–23] и которые пользуются популярностью и активно исследуются [24] до сих пор.

В работе используется генератор [3] (рис. 1а), имеющий частотно-избирательную систему 12-го

порядка, при помощи которой формируются хаотические колебания в частотном диапазоне от 100 до 500 МГц, с плоской огибающей спектра в пределах данной полосы.

Согласно методу [3, 25] хаотические СШП-радиоимпульсы в генераторах этого класса формируются путем включения и выключения единственного источника внешнего питания (V_E) в заданные интервалы времени. В данном случае питание включается и выключается внешним видеосигналом $m(t)$. Автоколебания в системе возникают при отпирании перехода база-эмиттер транзистора при превышении напряжением V_E некоторого порогового значения. Режим работы генератора во включенном состоянии определяется амплитудой питания V_E .

Динамическая система, описывающая данный генератор, имеет единственное положение равновесия [3]. Благодаря этому при выключении питания генератор переходит в состояние покоя, так что при подаче видеоимпульса питания он каждый раз стартует с одних и тех же начальных условий, обеспечивая генерацию хаотических радиопульсов, начальные участки которых совпадают с высокой степенью точности.

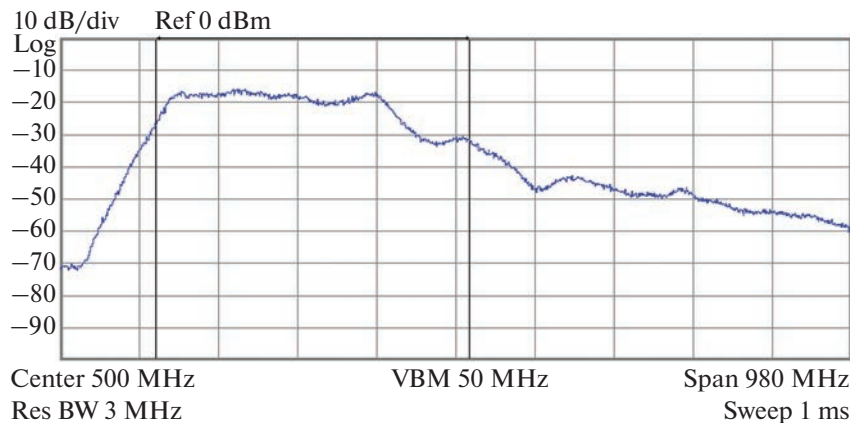


Рис. 2. Спектральная плотность мощности сигнала генератора хаоса для напряжения питания $V_E = 3.56$ В (скриншот спектроанализатора Agilent 9444N): центр (Center) – 500 МГц, охват по частоте (Span) – 980 МГц.

Описываемые эксперименты проводили на базе двух макетов, каждый из которых состоит из четырех конструктивно идентичных экземпляров генераторов хаотических колебаний, выполненных на единой печатной плате из однотипных радиоэлементов (см. рис. 16). Точность подбора номиналов составляет 2%. Использовались радиоэлементы общего назначения, доступные в свободной продаже со следующими номиналами: $L_1 = 47$ нГн; $L_2 = 10$ нГн; $L_3 = 47$ нГн; $L_4 = 27$ нГн; $L_5 = 47$ нГн; $C_0 = 0.4$ пФ; $C_1 = 1.5$ пФ; $C_2 = 10$ пФ; $C_3 = 15$ пФ; $C_4 = 15$ пФ; $C_5 = 10$ пФ; $C_6 = 10$ пФ; $R_E = 52.3$ Ом; $R = 50$ Ом; $R_1 = 25$ Ом; $R_2 = 25$ Ом; $R_3 = 25$ Ом; $R_4 = 25$ Ом; $R_5 = 25$ Ом.

Подача питания на генераторы хаотических колебаний реализована через общий для всех генераторов вход питания V_E , от которого питание подводится на каждый генератор в отдельности. Длина проводников питания, соединяющих общий для всех генераторов вход по питанию со входом питания каждого генератора в отдельности, сделана равной для обеспечения совпадения момента времени включения генераторов. Включение генераторов осуществляется при помощи ключей, управляемых сигналом $m(t)$, так что хаотический сигнал генерируется, если $m(t) = 0$, не генерируется если $m(t) = 1$ (инверсная логика).

К выходам $V_R^{(1)}$, $V_R^{(2)}$, $V_R^{(3)}$, $V_R^{(4)}$ может подключаться нагрузка (антенна). При постоянной подаче питания генераторы формируют непрерывный хаотический сигнал, спектр мощности которого изображен на рис. 2. Мощность сигнала каждого генератора составляет 1.4 мВт при напряжении питания 3.6 В и потребляемом токе 50 мА.

Как было показано в [3], данные генераторы обеспечивают воспроизводимость формы начального участка колебаний в импульсе как в пределах импульсной последовательности от одного

генератора, так и между различными образцами генераторов, что необходимо для осуществления когерентного сложения сигналов от разных экземпляров генераторов.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Экспериментальная проверка возможности когерентного сложения хаотических радиоимпульсов в заданной точке пространства осуществлялась в соответствии со схемой на рис. 3а на стенде (рис. 3б), в котором были использованы описанные выше генераторы хаотических колебаний (см. рис. 1).

Идея эксперимента заключается в синхронном (одновременном) включении генераторов $G1$, $G2$, под управлением модулирующего видеоимпульса, одновременном излучении хаотических радиоимпульсов и наблюдении выходного сигнала на приемной антенне $A3$, которая находится на одинаковом расстоянии d от излучающих антенн $A1$, $A2$.

Цель эксперимента – убедиться, что: 1) при подаче сигнала от каждого из генераторов $G1$ и $G2$ в отдельности формируется на выходе антенны $A3$ последовательность из хаотических радиоимпульсов, начальные участки которых совпадают; 2) при согласованном излучении хаотических радиоимпульсов излучателями $G1-A1$, $G2-A2$ происходит их когерентное сложение в точке приема $A3$, при этом форма начального участка хаотических радиоимпульсов сохраняется от импульса к импульсу (необходимое условие когерентного сложения).

Напряжения на панели генераторов хаоса $G1$, $G2$ подается от единого источника питания P_S . Формирование хаотических радиоимпульсов осуществлялось при значении напряжения питания генераторов $V_E = 3.56$ В. Одновременное излучение хаотических радиоимпульсов обеспечивалось за счет

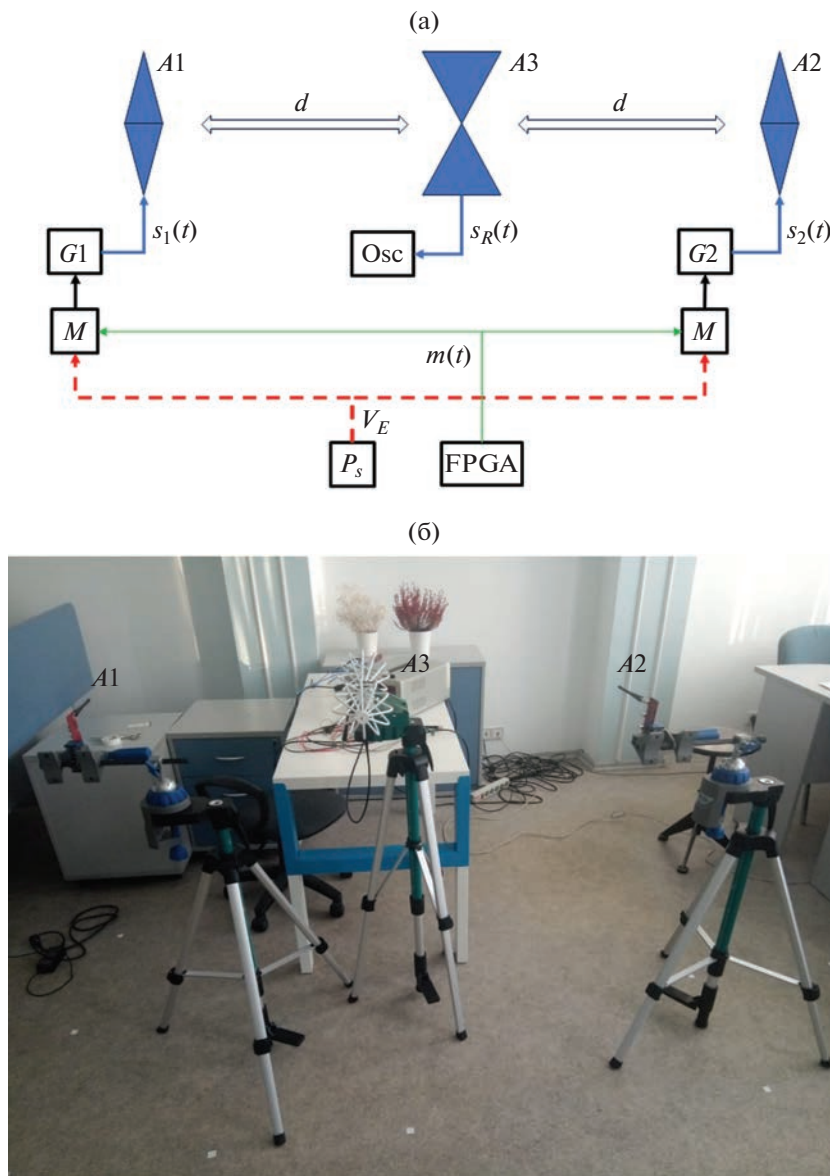


Рис. 3. Схема (а) и фото (б) стенда для реализации когерентного сложения хаотических сигналов $s_1(t)$ и $s_2(t)$, поступающих от генераторов хаоса G_1 и G_2 соответственно; FPGA — генератор периодической последовательности видеоимпульсов $m(t)$ на базе ПЛИС; P_s — источник питания, M — ключ, модулирующий питание генераторов; A_1, A_2 — излучающие антенны; A_3 — приемная антенна, $d = 1$ м.

синхронной подачи на оба генератора видеоимпульсов питания $m(t)$ макетной платой FPGA (рис. 3а).

Результаты измерений приведены на рис. 4 и 5. На рис. 4 изображены реализации трех хаотических радиоимпульсов длительностью 625 нс, формируемых на выходе приемной антенны A_3 при излучении сигнала генератором G_1 при помощи антенны A_1 . Прямоугольниками отмечена область начала хаотических радиоимпульсов, где форма сигнала совпадает с высокой степенью точности как между различными импульсами, производимыми одним генератором, так и между импульса-

ми, производимыми разными экземплярами генераторов.

Сигнал $s_R(t)$, регистрируемый приемной антенной A_3 , переводили в цифровую форму с помощью осциллографа с частотой оцифровки 2.5 ГГц, выделяли из этого сигнала моменты начала радиоимпульсов за счет синхронизации с модулирующим сигналом $m(t)$ и сравнивали начальные фрагменты импульсов друг с другом (рис. 5). На рисунке представлены реализации начальных фрагментов 10 хаотических радиоимпульсов, когда на приемную антенну подается сигнал с гене-

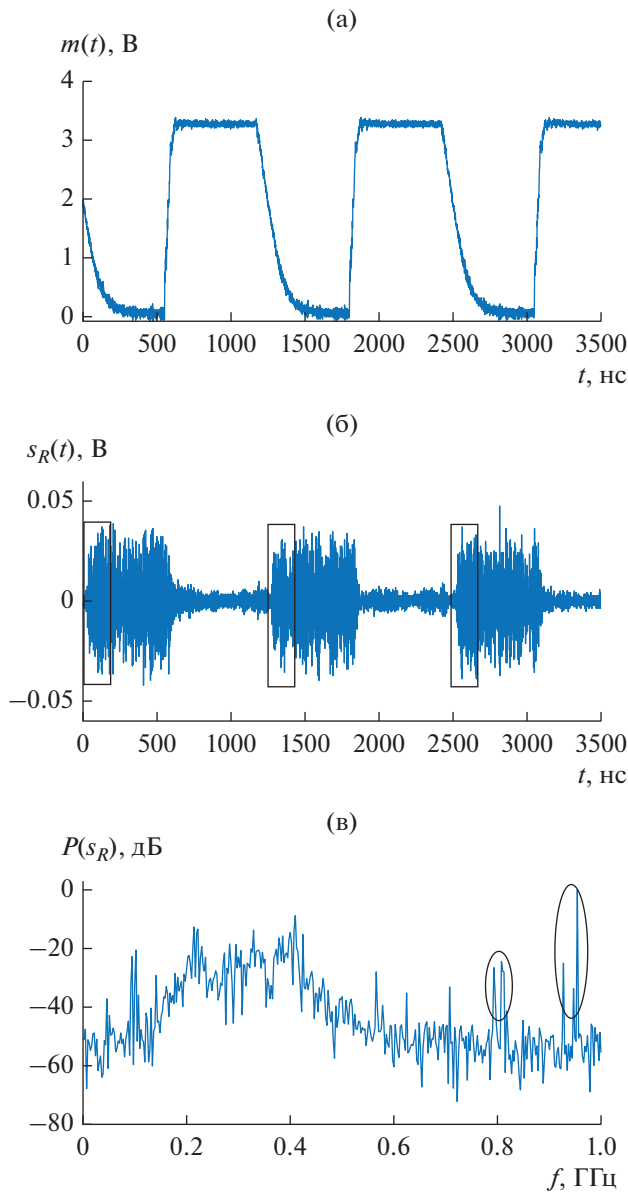


Рис. 4. Реализации сигнала $m(t)$, модулирующего питание генератора (а); реализации сигнала $s_R(t)$ на выходе антенны АЗ (б) при излучении сигнала от генератора $G1$ через антенну А1 (прямоугольниками отмечены области импульсов, содержащие близкие по форме участки сигналов); и спектр мощности (в) этого сигнала $P(s_R(t))$, овалами отмечены частоты сотовой связи, наблюдаемые в эксперименте.

ратора $G1$ (см. рис. 5а), генератора $G2$ (см. рис. 5б) и с обоих генераторов (см. рис. 5в).

Можно убедиться, что начальные формы импульсов на протяжении приблизительно 35 нс во всех трех случаях одинаковы. Это означает, что когерентность начальных фрагментов радиоимпульсов сохраняется при синхронном во времени излучении последовательности импульсов одновременно от обоих генераторов. При этом на ан-

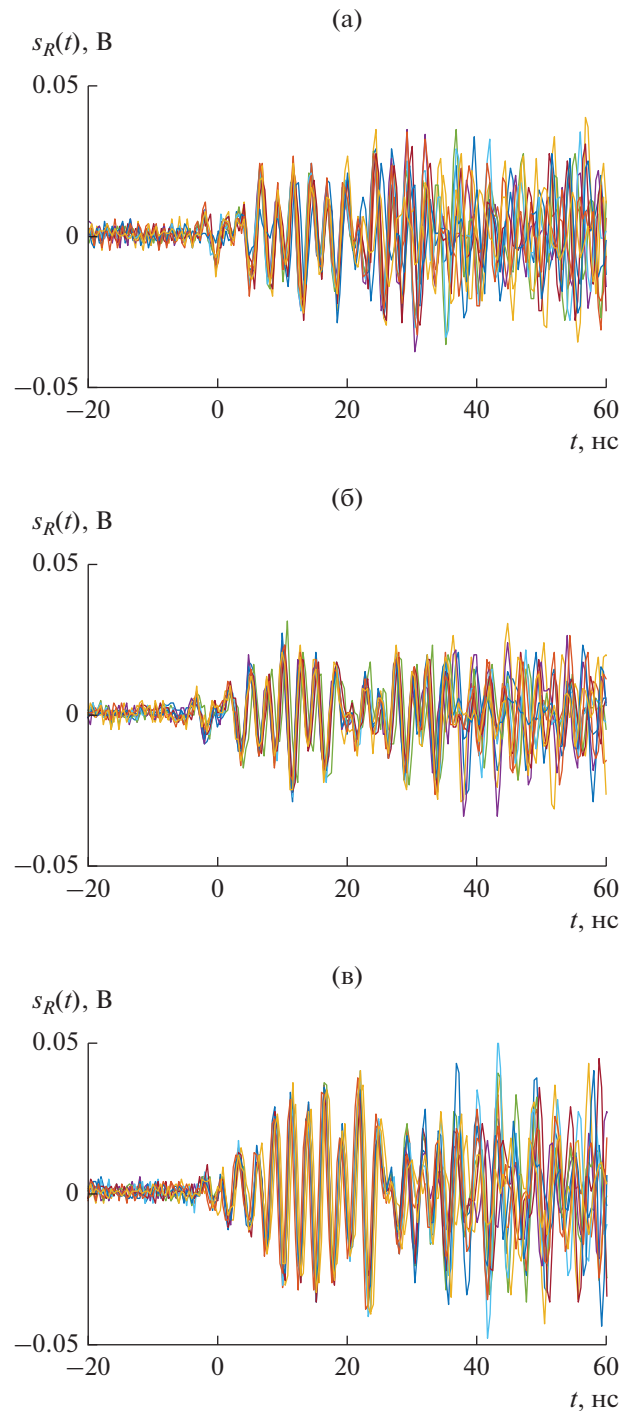


Рис. 5. Реализации 10 хаотических радиоимпульсов на выходе антенны АЗ, совмещенные по времени их начала, при передаче на антенну сигнала от каждой пары $G1-A1$ (а) и $G2-A2$ (б) и при передаче сигнала одновременно от $G1-A1$ и $G2-A2$ (в).

тенне АЗ формируется сигнал с амплитудой в $\sim\sqrt{2}$ превышающий амплитуду сигнала от каждого из генераторов в отдельности, т.е. мощность сигнала удваивается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе экспериментально продемонстрировано формирование близких по форме хаотических радиопульсов, прошедших беспроводный канал, и возможность когерентного сложения таких импульсов на приемной антенне. Импульсы при этом излучаются двумя независимыми генераторами хаотических колебаний в согласованные моменты времени.

Возможность реализации когерентного сложения хаотических радиопульсов в беспроводном канале при их излучении независимыми генераторами хаотических колебаний практически полезна для разработки радио-передающих СШП-систем с ограниченной спектральной плотностью мощности излучения.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-29-00297).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kaddout G. // IEEE Access. 2016. № 4. P. 2621.
2. Kuzmin L.V., Efremova E.V. // Electronics. 2023. № 12. P. 1324.
3. Kuzmin L.V., Efremova E.V., Itskov V.V. // Sensors. 2023. № 23. P. 6864.
4. Дмитриев А.С., Герасимов М.Ю., Ицков В.В. и др. // РЭ. 2017. Т. 62. № 4. С. 354.
5. Dmitriev A.S., Kuzmin L.V., Lazarev V.A. et al. // Proc. 2017 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO). Kazan. 3–4 Jul. N.Y.: IEEE, Paper No. 7997519.
6. Кузьмин Л.В., Гриневич А.В., Ушаков М.Д. // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. № 16. С. 48.
7. Кузьмин Л.В., Гриневич А.В. // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. № 16. С. 33.
8. Messaadi M., Teguig D., Sadoudi S. et al. // J. Commun. Technologies and Electronics. 2021. V. 66. № 2. P. S194.
9. Erkucuk S., Kim D.I. // Proc. 2004 IEEE Global Telecommunications Conf. GLOBECOM'04. Dallas. 29 Nov.–3 Dec. N.Y.: IEEE, 2004. V. 2. P. 804.
10. Manikandan M.S.K., Ravikumar S., Abhaikumar V., Thiruvengadam S. J. // Proc. 2007 2nd Int. Conf. on Communication Systems Software and Middleware Bangalore. 7–2 Jan. N.Y.: IEEE, 2007. Paper № 382453.
11. Kotti A., Meherzi S., Marcos S., Belghith S. // Proc. 2009 First Int. Conf. on Communications and Networking. Chennai. 3–6 Nov. N.Y.: IEEE, 2009. Paper № 5373551.
12. Liu C., Cheng J., Zhang R. // Proc. 2019 12th Int. Symp. Computational Intelligence and Design (ISCID). Hangzhou. 14–15 Dec. N.Y.: IEEE, 2009. V. 2. P. 235.
13. Yuan G., Chen Z., Gao X., Zhang Y. // IEEE Comm. Lett. 2021. V. 25. № 9. P. 2834.
14. Haimovich A.M., Blum R.S., Cimini L.J. // IEEE Signal Processing Magaz. 2008. V. 25. № 1. P. 116.
15. Ben Z.J., Belghith S. // Proc 2016 24th Int. Conf. on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM). Split. 22–24 Sept. N.Y.: IEEE, 2016. Paper № 777227.
16. Zeng G., Liao Y., Wang J., Liang Y.-C. // IEEE Trans. 2023. V. VT-72. № 8. P. 10965.
17. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Кузьмин Л.В., Атанов Н.В. // РЭ. 2006. Т. 51. № 5. С. 593.
18. Атанов Н.В., Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Кузьмин Л.В. // РЭ. 2006. Т. 51. № 12. С. 1454.
19. Kennedy M.P. // IEEE Trans. 1994. V. CS I-41. № 11. P. 771.
20. Peter K. // Int. J. Bifurcation and Chaos. 2002. V. 12. № 10. P. 2229.
21. Lindberg E., Murali K., Tamasevicius A. // IEEE Trans. 2005. V. CS II-52. № 10. P. 661.
22. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А., Григорьев Е.В. // РЭ. 2007. Т. 52. № 10. С. 1232.
23. Ефремова Е.В., Дмитриев А.С. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. № 2. С. 1.
24. Minati L., Innocenti G., Mijatovic G. et al. // Chaos, Solitons & Fractals. 2022. № 157. Article 111878.
25. Andreyev Y. V., Dmitriev A. S., Efremova E. V. et al. // Int. J. Bifurcation and Chaos. 2005. V. 15. № 11. P. 3639.