

01.5;11

Экспериментальная реализация относительной схемы беспроводной передачи информации на хаотических радиоимпульсах

© А.С. Дмитриев, Т.И. Мохсени, М.М. Петросян

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

E-mail: chaos@cplire.ru

Поступило в Редакцию 18 июля 2022 г.

В окончательной редакции 18 июля 2022 г.

Принято к публикации 26 июля 2022 г.

Экспериментально доказана возможность практической реализации беспроводной схемы относительной передачи на основе хаотических радиоимпульсов. С этой целью создан макет схемы связи в диапазоне частот 200–500 МГц для передачи двоичной информации и проведены эксперименты с ним. Полученные результаты полностью подтверждают разработанные ранее теоретически принципы функционирования схемы и ее основные свойства.

Ключевые слова: динамический хаос, сверхширокополосные сигналы, относительная передача информации, корреляционный прием.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.18.53391.19312

Наиболее эффективными системами передачи информации являются системы с когерентной демодуляцией, в которых на приемной стороне имеются или могут создаваться копии базисных сигналов. В тех случаях, когда это невозможно, используются относительные когерентные системы передачи, где сигналы, с которыми производится сравнение, передаются вместе с сигналами, несущими информацию [1–3]. Для аналоговых хаотических сигналов ввиду их нерегулярности организовать систему базисных сигналов и иметь их копию в приемнике проблематично. Поэтому относительные системы привлекли к себе внимание, как только начались исследования по использованию хаотических сигналов в качестве носителей информации в системах связи. Наиболее популярной, предложенной на начальном этапе исследований относительной схемой передачи с использованием хаотических сигналов оказалась схема DCSK (differential chaotic shift keying) [4], которая обладала значительно более высокой помехоустойчивостью, чем известные к тому времени методы на основе хаотической синхронизации [5–8]. Однако с практической точки зрения особенность схемы DCSK заключается в том, что она требует использования задержки в передатчике и приемнике на время, сопоставимое с длительностью передаваемых битов, а это при аналоговой реализации схемы приводит к физической большой длине линии задержки (десятки и сотни метров). Поэтому попытки экспериментальной реализации схемы DCSK связаны в основном не с аналоговой, а с цифровой ее реализацией [9,10].

В работах [11,12] была предложена альтернатива схеме DCSK — прямохаотическая схема относительной передачи информации DC² (direct chaotic differentially coherent), в которой отсутствуют задержки большой длительности. В этой схеме длительность задержек в

приемнике и передатчике в отличие от схемы DCSK определяется не длительностью бита, а временем спада функции автокорреляции τ хаотического сигнала. По порядку величины $\tau = 1/\Delta F$, где ΔF — полоса хаотического сигнала. Если, например, полоса хаотического сигнала будет 300 МГц, то время автокорреляции равно 3 ns, а расстояние, которое за это время проходит электромагнитная волна в свободном пространстве, составляет 0.9 м. В этом случае в качестве линии задержки может быть использован, например, высокочастотный кабель длиной не более метра.

Следует отметить также, что в схеме DC² для передачи информации используются хаотические радиоимпульсы с большим коэффициентом процессинга и защитными интервалами между импульсами, что теоретически обеспечивает высокую устойчивость передачи в многолучевых каналах и при значительном уровне помех.

Целью настоящей работы является создание макета схемы DC², а также его исследование для получения экспериментальных результатов, доказывающих практическую работоспособность предложенного метода передачи и соответствие его характеристик теоретическим оценкам и данным компьютерного моделирования.

Далее описывается и исследуется экспериментальный макет (рис. 1), созданный на основе схемы DC².

В макете источник хаотических радиоимпульсов реализован в виде двухтранзисторного генератора хаоса, управляемого напряжением (плата 1 на рис. 1). Он формирует хаотические радиоимпульсы с непрерывным спектром мощности в диапазоне 200–500 МГц (рис. 2, а) и автокорреляционной функцией с временем спада $\tau \approx 4–5$ ns (рис. 2, б). Длительность каждого импульса $T_i = 2 \mu\text{s}$; промежутки между импульсами — защитные интервалы — составляют $T_g = 4 \mu\text{s}$. Суммар-

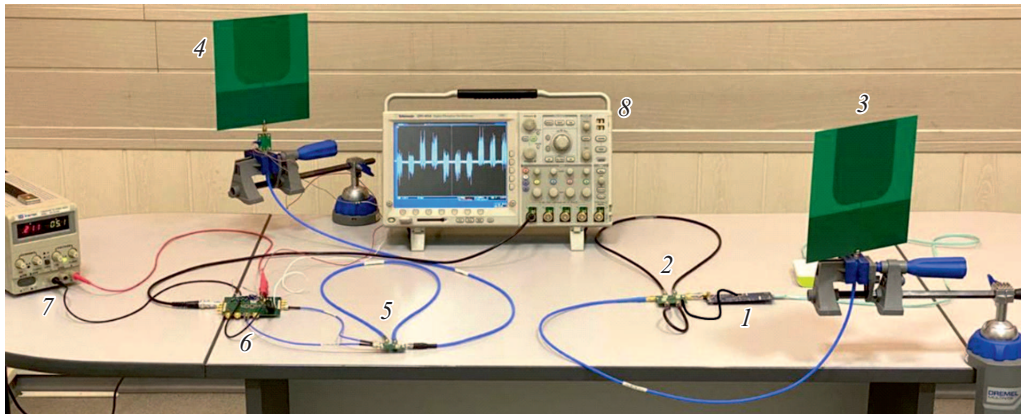


Рис. 1. Макет приемопередающей схемы. 1 — плата, включающая источник хаотических радиоимпульсов и микроконтроллер, формирующий информационную последовательность; 2 — плата, содержащая делитель на два канала, модулятор, линию задержки в одном из каналов и сумматор; 3 — передающая антенна; 4 — приемная антенна с МШУ на выходе; 5 — плата, содержащая делитель на два канала, линию задержки в одном из каналов и два выхода; 6 — плата перемножителя; 7 — источник питания; 8 — осциллограф.

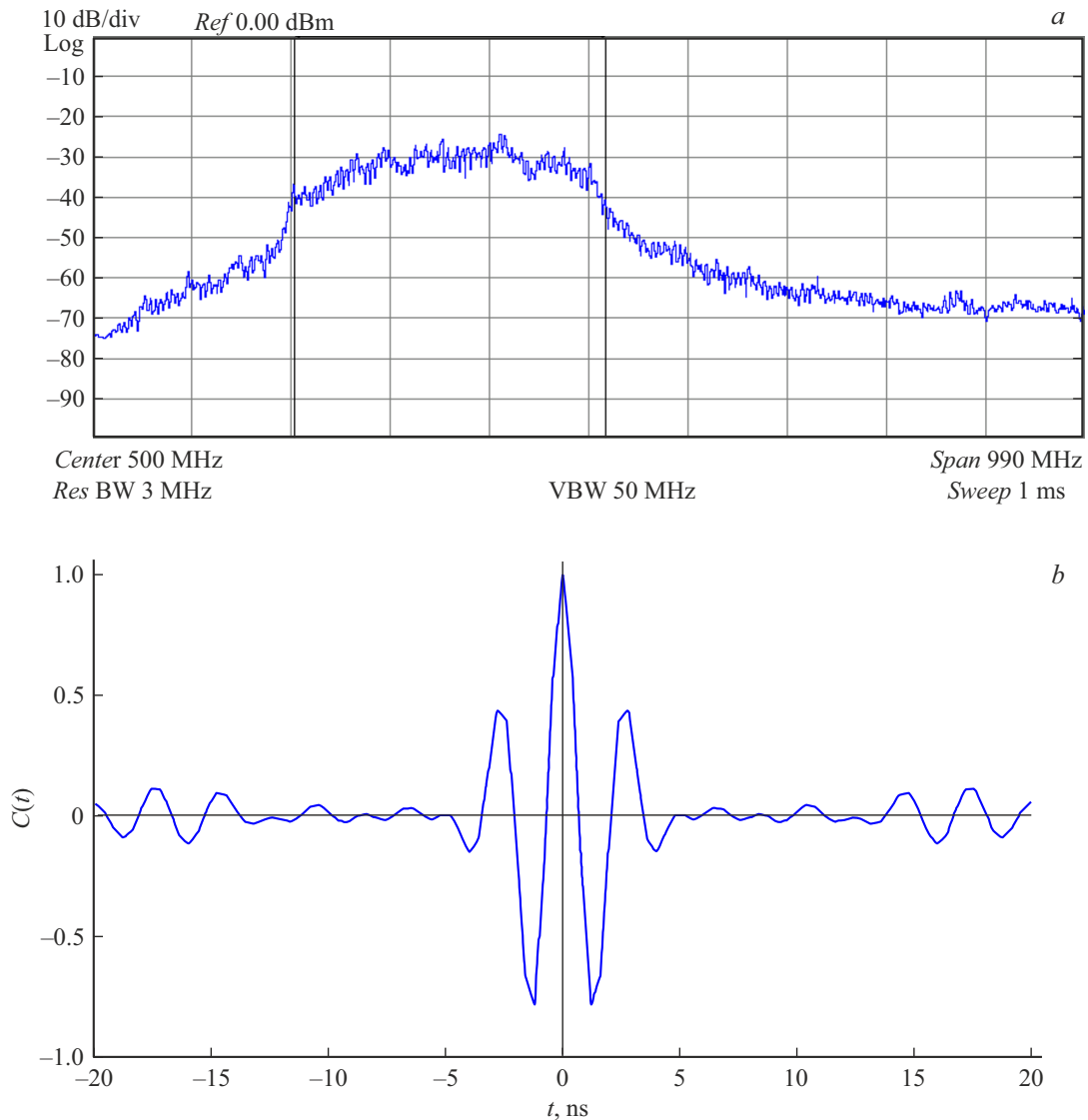


Рис. 2. Характеристики хаотических радиоимпульсов. *a* — спектр мощности, *b* — автокорреляционная функция.

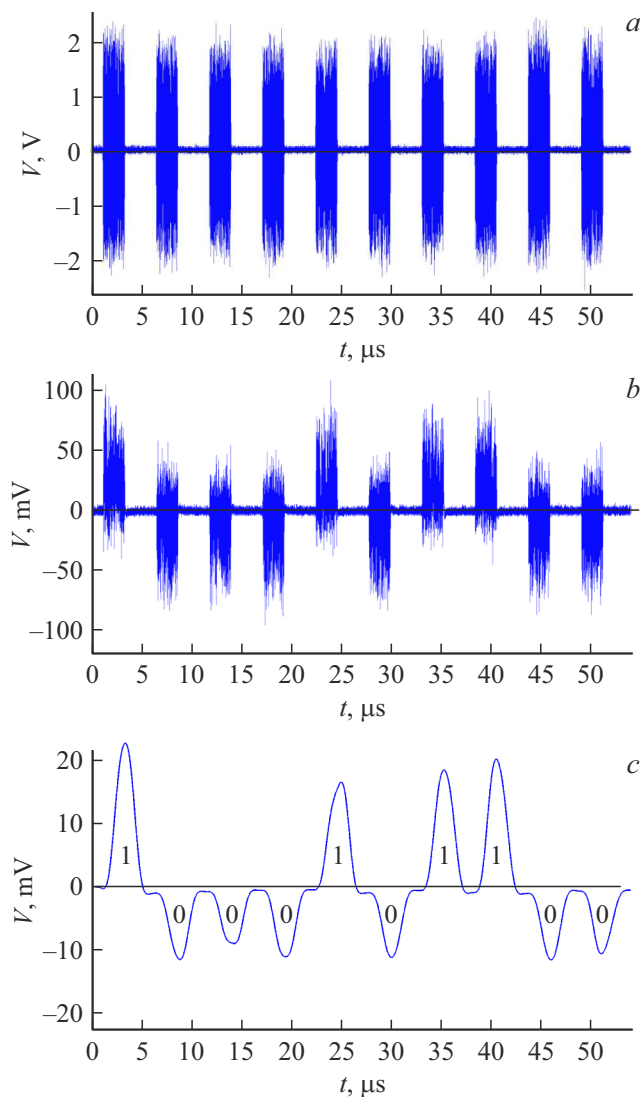


Рис. 3. Вид сигналов при преобразованиях в приемнике. *a* — поток импульсов на выходе сумматора передатчика, *b* — сигнал на выходе перемножителя, *c* — сигнал на выходе фильтра нижних частот.

ная длительность импульса и защитного интервала представляет собой время передачи одного бита $T_b = 6 \mu\text{s}$. Каждый импульс поступает в делитель (плата 2), после которого попадает в два канала. В первом канале его модулируют информационным сигналом путем умножения на ± 1 , подавая модулирующий сигнал с платы 1, а во втором канале задерживают на время τ . Умножение на $+1$ соответствует передаче „1“, умножение на -1 — передаче „0“. После этого сигналы суммируют, суммарный сигнал усиливает, он поступает в антенну 3 и излучается. При этом длина излучаемого суммарного импульса равна $T_r = T_i + \tau \approx 2 \mu\text{s}$.

Делитель на плате 2 в передатчике имеет рабочую полосу 1 GHz. При инверсном включении такое же устройство используется на выходе платы 2 в качестве сумматора. В передатчике и приемнике необходимо иметь

одинаковые задержки с временем запаздывания, равным или превышающим время автокорреляции импульсов, формируемых источником хаотических радиоимпульсов.

Для формирования задержек с временем τ был использован сверхвысокочастотный коаксиальный кабель длиной 1 м.

Следующий элемент схемы передатчика — модулятор. Как отмечено выше, функция модулятора заключается в манипуляции знака входного сигнала: на выходе модулятора нужно иметь сигнал того же знака, что и на входе, при передаче „1“ и инвертированный по отношению к входному сигнал при передаче „0“. В качестве инвертирующего элемента был использован фрагмент кабеля с задержкой на время спада автокорреляционной функции хаотического сигнала до первого минимума (рис. 2, *b*), составляющее примерно 1 ns. В этом минимуме знак автокорреляционной функции отрицателен. Таким образом, на выходе инвертирующего элемента формируется хаотический импульс, значения которого по знаку противоположны значениям входного импульса, т. е. исходный импульс умножен на -1 . Длина фрагмента кабеля, обеспечивающая задержку 1 ns, равна 0.23 м. Именно такой фрагмент кабеля и используется в макете в качестве инвертирующего сигнал элемента.

В приемнике макета системы передачи (рис. 1) принимаемый антенной 4 сигнал усиливается малошумящим усилителем (МШУ) и поступает на делитель, расположенный на плате 5, где разделяется на две составляющих, одна из которых непосредственно подается на перемножитель (плата 6), а вторая — после прохождения задержки. Перемножитель реализован на широкополосной микросхеме перемножения аналоговых сигналов с рабочей полосой частот от 0 до 2 GHz. Обработка сигнала с выхода перемножителя осуществлялась в два этапа. На первом этапе при помощи осциллографа производилось исключение из сигнала компонент выше 500 MHz, оцифровка и формирование CSV-файлов, записываемых на внешнее устройство обработки сигнала (персональный компьютер). На втором этапе в среде Matlab осуществлялась фильтрация сигнала с помощью цифрового фильтра нижних частот с целью выделения низкочастотной информационной составляющей.

С созданным макетом проводились эксперименты по беспроводной передаче данных. Система работала в непрерывном режиме со скоростью передачи 167 kbit/s. На рис. 3 показан фрагмент сигнала в разных точках схемы при передаче последовательности двоичных символов 1000101100. На рис. 3, *a* изображены импульсы на выходе сумматора передатчика. Уровень сигнала составляет немного больше 2V. В экспериментах беспроводный канал представлял собой комбинацию передающей и приемной антенн, разделенных воздушным промежутком размером ~ 1 м. Использовались антенны небольших размеров (20×20 см), согласованные во всем диапазоне хаотического сигнала. Каждая из них имела коэффициент ослабления около 7 dB. Коэффициент ослабления сигнала на расстоянии 1 м за

счет рассеяния волны в пространстве при применении идеальных ненаправленных антенн на используемых частотах составляет 22 dB. Поэтому суммарные потери будут порядка 36 dB. Для компенсации этих потерь на входе приемника в соответствии со структурной схемой системы передачи используется МШУ с $K = 20$ dB, расположенный на выходе антенны 4. С учетом этого усиления можно ожидать получения уровней сигнала на входе приемника, достаточных для уверенного приема и успешной демодуляции. Экспериментально это было подтверждено. На рис. 3, *b* показан фрагмент потока импульсов после перемножителя. Последовательность импульсов огибающей (рис. 3, *c*) на выходе фильтра нижних частот соответствует двоичной последовательности информационного сигнала на входе экспериментального макета схемы передачи.

Таким образом, в ходе проведенных исследований был разработан и изготовлен приемопередающий макет относительной сверхширокополосной прямохаотической связи. На нем были впервые проведены успешные эксперименты по беспроводной передаче цифровой информации и тем самым доказаны практическая реализуемость и работоспособность предложенной в работах [11,12] схемы DC².

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Н.Т. Петрович, М.К. Размахнин, *Системы связи с шумоподобными сигналами* (Сов. радио, М., 1969).
- [2] Л.Е. Варакин, *Системы связи с шумоподобными сигналами* (Радио и связь, М., 1985).
- [3] Н.Т. Петрович, *Относительные методы передачи информации* (Книга-М, М., 2003).
- [4] G. Kolumban, M. Kennedy, L.O. Chua, *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, **44** (10), 927 (1997). DOI: 10.1109/81.633882
- [5] L. Kocarev, K.S. Halle, K. Eckert, L.O. Chua, U. Parlitz, *Int. J. Bifurc. Chaos*, **2** (3), 709 (1992). DOI: 10.1142/S0218127492000823
- [6] M.K. Cuomo, A.V. Oppenheim, S.H. Strogatz, *IEEE Trans. Circuits Syst. II*, **40** (10), 626 (1993). DOI: 10.1109/82.246163
- [7] P.T. Downes, *SPIE*, **2038**, 227 (1993). DOI: 10.1117/12.162688
- [8] U. Parlitz, L. Chua, L. Kocarev, K. Halle, A. Shang, *Int. J. Bifurc. Chaos*, **2** (4), 973 (1992). DOI: 10.1142/S0218127492000562
- [9] G. Kaddoum, J. Olivain, G. Beaufort Samson, P. Giard, F. Gagnon, in *2012 Int. Symp. on wireless communication systems (ISWCS)* (IEEE, 2012), p. 934. DOI: 10.1109/ISWCS.2012.6328505
- [10] S.H. Fadhil, S.-A.I. Doaa, *Int. J. Adv. Sci. Technol.*, **29** (03), 12893 (2020).
- [11] А.С. Дмитриев, Т.И. Мохсени, К.М. Сьерра-Теран, *Радиотехника и электроника*, **63** (10), 1074 (2018). DOI: 10.1134/S0033849418100078 [A.S. Dmitriev, T.I. Mokhseni, K.M. Sierra Teran, *J. Commun. Technol. Electron.*, **63** (10), 1183 (2018). DOI: 10.1134/S1064226918100078].
- [12] А.С. Дмитриев, Т.И. Мохсени, К.М. Сьерра-Теран, *Изв. вузов, Прикладная нелинейная динамика*, **26** (4), 59 (2018). DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-4-59-74