

01.5;11

## Многопользовательский доступ в системах относительной передачи информации на основе хаотических радиоимпульсов

© А.С. Дмитриев, Т.И. Мохсени, К.М. Сьерра-Теран

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

E-mail: chaos@cplire.ru

Поступило в Редакцию 27 марта 2020 г.

В окончательной редакции 27 марта 2020 г.

Принято к публикации 6 апреля 2020 г.

Показана возможность организации многопользовательского доступа на основе относительной схемы передачи, использующей в качестве носителя информации хаотические радиоимпульсы. Получены теоретические оценки максимального количества абонентов и информационной емкости многопользовательской системы. Проведено компьютерное моделирование, подтверждающее справедливость полученных теоретических результатов.

**Ключевые слова:** передача информации, хаотические радиоимпульсы, многопользовательский доступ.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.13.49592.18323

Относительные методы передачи информации с широкополосными аналоговыми шумовыми (шумоподобными) сигналами исследуются начиная с 50-х годов XX века [1–3]. Однако долгое время развитию этих методов препятствовали сложности, связанные с формированием самих аналоговых шумовых сигналов. Ситуация стала меняться с появлением и разработкой принципов формирования шумоподобных сигналов радио- и СВЧ-диапазона на основе динамического хаоса.

Первая относительная схема передачи приемопередатчиков с хаотическими носителями информации DCSK (differential chaotic shift keying) была предложена в [4–6]. Идея DCSK заключается в том, что для передачи бита длительностью  $T$  используется последовательная передача пары одинаковых фрагментов хаотического сигнала длительностью  $T/2$  каждый (для передачи „1“) или пары хаотического сигнала и ему антиподального сигнала тех же длительностей (для передачи „0“).

В схеме DCSK используются широкополосные линии задержки на времена, равные  $T/2$ . Их трудно реализовать в малогабаритном исполнении, что серьезно ограничивает практическую применимость схемы. Однако схема DCSK популярна при теоретических исследованиях. Так, например, после введения схемы DCSK как самими авторами, так и их последователями предлагались ее модифицированные варианты, в том числе с целью увеличения скорости передачи [7], повышения устойчивости в многолучевых каналах [8] и организации множественного доступа [9].

Недавно в [10–13] была предложена альтернативная схема относительной передачи информации на основе хаотических радиоимпульсов — DC<sup>2</sup> (direct chaotic differential communication) (рис. 1), в которой отсутствует проблема с большими длительностями задержек. В этой схеме длительность задержек в приемнике и передатчике в отличие от схемы DCSK определяется

не длительностью бита, а временем спада функции автокорреляции  $\tau$  хаотического сигнала. По порядку величины  $\tau = 1/\Delta F$ , где  $\Delta F$  — полоса хаотического сигнала. Если, например, полоса хаотического сигнала будет равна 1 GHz, то время автокорреляции  $\sim 1$  ns, а расстояние, которое за это время проходит электромагнитная волна в свободном пространстве, составит 0.3 м. В этом случае в качестве линии задержки может быть использован, например, высокочастотный кабель длиной около 0.2 м.

Цель настоящей работы — показать, что беспроводная схема передачи DC<sup>2</sup> может быть эффективно использована не только в режиме передачи „точка–точка“ в одной паре передатчик–приемник, но и для организации одновременной и независимой работы нескольких пар приемников и передатчиков, находящихся в одной и той же области физического пространства.

В схеме DC<sup>2</sup> для передачи информации используются хаотические радиоимпульсы с большим коэффициентом процессинга и защитными интервалами между импульсами. Введем следующие обозначения:  $T_i$  — длительность хаотического радиоимпульса,  $T_b$  — длительность бита,  $L = T_b/T_i$  — скважность,  $R$  — скорость передачи (в bit),  $W$  — полоса сигнала,  $K = W/(RL)$  — коэффициент процессинга для хаотического радиоимпульса, SNR — отношение сигнал/шум,  $E_b/N_0 = K \cdot \text{SNR}$  — отношение энергии, приходящейся на бит передаваемой информации, к спектральной плотности шума в полосе сигнала.

Особенностью схемы DC<sup>2</sup> является наличие внутренних собственных шумов (внутренней интерференции) при передаче информации. Будем обозначать спектральную плотность этих шумов через  $N_i$ . На вход приемника кроме полезного сигнала поступают три „шумовые“ компоненты [10]. Интенсивность каждой из компонент шума такая же, как у полезного сигнала. Наличие этих

шумовых компонент при отсутствии внешних шумов и применении антиподальной модуляции дает отношение сигнал/шум  $SNR = 2/3$  или  $SNR_{dB} = -1.75$  dB. Обычно энергетический потенциал канала связи определяется через минимальное требуемое значение отношения  $E_b/N_0$ , выраженное в dB. В нашем случае при отсутствии внешних шумов  $N_0 = N_i$ , и

$$E_b/N_{0,dB} = E_b/N_{i,dB} = SNR_{dB} + K_{dB}. \quad (1)$$

Из (1) следует, что получение требуемого значения отношения  $E_b/N_i$  при любом значении SNR может быть обеспечено за счет соответствующего выбора  $K$ . Например, в случае антиподальной модуляции вероятность ошибки  $10^{-3}$  достигается при  $E_b/N_i = 10$  dB. Поэтому компенсация внутренних шумов системы обеспечивается при  $K_{dB} > 11.75$  dB.

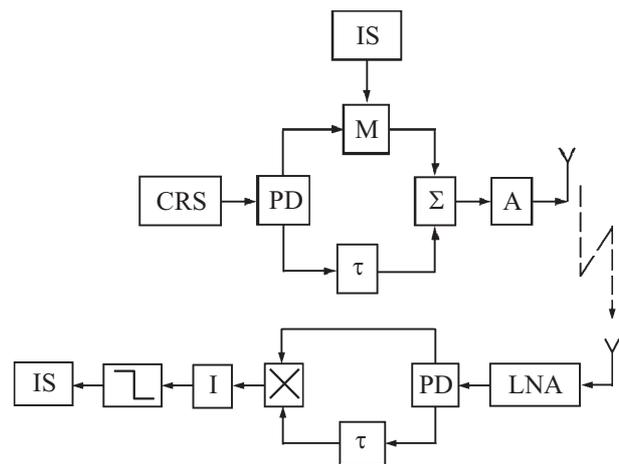
Пока рассматривались характеристики схемы без воздействия внешних шумов. Однако при достаточно большом процессинге сигнала система будет оставаться работоспособной даже при значительном уровне внешних шумов (SNR). В качестве этих внешних шумов могут, в частности, выступать сигналы других хаотических передатчиков, работающих в том же диапазоне частот. Это свойство схемы может быть положено в основу организации работы системы связи с множественным доступом.

Действительно, пусть имеется  $M$  пар передатчиков и приемников (рис. 2). Все передатчики одновременно излучают, вообще говоря, разные сигналы, которые попадают как к своим приемникам в качестве полезного сигнала (точнее, часть сигнала, попадающего в „свой“ приемник, является полезной, а часть представляет собой собственный шум системы), так и в „чужие“ приемники в качестве шумового (интерферирующего) сигнала.

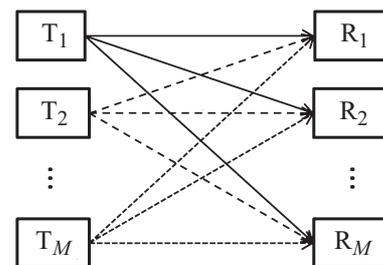
Для получения теоретической оценки будем считать, что во всех  $M$  передатчиках используются генераторы хаоса с одинаковыми статистическими и спектральными характеристиками выходного сигнала, время автокорреляции хаотического сигнала равно  $\tau_0$ , длительности импульсов во всех парах приемопередатчиков равны. Времена задержек в  $j$ -й паре приемопередатчиков  $\tau_j = j\tau_0$ ,  $j = 1, 2, 3, \dots, M$ . Такой набор задержек обеспечивает отсутствие корреляции своего сигнала в любом из  $M$  приемников с чужими сигналами.

Покажем, что рассматриваемая схема относительной передачи с использованием хаотических радиоимпульсов позволяет реализовать множественный доступ, т.е. одновременную работу в эфире нескольких пар приемопередатчиков, в которых используются в том числе одинаковые генераторы хаоса.

Поскольку схема DC<sup>2</sup> использует для извлечения полезного сигнала автокорреляционные свойства хаотического радиоимпульса, можно предположить, что применение процедуры корреляции будет также эффективно для выделения полезного сигнала пользователя на фоне



**Рис. 1.** Схема передачи: CRS — источник хаотических радиоимпульсов, PD — делитель, IS — информационная последовательность, M — модулятор,  $\tau$  — задержка,  $\Sigma$  — сумматор, A — усилитель, LNA — малошумящий усилитель, I — интегратор, крестиком обозначен перемножитель, знаком  $\square$  — пороговое устройство.



**Рис. 2.** Многопользовательская относительная система связи с  $M$  парами передатчиков ( $T_j$ ) и приемников ( $R_j$ ).

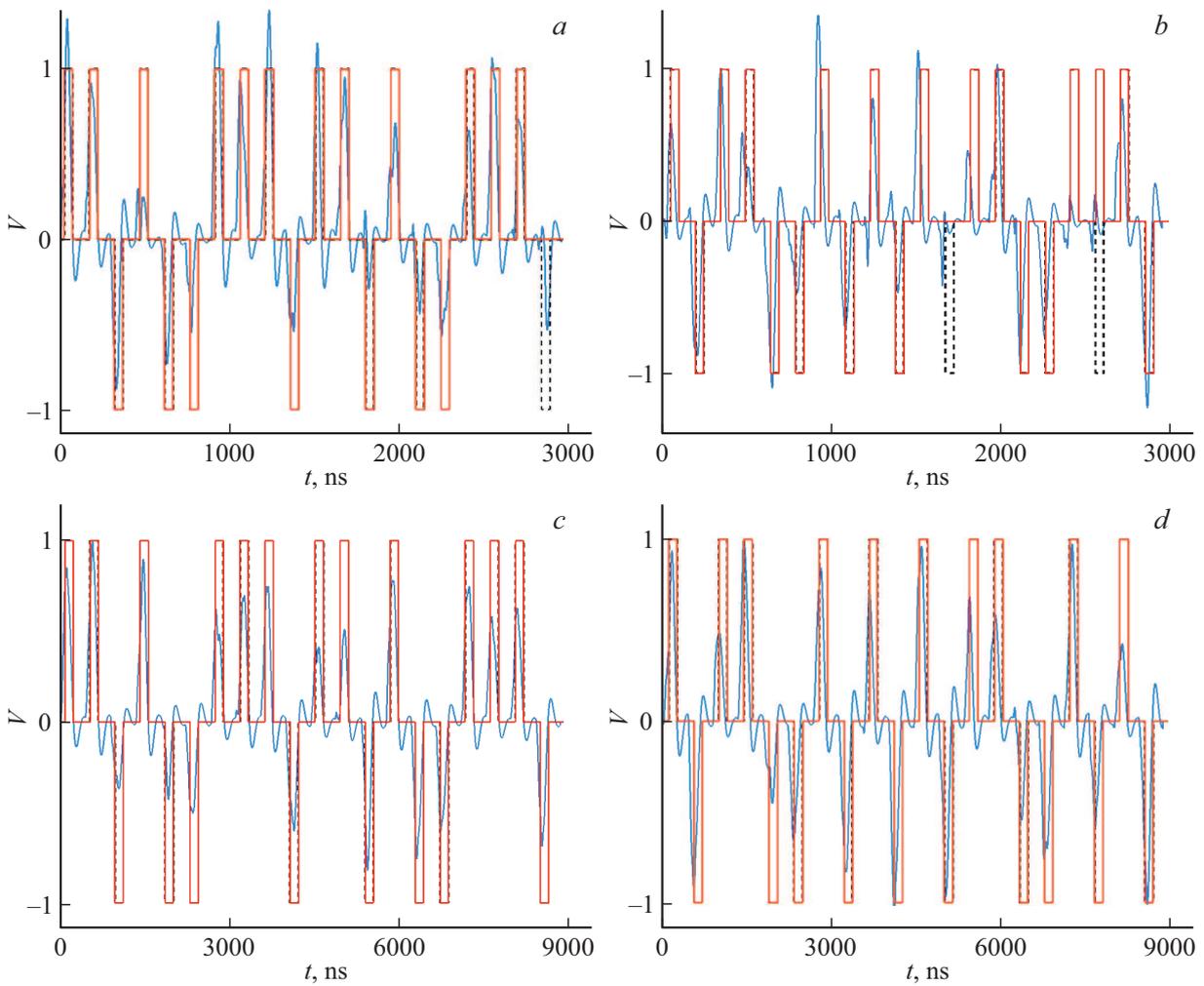
сигналов других пользователей, рассматриваемых как внешний шум. Ситуация в этом случае будет подобна ситуации с выделением полезных сигналов в системах CDMA [14].

Будем считать, что в многопользовательской системе с  $M$  парами приемопередатчиков применяется соответствующее управление мощностью излучения, так что сигналы, приходящие в данный  $j$ -й приемник от всех других устройств, имеют один и тот же уровень мощности  $p$ . Каждый приемник обрабатывает приходящий от своего передатчика сигнал на уровне мощности  $p$ , а  $M - 1$  посторонних сигналов интерферируют с ним, и каждый из этих сигналов также имеет уровень мощности  $p$ .

Отношение сигнал/интерференционная помеха на входе  $j$ -го приемника будет равно

$$SNR_j = (2/4)p / [(3/4)p + (M - 1)p] = 2/[3 + 4(M - 1)]. \quad (2)$$

Из (2) видно, как максимально возможное число пользователей в сети связано с минимальным требуемым значением  $SNR_j$  на пользователя. Для схем связи с большим коэффициентом процессинга  $K$  удобно перейти



**Рис. 3.** Выходные сигналы в приемниках 1 (*a,c*) и 4 (*b,d*) при коэффициентах процессинга 100 (*a,b*) и 300 (*c,d*). Сплошные кривые — сигналы на выходах интеграторов. Прямоугольники — сигналы на выходах пороговых устройств. Прямоугольники со сплошной границей и пунктирной границей отвечают правильно и ошибочно принятым битам соответственно.

Зависимость числа пользователей  $M$  и скорости передачи  $R$  в системе от коэффициента процессинга  $K$  при вероятности ошибок  $10^{-3}$  и полосе сигнала 2 GHz

Параметр	$K$									
	15	100	150	200	300	400	800	1000	2000	4000
$M$	1	2	3	4	6	7	11	12	20	31
$R$ , Mbps	64	10	6.6	5.0	3.3	2.5	1.25	1.0	0.5	0.25

от соотношения (2) к соотношению, связывающему максимальное число пользователей с  $E_b/N_i$ . Поскольку  $E_b/N_i = K \cdot \text{SNR}$ , из (2) следует, что

$$E_b/N_i = 2K/[3 + 4(M - 1)]. \quad (3)$$

Если присутствует дополнительный мешающий внешний шум  $\eta$ , включающий интерференционный, не связанный с приемопередатчиками системы шум и тепловой шум, то при вводе его в рассмотрение уравнение (3)

принимает вид

$$E_b/N_i = 2K/[3 + 4(M - 1) + 4\eta/p]. \quad (4)$$

Это означает, что максимально возможное число пользователей в ячейке будет равно

$$M = 1/4[1 + 2K/(E_b/N_i)] - \eta/p. \quad (5)$$

Минимальное (требуемое для обеспечения заданной вероятности ошибки) значение отношения  $E_b/N_i$  в схеме DC<sup>2</sup> нелинейно зависит от процессинга. Оценка этой

зависимости на основе аналитических соотношений, полученных в [10–12], приведена в таблице.

Для практического подтверждения возможности организации многопользовательского доступа на основе схемы передачи DC<sup>2</sup> и проверки полученных теоретических оценок было проведено компьютерное моделирование. При этом задержки в приемопередатчиках подбирались таким образом, чтобы исключить возможность относительного корреляционного приема „чужих“ сигналов. Это достигалось за счет того, что в передатчиках использовались сигналы с одинаковым временем автокорреляции  $\tau$ , длины импульсов и защитных (межимпульсных) интервалов были одинаковы, а линии задержек у приемников и передатчиков в парах с номерами 1, 2, ...,  $M$  были равны соответственно  $\tau$ ,  $2\tau$ , ...,  $M\tau$ . Моделирование в целом дало хорошее совпадение с оценками, приведенными в таблице.

В качестве примера приведем результаты для  $M = 4$ . Согласно данным таблицы, вероятность ошибки  $p = 10^{-3}$  достигается при коэффициенте процессинга  $K > 200$ . Расчеты проводились для коэффициентов процессинга 100, 200 и 300. При  $K = 100$  и длительности информационной последовательности 1000 bit в каждом из каналов обнаруживалось более 10 ошибок (рис. 3, *a, b*). При  $K = 200$  для той же длины последовательности наблюдались единичные ошибки. При моделировании с  $K = 300$  ошибки для последовательности длиной 1000 bit не наблюдались (рис. 3, *c, d*).

Таким образом, как теоретические оценки, так и результаты моделирования подтверждают возможность использования прямохаотической схемы относительной передачи DC<sup>2</sup> в многопользовательских системах сверхширокополосной беспроводной связи.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Петрович Н.Т., Размахнин М.К. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Сов. радио, 1969. 232 с.
- [2] Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
- [3] Петрович Н.Т. Относительные методы передачи информации. М.: Книга-М, 2003. 111 с.
- [4] Kolumban G., Kennedy M. // IEEE Trans. Circuits Syst. I. 1997. V. 44. N 10. P. 927–936.
- [5] Kolumban G., Vizvari B., Schwarz W., Abel A. // Proc. NDES'96. Seville, Spain, 1996. P. 87–92.
- [6] Kolumban G., Kennedy M.P., Jako Z., Kis G. // Proc. IEEE. 2002. V. 90. N 5. P. 711–732.
- [7] Kaddoum G., Gagnon F. // IEEE Trans. Circuits Syst. II. 2012. V. 59. N 7. P. 448–452.
- [8] Kennedy M.P., Kolumban G., Kis G., Jako Z. // IEEE Trans. Circuits Syst. I. 2000. V. 47. N 12. P. 1702–1711.
- [9] Lau F.C.M., Yip M.M., Tse C.K., Hau S.F. // IEEE Trans. Circuits Syst. I. 2002. V. 49. N 1. P. 96–104.
- [10] Дмитриев А.С., Мохсени Т.И., Сьерра-Теран К.М. // Радиотехника и электроника. 2018. Т. 63. № 10. С. 1074–1082.
- [11] Дмитриев А.С., Мохсени Т.И., Сьерра-Теран К.М. // Прикладная нелинейная динамика. 2018. Т. 26. № 4. С. 59–74.
- [12] Dmitriev A.S., Mokhseni T.I., Sierra-Teran C.M. // Nonlinear Phenom. Complex Syst. 2018. V. 21. N 3. P. 237–246.
- [13] Процессы передачи и обработки информации в системах со сложной динамикой / Под ред. А.С. Дмитриева, Е.В. Ефремовой. М.: Техносфера, 2019. 319 с.
- [14] Шахнович И.В. Современные технологии беспроводной связи. М.: Техносфера, 2006. 287 с.