

УДК 530.182

Тенденции развития сверхширокополосных прямохаотических средств связи

Дмитриев А. С., Рыжов А. И.

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
ул. Моховая, 11, корп. 7, Москва, 125009, Российская Федерация
chaos@cplire.ru

Получено: 12 мая 2023 г.

Отрецензировано: 15 мая 2023 г.

Принято к публикации: 19 мая 2023 г.

Аннотация: Рассматриваются тенденции развития сверхширокополосных беспроводных средств связи на основе хаотических сигналов. Впервые прямохаотические средства связи были предложены в 2000 году как способ использования шумоподобных (хаотических) сигналов для передачи информации. Идея заключалась в том, чтобы формировать несущие информацию сигналы непосредственно в области радио- или микроволновых частот, где осуществляется передача, и там же производить модуляцию и демодуляцию этих сигналов, не прибегая к операциям переноса частот. В базовом варианте схемы в качестве носителя информации использовались хаотические радиоимпульсы, что допускало возможность использования модуляции «включил — выключил» и модуляции позиций хаотических радиоимпульсов. В качестве приемника использовался, согласованный с передаваемым сигналом детектор огибающей. Другим вариантом прямохаотической системы является недавно предложенная относительная схема передачи на основе хаотических радиоимпульсов. В докладе представлены результаты исследований характеристик и специфики обеих схем при их использовании в сверхширокополосной беспроводной связи сантиметрового и дециметрового диапазонов длин волн.

Ключевые слова: хаотические радиоимпульсы, сверхширокополосная связь, энергетический прием, относительная передача.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Дмитриев А. С., Рыжов А. И. Тенденции развития сверхширокополосных прямохаотических средств связи // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2023. Т. 6, № 1. С. 1—14.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Дмитриев, А. С. Тенденции развития сверхширокополосных прямохаотических средств связи / А. С. Дмитриев, А. И. Рыжов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2023. — Т. 6, № 1. — С. 1—14.

1. Введение

Явление динамического хаоса (ДХ) было открыто и активно исследовалось, начиная с середины 60-х годов XX века. За первые 20 лет этот феномен был изучен детально с примерами в различных областях естествознания. Многие свойства ДХ оказались удивительными, к ним, безусловно, относится и возможность синхронизации двух и более систем с динамическим хаосом. Именно это свойство вызвало первоначальный интерес к хаосу как к потенциальному носителю информации. И, хотя первые схемы передачи информации, предложенные на основе хаотической синхронизации, оказались недостаточно эффективными с точки зрения помехоустойчивости [1—3], начало исследованиям по использованию динамического хаоса для передачи информации было положено. В их процессе оказалось, что динамический хаос обладает целым рядом свойств, привлекательных с точки зрения передачи данных, а именно: возможность получения сложных колебаний с помощью простых по структуре электронных устройств; способность реализовывать большое количество различных хаотических мод в одном устройстве; управление хаотическими режимами путем изменения параметров системы; большая информационная емкость; разнообразие методов ввода информационного сигнала в хаотический; увеличение скорости модуляции по отношению к модуляции регулярных сигналов; возможность самосинхронизации передатчика и приемника; нетрадиционные методы мультиплексирования; конфиденциальность при передаче сообщений.

Это обстоятельство стимулировало новые усилия по поиску методов и подходов применения хаотических сигналов в коммуникациях.

Среди потенциальных кандидатов оказались относительные методы передачи [2—4] и использование энергетического приема [5—7]. Оба подхода позволяют использовать такие черты хаотических сигналов как широкополосность (сверхширокополосность), которая, в соответствии с теорией Шеннона, обеспечивает пропорциональную полосе потенциальную информационную емкость канала передачи и возможность использования расширения спектра информационного сигнала. Последнее важно для практической реализации средств связи, работающих в условиях реальных физических сред.

Вместе с тем, проведенные многочисленные исследования в области использования хаотических сигналов в качестве носителя информации для систем связи показывают значительный разрыв между потенциальными информационными возможностями систем связи на основе динамического хаоса, перечисленными выше, и их практической реализуемостью.

Так, популярная в теоретических исследованиях относительная схема передачи *DCSK* [4] для физической реализации требует линий задержки с временами порядка длительности передаваемых битов. Например, при скорости передачи 1 мбит/сек, задержка должна составлять 1 мксек. Аналогичным образом в радиосистемах можно реализовать большую задержку с помощью микроволнового кабеля, но длина такого кабеля будет около 200 м.

Фактически для беспроводных коммуникаций практически реализована в основном только прямохаотическая схема с энергетическим приемом *DCC* [5—7].

Ограниченность возможностей по практической реализации имеющихся теоретических коммуникационных схем на основе динамического хаоса сдерживает развитие хаотических коммуникаций и показывает необходимость в новых решениях, снимающих указанные ограничения.

В статье рассматривается и исследуется на устойчивость в канале с белым шумом новая относительная схема передачи информации с использованием хаоса — прямохаотическая относительная схема передачи информации (*Direct Chaotic Differential Communications — DC²*), не требующая, в отличие от *DCSK*, больших задержек при обработке сигналов, и обладающая расширенными возможностями организации многопользовательских режимов по сравнению со схемой *DCC*.

Название схемы отражает ее основные характерные черты: прямохаотическая означает, что хаотический сигнал формируется и модулируется непосредственно в области радио (или микроволновых) частот, в которой осуществляется беспроводная связь; относительная — означает, что и опорный и информационный сигналы передаются через канал связи.

В схеме *DC²*, также как и в схеме *DCC*, в качестве носителя информации используются хаотические радиоимпульсы, что позволяет регулировать процессинг информационного сигнала (степень расширения спектра) через длину импульсов и бороться с многолучевостью с использованием защитных интервалов. В прямохаотических беспроводных приемопередатчиках предполагается, чаще всего, использование широкополосных и сверхширокополосных сигналов.

В первом разделе статьи рассматриваются некогерентные схемы передачи информации с использованием динамического хаоса. Во втором разделе описывается базовая схема передачи информации на основе хаотических радиоимпульсов *DCC*. Третий раздел посвящен относительной схеме прямохаотической передачи *DC²*. Далее обсуждается помехоустойчивость прямохаотических схем, многопользовательские режимы и экспериментальная реализация. В заключении анализируются полученные результаты и возможные направления дальнейших исследований.

2. Некогерентная связь на хаотических сигналах

В конце 90-х и в начале 2000-х годов было предложено несколько схем передачи информации на основе динамического хаоса без использования хаотической синхронизации. Среди них *DCC* — *Direct Chaotic Communications* [5—7], а также идеологически близкая к *DCC* схема *COOK* — *Chaos on-off Keying* [2, 3], которая относится к системам с энергетическим приемом, а также относительные методы *DCSK* — *Differential Chaotic Shift Keying* [2—4, 11] и *CDSK* — *Correlation Delay Shift Keying* [2, 3].

По своим статистическим характеристикам упомянутые системы были близки к классическим узкополосным некогерентным системам связи.

Название прямохаотической схемы связи (*DCC*) отражает ее характерную черту: хаотический сигнал формируется и модулируется непосредственно в области радио (или микроволновых) частот, в которой осуществляется беспроводная связь.

В схеме *DCC* в качестве носителя информации используются хаотические радиоимпульсы, что позволяет регулировать процессинг информационного сигнала (степень расширения спектра) через длину импульсов и бороться с многолучевостью с использованием защитных интервалов. В прямохаотических беспроводных приемопередатчиках, как правило, используются широкополосные и сверхширокополосные сигналы. Демодуляция в *DCC* осуществляется с помощью энергетического детектора.

Формально как *DCC*, так и *DCSK* используют расширение спектра, однако из-за отсутствия копий формы сигнала на приемной стороне в них применяются зашумленные формы сигнала, передаваемого по эфиру, что приводит к ухудшению их статистических характеристик по сравнению с «истинно» когерентным приемом сигналов с расширенным спектром. Особенно это заметно при использовании сигналов с большими и очень большими коэффициентами процессинга.

Вместе с тем эффект накопления сигнала в них все же работает, что позволяет извлекать полезный сигнал даже при уровне сигнал/шум меньше нуля.

Недавно была предложена еще одна схема передачи, которую можно классифицировать как прямохаотическую схему: прямохаотическая носительная схема передачи информации (*DC²* — *Direct Chaotic Differentially Coherent*), где, как и в схеме *DCC*, в качестве носителя информации используются хаотические радиоимпульсы [10, 12—14]. Схема *DC²* с точки зрения практической реализации отличается от схемы передачи *DCSK* тем, что задержки в ней имеют существенно меньшую длительность. Ниже рассматриваются оба варианта прямохаотических схем связи,

анализируются их основные особенности и характеристики, а также вопросы, связанные с их практической реализацией.

3. Прямохаотическая схема связи с энергетическим приемником

Схемы прямохаотической связи (*DCC*) — это схемы связи на основе динамического хаоса, в которых полезная информация вводится в хаотический сигнал, генерируемый непосредственно в радио- или СВЧ-диапазоне. Именно так они определяются в исходном патенте [5].

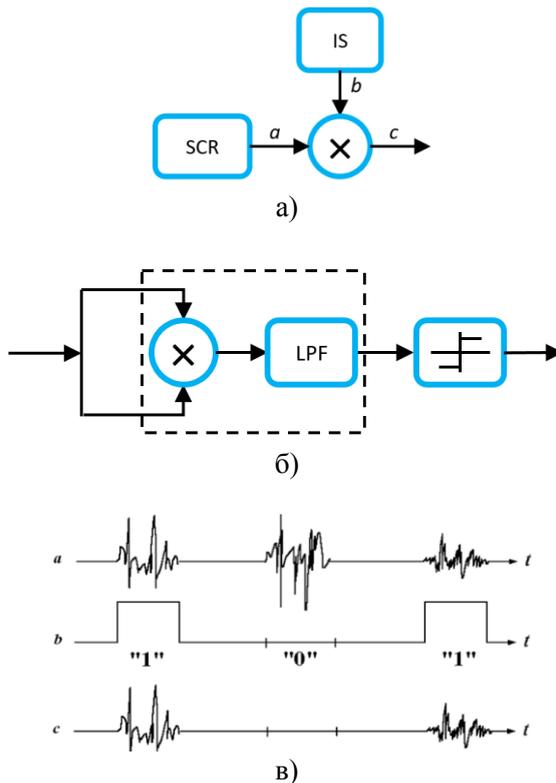


Рис. 1. Базовый вариант прямохаотической схемы связи с энергетическим приемом:
а) передатчик, где ИХР — источник хаотических радиоимпульсов, ИП — информационная последовательность; б) приемник, где ФНЧ — фильтр нижних частот;
в) форма сигнала в точках *a*, *b* и *c* передатчика.

Fig. 1. The basic version of the direct chaotic communication scheme with energy reception:
а) transmitter, where IHR is a source of chaotic radio pulses, IP is an information sequence;
б) receiver, where LPF is a low-pass filter;
в) signal shape at points *a*, *b* and *c* of the transmitter

Ключевым понятием технологии является понятие хаотического радиоимпульса. Он представляет собой фрагмент сигнала с длиной, превышающей длину квазипериода хаотических колебаний. Полоса частот хаотического радиоимпульса определяется полосой частот исходного хаотического сигнала, генерируемого источником хаоса, и в широком диапазоне изменения частот не зависит от длительности импульса. Это существенно отличает хаотический радиоимпульс от классического радиоимпульса узкополосного периодического сигнала, полоса частот которого df определяется его длиной T :

$$df = 1/T. \quad (1)$$

Базовый вариант прямохаотической схемы связи с энергетическим приемом представлен на рис. 1.

На рис. 1а показана структура передатчика схемы: источник хаотических радиоимпульсов ИХР формирует поток хаотических радиоимпульсов с защитными интервалами между ними (точка a). В варианте, представленном на рис. 1, используется модуляция «включил — выключил» (точка b) Передача «1» осуществляется при наличии на соответствующей позиции хаотического радиоимпульса; передача нуля происходит, когда импульс на позиции отсутствует (точка c). В приемнике (рис. 1б) используется энергетический прием, включающий последовательное использование квадратичного детектора, фильтра нижних частот, согласованного по частоте среза с частотой следования позиций для радиоимпульсов и порогового устройства, принимающего решение о приходе «0» или «1».

4. Относительная передача информации на основе хаотических радиоимпульсов

Хаотические радиоимпульсы, используемые в DC^2 в качестве носителей информации, имеют шумоподобные реализации и быстро спадающие функции автокорреляции. Эти ключевые свойства используются в рассматриваемой схеме относительной передачи информации. Полоса частот хаотического радиоимпульса определяется полосой частот исходного хаотического сигнала, и в широких пределах изменения длины импульса не зависит от длительности импульса.

$$\Delta T \gg \frac{1}{2\Delta F}. \quad (2)$$

Если длительность хаотического радиоимпульса $\Delta T \gg 1/2\Delta F$, то спектр мощности потока хаотических радиоимпульсов практически не бу-

дет отличаться от спектра мощности исходного хаотического сигнала. Поскольку величина $K = \Delta T \Delta F$ представляет собой коэффициент процессинга сигнала, то увеличение длины хаотического радиоимпульса приводит к увеличению его коэффициента процессинга.

Для схемы DC^2 важной характеристикой является время автокорреляции хаотического радиоимпульса, которое обратно пропорционально полосе частот хаотического сигнала $\Delta\tau \sim 1/\Delta F$. Если хаотический радиоимпульс сместить относительно себя на время большее, чем время автокорреляции, то можно эти два радиоимпульса рассматривать как некоррелированные. Эта особенность лежит в основе схемы DC^2 и используется для передачи данных.

Рассматриваемая схема передачи данных относится к относительно когерентному приёму, где, в отличие от классической схемы когерентного приёма, копия передаваемого сигнала не хранится в приёмнике, а пересылается по радиоканалу.

Для передачи данных в DC^2 в канал передается промодулированный хаотический радиоимпульс и его непромодулированная копия с задержкой между ними больше, чем время автокорреляции. При приеме производится корреляция между промодулированным радиоимпульсом и его задержанной непромодулированной копией. При модуляции для передачи логической единицы хаотический радиоимпульс передается без изменений, для передачи логического нуля хаотический радиоимпульс умножается на -1 . Таким образом, после относительного когерентного приема в приемнике возникают импульсы с положительными и отрицательными значениями. Структура схема DC^2 показана на рис. 2.

Передатчик системы (рис. 2а) состоит из источника хаотических радиоимпульсов (ИХР), делителя, модулятора, управляемого внешним информационным сигналом; задержки (τ) на время, превышающее время автокорреляции сигнала, и сумматора. Источник хаотических радиоимпульсов формирует импульсы длительностью T_u ; промежутки между импульсами — защитные интервалы — имеют длительность T_{zu} . Суммарная длительность импульса и защитного интервала представляет собой длительность передаваемого бита T_b . Каждый импульс поступает в делитель, после которого попадает в два канала. В первом канале его модулируют информационным сигналом путем умножения на ± 1 , а во втором канале задерживают на время τ . Умножение на $+1$ соответствует передаче «1», умножение на -1 — передаче «0». После этого сигналы суммируют и суммарный сигнал поступает в канал связи. При этом длина суммарного импульса равна $T_c = T_u + \tau$.

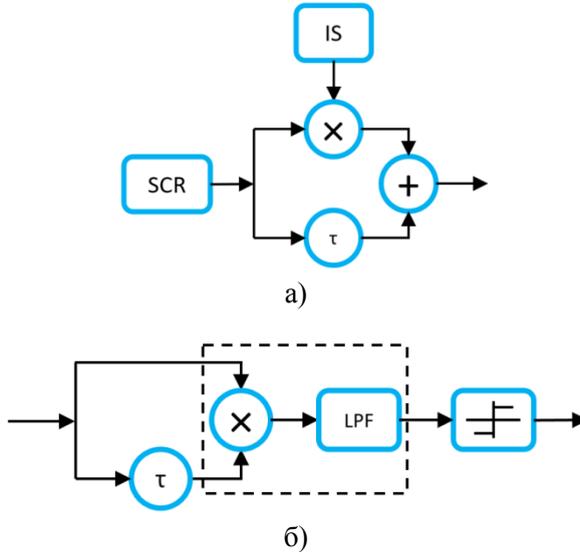


Рис. 2. Структура DC^2 схемы: а) передатчик: ИХР — источник хаотических радиоимпульсов; ИП — информационная последовательность, τ — задержка; б) приемник: τ — задержка, ФНЧ — фильтр нижних частот.

Fig. 2. The structure of the DC^2 circuit: а) transmitter: ИХР – source of chaotic radio pulses; ИП – information sequence, τ – delay; б) receiver: τ – delay, ФНЧ – low-pass filter

Приемник системы (рис. 2б) состоит из делителя, задержки на время τ , перемножителя, фильтра нижних частот (ФНЧ) и порогового устройства. Принятый антенной сигнал усиливают до нужного уровня в МШУ, делят пополам и подают в два канала. В первом канале никаких действий с сигналом не производят, и он поступает на перемножитель. Во втором канале сигнал задерживают на время τ , после чего он также поступает на перемножитель. Импульс, полученный с выхода перемножителя, пропускается через ФНЧ и поступает на пороговое устройство с нулевым порогом. Если поступивший сигнал больше нуля, то пороговое устройство фиксирует прием «1», если же он меньше нуля, то фиксируется прием «0».

5. Оценки помехоустойчивости прямохаотических схем

Аналитические оценки помехоустойчивости для относительной схемы передачи DC^2 получены в работе [10] в предположении, что к сигналу k -го символа на входе приемника добавляется флуктуационный шум с гауссовским распределением мгновенных значений и постоянной спектральной плотностью:

$$V_k(t) = Y_k(t) + \eta_k(t). \quad (3)$$

При анализе аналитической формы для вероятности ошибки было выяснено, что она обладает интересным асимптотическим свойством, а именно: при стремлении отношения сигнал/шум к бесконечности вероятность ошибки стремится не к нулю, а к некоторому пределу, равному:

$$P_{err \lim} = f\left(\sqrt{\frac{2\Delta FT_p}{5}}\right). \quad (4)$$

Статистическое численное моделирование, при помощи которого была рассчитана помехоустойчивость относительной схемы передачи информации DC^2 , осуществлялось для следующих значений коэффициента процессинга $K = 5, 10, 15, 20, 50, 100, 200, 300, 500, 10000$.

При увеличении коэффициента процессинга до $K = 50$ минимальное значение E_b/N_0 , обеспечивающее вероятность ошибки $P < 10^{-3}$, составляет 15,3 дБ (рис. 3).

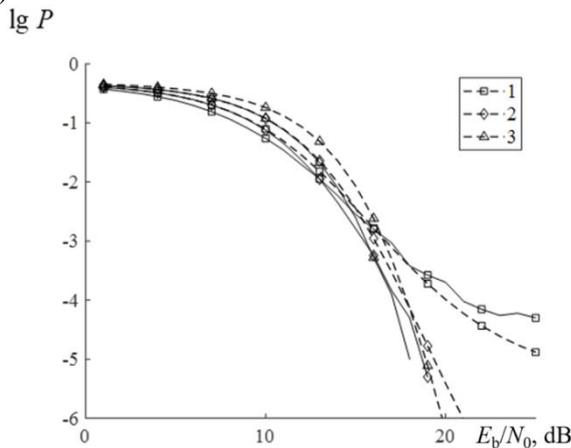
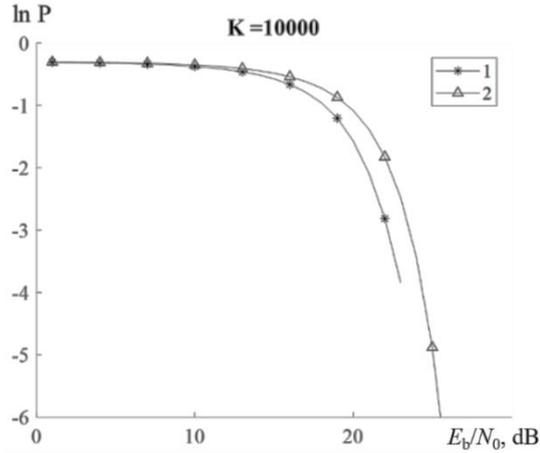


Рис. 3. Зависимости вероятности ошибки от отношения энергии бита к спектральной плотности шума при значениях $K=50; 100; 200$ (соответствуют кривым 1, 2, 3), сплошная линия соответствует экспериментальным результатам, пунктирная – аналитической оценке.

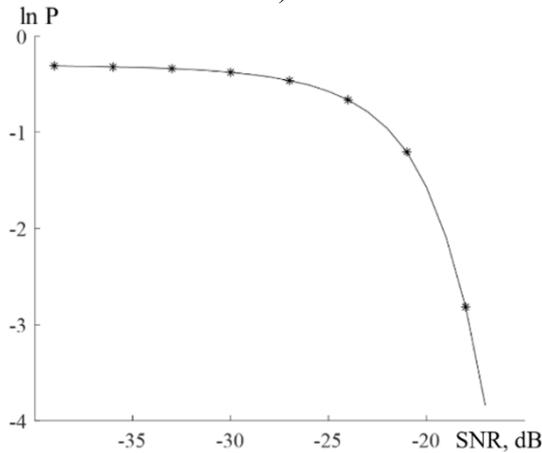
Fig. 3. Dependences of the error probability on the ratio of the bit energy to the noise spectral density for the values $K=50; 100; 200$ (corresponding to curves 1, 2, 3), the solid line corresponds to the experimental results, the dotted line corresponds to the analytical estimate

Отдельный интерес представляет исследование возможностей системы связи при очень больших коэффициентах процессинга. Так, на рис. 4 приведены результаты расчетов для коэффициента процессинга $K = 10000$. Они показывают, что система связи в этом случае может работать с вероятностью ошибки на бит 10^{-3} при уровне отношения $E_b/N_0 = 22,2$ дБ. Однако, если перейти непосредственно к зависимостям от отношения сиг-

нал/шум ($C/\text{Ш}$ — SNR) (рис. 4б), то можно видеть, что благодаря высокому коэффициенту процессинга необходимый уровень $C/\text{Ш}$ (SNR) в этом случае составляет менее -10 дБ, что говорит о том, что система связи работоспособна при уровне сигнала намного ниже уровня шумов в канале связи.



а)



б)

Рис. 4. Зависимости вероятности ошибки от: а) отношения энергии бита к спектральной плотности шума при $K = 10\,000$, б) отношения уровня сигнала к уровню шума (SNR).

На рис. а) линия 1 — компьютерный расчет для гауссовского распределения, 2 — аналитическая оценка.

Fig. 4. Dependences of the error probability on: а) the ratio of the bit energy to the spectral noise density at $K = 10\,000$, б) the ratio of the signal level to the noise level (SNR).

On fig. а) line 1 — computer calculation for the Gaussian distribution, 2 — analytical estimate

6. Заключение

В работе исследованы системы относительной передачи информации на основе хаотических радиоимпульсов. Изучены закономерности, связанные с использованием хаотических сигналов с различными статистическими распределениями мгновенных значений. Показано, что схема связи DC^2 работает эффективно при больших значениях коэффициента процессинга. При этом с увеличением коэффициента процессинга нивелируется зависимость помехоустойчивости от конкретного вида статистического распределения хаотического сигнала. В статье отмечается возможность реализации многопользовательских режимов [14] за счет корреляционной обработки сигналов, а также приводятся результаты первых исследований по экспериментальной реализации схемы DC^2 в дециметровом диапазоне длин волн.

Список литературы

1. Дмитриев А. С., Панас А. И. Динамический хаос. Новые носители информации для систем связи. М. : Физматлит, 2002. 251 с.
2. Lau F. C. M., Tse C. K. Chaos-Based Digital Communication Systems. Berlin : Heidelberg Springer-Verlag, 2003. 228 p.
3. Kaddoum G. Wireless chaos based communication systems : a comprehensive survey // IEEE Access. 2016. Vol. 4. P. 2621—2648.
4. Kolumban G., Kennedy M. P., Chua L. O. The role of synchronization in digital communications using chaos. II. Chaotic modulation and chaotic synchronization. // IEEE Trans. 1998. Vol. CS-45, no. 11. P. 1129—1140.
5. Дмитриев А. С., Панас А. И., Старков С. О. и др. Патент 2185032 (РФ). Способ передачи информации с помощью хаотических сигналов. Оpubл. в Б. И., 2002. № 19.
6. Дмитриев А. С., Кяргинский Б. Е., Панас А. И., Старков С. О. Прямохаотические схемы передачи информации в сверхвысокочастотном диапазоне // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46, № 2. С. 224—233.
7. Dmitriev A. S., Kyarginsky B. Ye., Panas A. I., Starkov S. O. Experiments on ultra wideband direct chaotic information transmission in microwave band // Int. J. Bifurcation and Chaos. 2003. Vol. 13, no. 6. P. 1495—1507.
8. Петрович Н. Т., Размахнин М. К. Системы связи с шумоподобными сигналами. М. : Советское радио, 1969. 233 с.
9. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М. : Радио и связь, 1985. 384 с.
10. Дмитриев А. С., Мохсени Т. И., Сьерра Теран К. М. Относительная передача информации на основе хаотических радиоимпульсов // Радиотехника и электроника. 2018. Т. 63, № 10. С. 1074—1082.
11. Kolumban G., Kennedy M. P., Chua L. O. The role of synchronization in digital communications using chaos. I. Fundamentals of digital communications // IEEE Trans. 1997. V. CS-44, no. 10. P. 927—936.
12. Дмитриев А. С., Ефремова Е. В., Ицков В. В., Петросян М. М., Рыжов А. И., Турканов И. Ф. Прямохаотические средства сверхширокополосной беспроводной связи в

- метровом и дециметровом диапазоне радиоволн // Радиотехника и электроника. 2022. Т. 67, № 8. С. 797—806.
13. Дмитриев А. С., Мохсени Т. И., Петросян М. М. Экспериментальная реализация относительной схемы беспроводной передачи информации на хаотических радиоимпульсах // Письма в ЖТФ. 2022. Т. 48, № 18. С. 10—13.
 14. Дмитриев А. С., Мохсени Т. И. Множественный доступ в системах относительной передачи информации с хаотическими радиоимпульсами // Радиотехника и электроника. 2021. Т. 66, № 5. С. 476—482.

Информация об авторах

Дмитриев Александр Сергеевич, д. ф. м. н., профессор, главный научный сотрудник Ин-та радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН. ORCID: 0000-0003-2079-3020.

Рыжов Антон Игоревич, к. ф. м. н., старший научный сотрудник Ин-та радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН. ORCID: 0000-0001-6725-7984.

Trends in the Development of Ultra-Wideband Direct Chaotic Communications

A. S. Dmitriev and A. I. Ryzhov

*Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS
Mokhovaya St., 11-7, Moscow, 299053, Russian Federation
chaos@cplire.ru*

Received: May 12, 2023

Peer-reviewed: May 15, 2023

Accepted: May 19, 2023

Abstract: *The report discusses the development trends in the development of ultra-wideband wireless communications based on chaotic signals. For the first time, direct chaotic communications were proposed in 2000 as a way to use noise-like (chaotic) signals for communication systems. The idea was to generate information-carrying signals directly in the region of radio or microwave frequencies where transmission takes place, and to modulate and demodulate these signals there without resorting to frequency transfer operations. In the basic version of the scheme, chaotic radio pulses were used as an information carrier, which made it possible to use “on-off” modulation and modulation of the positions of chaotic radio pulses. An envelope detector matched with the transmitted signal was used as a receiver. Another variant of the direct chaotic system is the recently proposed relative transmission scheme based on chaotic radio pulses. The report examines the characteristics and specifics of both schemes when used in ultra-wideband wireless communication in the centimeter and decimeter wavelength ranges.*

Keywords: *chaotic radio pulses, ultrawideband communications, energy reception, differential transmission.*

For citation (IEEE): A. S. Dmitriev and A. I. Ryzhov, “Trends in the Development of Ultra-Wideband Direct Chaotic Communications,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 1, pp. 1–14, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.1.01. (In Russ.).

References

- [1] A. S. Dmitriev and A. I. Panas, *Dynamic Chaos. Novel Type of Information Carrier for Communication Systems*. Moscow : Fizmatlit, 2002. (In Russ.).
- [2] F. C. M. Lau and C. K., *Tse Chaos-Based Digital Communication Systems*. Berlin : Heidelberg Springer-Verlag, 2003.
- [3] G. Kaddoum, “Wireless Chaos-Based Communication Systems : A Comprehensive Survey,” *IEEE Access*, vol. 4, pp. 2621–2648, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2572730.
- [4] G. Kolumban, M. P. Kennedy and L. O. Chua, “The role of synchronization in digital communications using chaos. II. Chaotic modulation and chaotic synchronization,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 45, no. 11, pp. 1129–1140, Nov. 1998, doi: 10.1109/81.735435.

- [5] A. S. Dmitriev, A. I. Panas, S. O. Starkov et al. “A method of transmitting information using chaotic signals,” Patent 2185032 (RF), July 27, 2000. (In Russ.).
- [6] A. S. Dmitriev, B. E. Kyarginsky, A. I. Panas, and S. O. Starkov, “Direct Chaotic Schemes for Information Transmission in the Microwave Range,” *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 46, no. 2, pp. 224–233, 2001. (In Russ.).
- [7] A. S. Dmitriev, B. Ye. Kyarginsky, A. I. Panas, and S. O. Starkov, “Experiments on Direct Chaotic Communications in Microwave Band,” *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 13, no. 06, pp. 1495–1507, Jun. 2003, doi: <https://doi.org/10.1142/s0218127403007345>.
- [8] Petrovich N. T., Razmakhnin M. K. *Communication systems with noise-like signals*. Moscow : Sovetskoye radio, 1969. (In Russ.).
- [9] L. E. Varakin, *Communication systems with noise-like signals*. Moscow : Radio i svyaz', 1985. (In Russ.).
- [10] A. S. Dmitriev, T. I. Mokhseni, and K. M. S. Teran, “Differentially Coherent Information Transmission Based on Chaotic Radio Pulses,” *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 63, no. 10, pp. 1183–1190, Oct. 2018, doi: <https://doi.org/10.1134/s1064226918100078>.
- [11] G. Kolumban, M. P. Kennedy, and L. O. Chua, “The role of synchronization in digital communications using chaos. I . Fundamentals of digital communications,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 44, no. 10, pp. 927–936, 1997, doi: <https://doi.org/10.1109/81.633882>.
- [12] A. S. Dmitriev, E. V. Efremova, V.V. Itskov, M. M. Petrosyan, A. I. Ryzhov, and I. F. Turkanov, “Direct-chaotic means of ultra-wideband wireless communication in the meter and decimeter range of radio waves,” *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 67, no. 8, pp. 797–806, 2022. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0033849422080046.
- [13] A. S. Dmitriev, T. I. Mokhseni, and M. M. Petrosyan, “Experimental implementation of differentially coherent wireless communication scheme based on chaotic radio pulses,” *Technical Physics Letters*, vol. 48, no. 9, pp. 45–48, 2022, doi: 10.21883/TPL.2022.09.55082.19312.
- [14] A. S. Dmitriev and T. I. Mokhseni, “Multiple Access in Relative Information Transmission Systems with Chaotic Radio Pulses,” *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 66, no. 5, pp. 599–605, May 2021, doi: <https://doi.org/10.1134/s1064226921050041>. (In Russ.).

Information about the authors

Alexander S. Dmitriev, doctor of sciences, professor, chief researcher of Kotelnikov institute of radio engineering and electronics RAS. ORCID: 0000-0003-2079-3020.

Anton I. Ryzhov, PhD, senior researcher of Kotelnikov institute of radio engineering and electronics RAS. ORCID: 0000-0001-6725-7984.