

Многопользовательский доступ в системах относительной передачи информации с хаотическими носителями

А.С. Дмитриев, Т.И. Мохсени, S. M. Sierra-Teran

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Москва, Россия.
E-mail: chaos@cplire.ru*

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.

The possibility of organizing multi-user access based on a relative transmission scheme using chaotic radio pulses as an information carrier is shown. Theoretical estimates of the maximum number of subscribers and the information capacity of a multi-user system are obtained. A computer simulation was carried out, confirming the validity of the theoretical results obtained.

Относительные методы передачи информации с широкополосными аналоговыми шумовыми (шумоподобными) сигналами исследуются, начиная с 50-х годов 20 века [1-3]. Однако долгое время развитию этих методов препятствовали сложности 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 [10-12,14] была предложена альтернативная относительная схема передачи информации на основе хаотических радиоимпульсов - DC² (Direct Chaotic Differential Communication), 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 τ хаотического сигнала. По порядку величины $\tau = 1/\Delta F$, где ΔF – полоса хаотического сигнала. Если, например, полоса хаотического сигнала будет 1 ГГц, то время автокорреляции ~ 1 нсек, а расстояние, которое за это время проходит электромагнитная волна в свободном пространстве 0.3

м. В этом случае в качестве линии задержки может быть использован, например, высокочастотный кабель длиной около 0.2 м.

В схеме DC² для передачи информации используются хаотические радиоимпульсы с большим коэффициентом процессинга и защитными и защитными интервалами между импульсами. Обозначим: T_i – длительность хаотического радиоимпульса; T_b – длительность бита; $L = T_b/T_i$ – скважность; R – скорость передачи в битах; W – полоса сигнала; $K = W/(RL)$ – коэффициент процессинга для хаотического радиоимпульса; SNR – отношение сигнал/шум; $E_b/N_0 = K \cdot SNR$ – отношение энергии, приходящейся на бит передаваемой информации к спектральной плотности шума в полосе сигнала.

Особенностью схемы DC² 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 поступает 3 «шумовых» компоненты. 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 -1,75 дБ. Обычно энергетический потенциал канала связи определяется через минимальное требуемое значение отношения E_b/N_0 , выраженное в дБ. 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 рассматриваемом случае антиподальной модуляции вероятность ошибки 10^{-3} достигается при $E_b/N_i = 10$ дБ. Поэтому компенсация внутренних шумов системы обеспечивается при $K_{dB} > 11.75$ дБ.

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. Все передатчики одновременно излучают, вообще говоря, разные сигналы, которые попадают, как 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 τ_0 , длительности импульсов во всех парах приемопередатчиков равны. Времена задержек в j -ой паре приемопередатчиков $\tau_j = K \cdot \tau_0$. 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 используется, в том числе, одинаковые генераторы хаоса.

Поскольку схема CD² 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 сигналов других пользователей, рассматриваемых как внешний шум. Ситуация в этом случае будет подобна ситуации с выделением полезных сигналов в системах CDMA [13].

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 (3) видно, как максимально возможное число пользователей в сети связано с минимальным требуемым значением SNR_j на пользователя. Для схем связи с большим K удобно перейти от соотношения (2) к соотношению, связывающему максимальное число пользователей с E_b/N_i . Поскольку $E_b/N_i = K \cdot SNR$, то из (2) следует, что

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

Если присутствует дополнительный мешающий внешний шум η , включающий интерференционный, не связанный с приемопередатчиками системы, шум и тепловой шум, то при вводе его в рассмотрение, уравнение (3) принимает вид:

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

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

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

Минимальное, требуемое для обеспечения заданной вероятности ошибки, значение отношения E_b/N_i в схеме DC² нелинейно зависит от процессинга. Оценка этой зависимости на основе аналитических соотношений, полученных в [10-12], дана в Таблице 1.

Для практического подтверждения возможности организации многопользовательского доступа на основе схема передачи DC² 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 тем, что в передатчиках использовались сигналы с одинаковым временем автокорреляции τ , 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, τ , $2 \cdot \tau$, ... $M \cdot \tau$. Моделирование в целом дало хорошее совпадение с оценками Таблицы 1.

Таблица 1. Зависимость числа пользователей M и скорости передачи R в системе от процессинга K при вероятности ошибок 10^{-3} и полосе сигнала 2 GHz.

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

В качестве примера приведем результаты для $M = 4$. Согласно Таблице 1, вероятность ошибки $p = 10^{-3}$ достигается при процессинге $K > 200$. Расчеты проводились для процессингов 100, 200 и 300. При процессинге 100 и длительности информационной последовательности 1000 бит в каждом из каналов обнаруживалось более 10 ошибок. При процессинге 200, для той же длины последовательности, наблюдались единичные ошибки. При моделировании с процессингом 300 ошибки для последовательности длиной 1000 бит на наблюдались (Рис. 1).

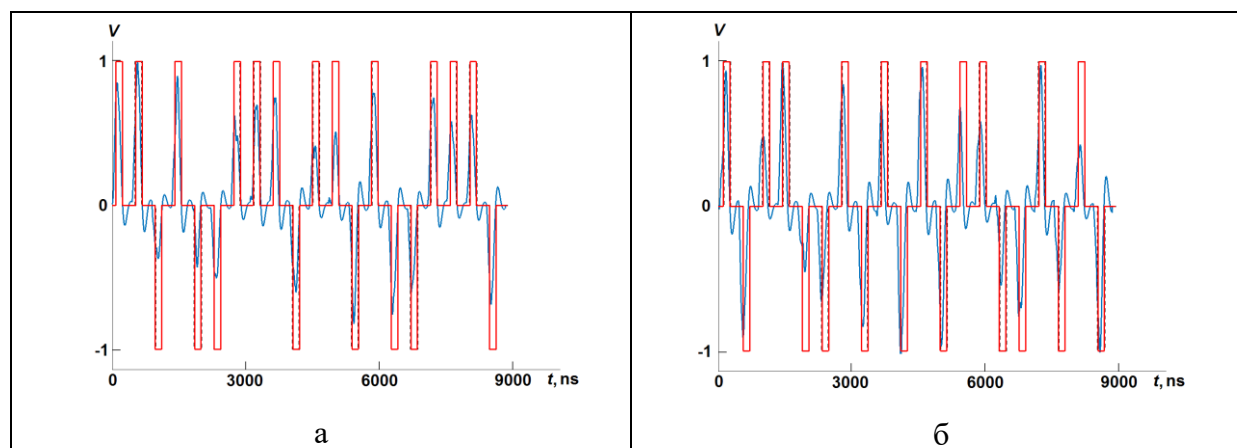


Рис. 1. Выходные сигналы в 1 и 4 приемниках при процессинге 300 (а, б). Сплошные кривые - сигналы на выходах интеграторов. Прямоугольники – сигналы на выходах пороговых устройств.

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

Литература

1. Петрович Н.Т., Размахнин М.К. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Советское 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 and Syst. 1. 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., and Kis G. //Proc. IEEE, 2002. V. 90. N 5. P. 711–732.
7. *Kaddoum G., Gagnon F.* // IEEE Trans. Circuits and Syst. - II Express Briefs. 2012. V. 59. N 7. P. 448-452.
8. *Kennedy M.P., Kolumban G., Kis G., Jako Z.* // IEEE Trans. Circuits and 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. P. 96–104.
10. *Дмитриев А.С., Мохсени Т.И., Сьерра-Теран К.М.* // РЭ. 2018. Т. 63. № 10. С. 1-9.
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., T. I. Mokhseni T.I., Sierra-Teran C. M.* // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2018. V. 21. N. 3. P. 237-.
13. *Шахнович И.В.* Современные технологии беспроводной связи. М.: Техносфера, 2006. 287 с.
14. Процессы передачи и обработки информации в системах со сложной динамикой / под ред. А.С. Дмитриева и Е.В. Ефремовой / М.: Техносфера, 2019. 319 с.