

Субтактическая прямохаотическая сверхширокополосная связь субгигагерцового диапазона

А.С. Дмитриев¹, Е.В. Ефремова², В.В. Ицков³, В.А. Лазарев⁴

^{1,2,3,4}Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
125009, Москва, ул. Моховая, 11-7

¹E-mail: alexandrmdm@bk.ru

Рассматривается возможность создания малогабаритных сверхширокополосных прямохаотических радиостанций в дециметровом диапазоне. На основе узкополосной стандартной радиостанции дециметрового диапазона разработан макет сверхширокополосной прямохаотической рации, проведены его лабораторные и полевые исследования. Полученные результаты показывают, что разработанные макеты могут служить основой для создания простых, недорогих персональных сверхширокополосных раций на хаотических сигналах.

Ключевые слова: радиосвязь, дециметровый диапазон, сверхширокополосные (СШП) сигналы, динамический хаос

Tactical sub-GHz direct-chaotic ultra-wideband communications

A.S. Dmitriev, E.V. Efremova, V.V. Itskov, V.A. Lazarev

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS

The possibility of creating compact ultra-wideband direct-chaotic radio stations in the decimeter range is being explored. Based on a standard narrowband decimeter range radio station, a prototype ultra-wideband direct-chaotic radio was developed, and laboratory and field studies were conducted. The results demonstrate that the developed prototypes can serve as the basis for creating simple, inexpensive personal ultra-wideband radios using chaotic signals.

Keywords: radio communication, decimeter range, ultra-wideband (UWB) signals, dynamic chaos

Введение

Современные автономные портативные приемопередающие радиоустройства, предназначенные для индивидуального использования, можно условно разделить на три группы. К первой относятся радиосредства малого радиуса действия с дальностью связи от единиц метров до 50-100 метров. Ко второй и третьей группе относят мобильные портативные станции с радиусом действия от 0,1 до 1,0 км и от 1 до 10-15 км - субтактическая и тактическая связь, соответственно.

Радиостанции второй группы, которым в основном посвящена данная статья, с радиусом действия в диапазоне от 100 м до 1000 м – промежуточные по дальности между тактическими мобильными радиостанциями и станциями малого радиуса действия – в гражданских приложениях часто называют «Персональным радио», в военных приложениях используется также термин «Солдатским радио». Ниже такие устройства будем называть персональными (субтактическими) средствами (рациями) беспроводной связи.

Радиосредства этого диапазона дальностей имеют значительный потенциал применения для связи: на технологических комплексах, внутри технических объектов (самолеты, вертолеты, корабли), с беспилотными аппаратами, с туристами, в беспроводных сенсорных и актуаторных сетях и т.д.

Общей чертой аппаратуры персональной (субтактической) связи является ограничение мощности передачи величиной 150 – 250 мВт, что значительно меньше, чем у портативных станций тактического уровня, излучаемая мощность которых может достигать 10 – 15 Вт.

Дальнейшее развитие идей персонального радио может быть связано с существенным снижением спектральной мощности излучения за счет расширения его спектра, и переходу к передаче с полосами излучения 100 МГц и более.

Типичный диапазон дальности связи таких СШП станций может составлять: 150 – 600 м на горизонтальной поверхности при наличии прямого и отраженного от поверхности лучей в случае расположения передающей и приемной антенн на высоте 1,5 – 1,7 м; 300 – 1000 м при расположении антенн на высоте 3,0 – 3,5 м над поверхностью; 500 – 1500 м в свободном пространстве.

Анализ эффективности технологий для персонального радио

Естественными кандидатами для применения в персональном радио являются системы со сверхширокополосными сигналами: сверхкороткими импульсами и хаотическими сигналами.

Анализ проблемы показывает, что сверхширокополосные субтактические радиостанции могут быть созданы, как с применением технологии сверхкоротких импульсов, так и на основе технологии хаотических радиоимпульсов. Например, образцы СШП радиостанций субгигагерцового диапазона на сверхкоротких импульсах, близкие по ряду своих характеристик по требованиям к персональным радиостанциям были продемонстрированы еще в конце 90-х - начале 2000-х годов компаниями Time Domain [1] и Multispectral Solutions [2,3]. Возможности прямохаотических средств связи в этом направлении продемонстрированы в [4-6].

В докладе рассматривается возможность реализации сверхширокополосных малогабаритных персональных радиостанций, использующих в качестве носителя информации хаотические радиоимпульсы.

Прямохаотические системы — цифровые системы связи на хаотических сигналах, в которых создание хаотической несущей, и ее модуляция информационным сигналом происходят непосредственно в полосе частот связи, а извлечение информации производится без промежуточного преобразования частоты. Ввод информационного сигнала в хаотический производится путем формирования соответствующего потока хаотических радиоимпульсов [7-10]. Идея прямохаотической связи была сформулирована и запатентована в 2000 году в ИРЭ РАН [11].

В 2007 году прямохаотическая схема связи была включена в международный стандарт сверхширокополосной персональной беспроводной связи IEEE 802.15.4a в качестве опционального решения [12]. С 2000 года в ИРЭ РАН и смежных организациях было создано около 15 экспериментальных и опытных типов широкополосных и сверхширокополосных прямохаотических приемопередающих устройств, в результате чего была отработана технология их разработки и реализации на современной электронной базе, включая компьютерную разработку ключевого элемента прямохаотической схемы передачи информации – генератора хаотических колебаний в различных участках электромагнитного спектра [13].

До 2013 года исследования и разработки в области прямохаотических средств беспроводной связи проводились в рамках общих тенденций развития СШП связи при жестких ограничениях на излучаемую мощность (не более несколько сотен микроватт в полосе частот 2,85 – 10,6 ГГц, в соответствии со спектральной маской для нелицензируемых средств СШП связи в Российской Федерации).

Позднее возник интерес к системам с повышенной дальностью (до 200 метров) в диапазоне частот 3 – 5 ГГц. Пиковая излучаемая мощность в импульсе при этом составляла ~ 100 мВт [5,6].

Разработка СШП прямохаотических средств связи в дециметровом и метровом диапазоне начались с исследований в диапазоне 200-450 МГц. В этом диапазоне при пиковой мощности излучения ~ 100 мВт удалось достичь дальности передачи более 1000 м [7].

Прямохаотическая беспроводная связь в субгигагерцовом диапазоне

Для создания экспериментальных макетов персональных сверхширокополосных прямохаотических раций будем использовать типичный частотный диапазон, используемый в тактической связи 300 – 500 МГц и использовать результаты, полученные ранее в работе [7], где была экспериментально продемонстрирована возможность создания сверхширокополосных прямохаотических средств беспроводной связи в субгигагерцовом частотном диапазоне, обнаружено ряд проблем при работе с СШП прямохаотическими сигналами в этом частотном диапазоне и рассмотрены пути их решения, а также установлено, что в целом полученные результаты соответствуют теоретическим оценкам. Однако созданные в [7] экспериментальные макеты предназначались лишь для проведения принципиальных физических экспериментов и не предназначались для использования в практических целях.

Задачей данной работы является поиск путей технической реализации прямохаотических СШП средств в виде малогабаритных мобильных устройств класса персонального и тактического радио.

Для ускорения исследований было решено использовать в качестве базовой конструкции готовую малогабаритную станцию дециметрового диапазона, взяв от нее корпус, систему питания, акустическую систему, входные и выходные тракты и антенну. В случае успешной реализации такой подход позволил бы сосредоточить усилия непосредственно на части устройства, отвечающей за работу с хаотическими сигналами и реализовать эту часть в виде отдельной навесной платы, подключаемой к исходной станции через контактные проводники.

Передатчик разрабатываемого устройства дециметрового диапазона (рис. 1)

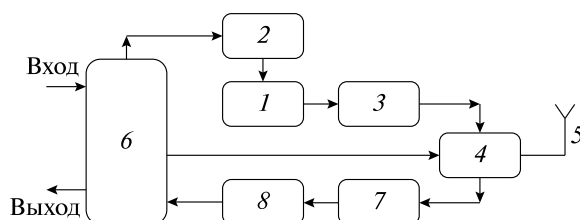


Рис. 1. Структура прямохаотического приемопередатчика

включает в себя генератор хаоса 1, формирующий поток хаотических радиоимпульсов модулятор 2, выходной усилитель 3, переключатель передатчик-приемник 4, внешнюю антенну 5 и цифровой блок 6, который осуществляет преобразование входного акустического аналогового сигнала, поступающего с микрофона, в цифровой поток бит и, далее, в видеоимпульсы, подаваемые на вход модулятора. Приемник устройства состоит из антенны, цифрового блока и переключателя (общих с передатчиком), малошумящего усилителя 7, детектора огибающей 8 на основе логарифмического детектора, преобразующего микроволновые колебания в импульсы огибающей, с амплитудой пропорциональной логарифму мощности принимаемого радиосигнала. Цифровой блок 6 конвертирует последовательность импульсов огибающей в набор цифровых отсчетов, декодируемый в последовательность бит, которая далее с помощью аналого-цифрового преобразователя формирует на выходе аналоговый звуковой сигнал для акустического устройства (динамика).

Макет сверхширокополосной прямохаотической радиостанции диапазона

В качестве исходного малогабаритного устройства для макета СШП прямохаотической радиостанции была выбрана портативная станция Baofeng 888S, с рабочим диапазоном частот 400-470 МГц.

Идея, как отмечалось выше, заключалась в том, чтобы продемонстрировать возможность создания персональной СШП прямохаотической радиостанции, используя в качестве базовой конструкции стандартную малогабаритную станцию дециметрового диапазона и ее основные компоненты. В этом отношении рация Baofeng 888S представляет собой удачное сочетание компактности, наличия минимально необходимых для решения поставленной задачи узлов и простоты технических решений.

Портативная рация Baofeng 888S. В состав радиостанции входят источник питания (ИП), контроллер управления (КУ), передающий тракт (ПТ), приемный тракт (ПрТ), антенна (А), микрофон (М), динамик с усилителем (ДУ).

Задача заключалась в том, чтобы реализовать макет прямохаотического приемопередатчика со структурой на рис. 1 с максимальным использованием компонентов и элементов конструктива радиостанции Baofeng. Для этого нужно было решить следующих вопросы:

- использование аналогового передающего тракта радиостанции для передачи сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов;
- использование аналогового приемного тракта радиостанции для приема сверхширокополосных радиоимпульсов;
- доработка программного обеспечения;
- цифровая передача речевых сигналов с использованием микроконтроллера хаотического модуля;
- разработка внешней прямохаотической платы (по существу прямохаотического модема);
- сопряжение внешней платы с исходным устройством.

Возможность использования аналогового тракта радиостанции для передачи и приема хаотических широкополосных радиоимпульсов. Выходной тракт передатчика радиостанции состоит из усилителя мощности и его пассивной обвязки. Технической особенностью передающего тракта радиостанции является возможность работать в диапазоне частот от 400 до 470 МГц. При этом сами радиосигналы формируются в контроллере управления и являются узкополосными, частота несущего высокочастотного сигнала также задается КУ. Аналоговая частотная модуляция высокочастотного сигнала осуществляется после формирования несущего сигнала. Таким образом, заменив цифровую и аналоговые части радиостанции, формирующие структуру излучаемого сигнала на связку микроконтроллера, ПЛИСа и генератора хаоса, работающего в заданном диапазоне частот, можно попробовать использовать усилитель и антенну радиостанции для передачи хаотических радиоимпульсов.

Чтобы проверить работоспособность такого решения, в радиостанции была разорвана связь между микроконтроллером и усилителем, а в образовавшийся разрыв добавлена внешняя плата формирования и обработки хаотического сигнала с высокочастотным разъемом для коаксиального кабеля.

Разработанная внешняя плата (рис.2), по существу, представляет собой полнофункциональный модем, использующий в качестве носителя информации хаотические радиоимпульсы, с цифровым входом и выходом для аналогового звукового сигнала рис.1. При подаче на вход аналогового сигнала, он оцифровывается в цифровой части радиостанции, сжимается с 128 до 32 кБит/с и «нарезается» на блоки по 1024 бит. Далее формируются пакеты импульсов с преамбулой и адресом устройства, и на завершающем этапе этот поток импульсов модулирует хаотический сигнал, как показано на рис. 1.

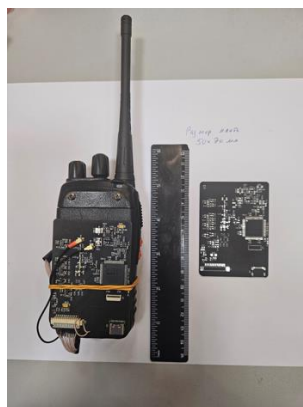
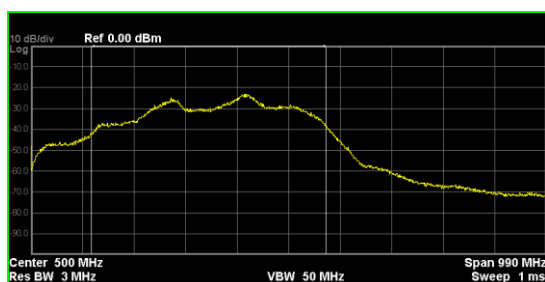


Рис. 2. Макет СШП радиостанции (слева) с внешней платой формирования и обработки хаотического сигнала и сама плата (отдельно справа)

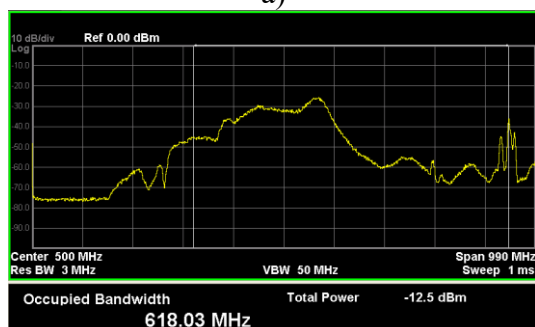
Таким образом передача сигналов осуществляется цифровым образом, цифровым же образом осуществляется и ее прием. При этом используется пакетное формирование передаваемой информации.

Эксперименты по проверки возможности использования усилителя мощности станции для повышения мощности хаотических радиоимпульсов проводились в несколько этапов. Формально полоса усиления передающего тракта радиостанции Baofeng в пределах ее частотного диапазона 400 – 470 МГц. Предстояло выяснить в том числе реальные частотные характеристики передающего тракта при воздействии на него хаотического сигнала.

На первом этапе передающий тракт подключался к выходу формирователя хаотического сигнала внешней платы. В эксперименте генератор хаоса функционировал в режиме непрерывной генерации, с выходной мощностью -2 дБм и шириной спектра мощности около 500 МГц от 200 до 700 МГц. Сигнал с генератора подавался через коаксиальный кабель на усилитель мощности радиостанции и, далее, на анализатор спектра. Спектр мощности сигнала после усилителя представлен на рис. 3а.



а)



б)

Рис. 3. Спектры хаотического сигнала: а - на выходе генератора хаоса; б – излученного в эфир с помощью штатной антенны радиостанции. Диапазон частот на экране анализатора спектра от 0 до 990 МГц.

Итоговая выходная мощность в полосе частот 120-570 МГц с учетом аттенюатора составляет 22 дБм. При этом на усилитель подавалось напряжение питания 3.7В, а его потребление составляло 1.26А. Сам спектр выходного сигнала является достаточно равномерным в диапазоне частот 120-570 МГц. Т. е. при усилении произошла трансформации формы спектра с расширением в область низких частот на 80 МГц и обужением спектра мощности на верхних частотах на 130 МГц. Результирующая ширина спектра оказалась на уровне 450 МГц, что значительно шире диапазона частот базовой радиостанции (400 – 470 МГц). Таким образом оказалось, что полоса выходного тракта и его усилителя мощности значительно шире полосы работы самой станции. Последующие прямые измерения характеристик выходного тракта с помощью анализатора сигналов подтвердили этот вывод. Оказалось, что тракт имеет практически плоскую частотную характеристику в полосе от 90 до 600 МГц. коэффициент усиления для узкополосных сигналов во всем этом частотном диапазоне превышает 30 дБ.

На втором этапе коаксиальный кабель между выходом рации и анализатором спектра заменялся антеннами. К рации присоединялась штатная для нее штыревая антенна, а к анализатору калиброванная рупорная. Расстояние между антеннами было порядка 20 см, а результат представлен на рис. 36. Из рис. 3 следует, что антенна корректирует спектр хаотического сигнала с 120 -570 МГц до 370 -600 МГц. Т. е. в эфир излучается хаотический сигнал с полосой около 230 МГц. при этом измерение частотных характеристик самой антенны, показали, что ее полоса частот по уровню коэффициента стоячей волны по напряжению 3 не превышает 100 МГц с центральной частотой около 400 МГц.

Следующим шагом была проверка передающего тракта и антенны рации при передаче импульсного сигнала. В этом варианте генератор хаоса приемопередатчика работал уже в штатном режиме, а сам приемопередатчик по команде выдавал поток радиоимпульсов с помощью которого по эфиру передавались пакеты с кодированными аудиоданными. Второй, контрольный приемопередатчик с известными характеристиками использовался в качестве приемника чтобы оценить качество передачи радиоимпульсов.

Контрольный приемник успешно принимал и декодировал пакеты с данными, излученными макетным образцом. Вместе со структурой спектра, это говорит о возможности использования передающего тракта рации.

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что весь передающий тракт рации, включая антенну, можно использовать для передачи сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов в диапазоне частот 380-600 МГц, несмотря на то что штатно рация работает в узкополосном режиме. Выходная мощность во всей полосе частот будет не ниже 22 дБм (на входе передающей антенны), а максимальное потребление тока всего устройства в режиме передачи непрерывного сигнала не превышает 1.33А.

Чтобы проверить способность приемного тракта рации принимать хаотические радиоимпульсы он, как и передающий тракт, был отключен от штатного КУ и в место разрыва смонтирован высокочастотный разъем. Затем с помощью коаксиального кабеля аналоговая часть рации была соединена со входом логарифмического детектора макетного образца. Следует отметить, что входная цепь в приемном тракте рации состоит только из пассивных компонентов и представляет из себя колебательный контур с резонансом в полосе частот работы рации.

При экспериментальной апробации в качестве источника хаотических радиоимпульсов использовался эталонный контрольный передатчик, а приемником служил макетный образец со штыревой антенной. Радиоимпульсы передавались по эфиру. Помимо оценки аналогового сигнала на выходе детектора, цифровой частью макета успешно осуществлялся прием и декодирование пакетов с данными,

преобразование их в акустический сигнал и последующий вывод этого сигнала на динамик рации.

В целом проведенные эксперименты доказали возможность использования аналоговой высокочастотной части передающего и приемного трактов рации в качестве выходной и входной цепей для приемника модулированного прямохаотического сигнала в частотном диапазоне от 370 до 600 МГц.

Техническая реализация макета. По результатам проведенных исследований был спроектирован и реализован макет СШП прямохаотической рации дециметрового диапазона. Пара разработанных и апробированных на работоспособность макетов СШП прямохаотических радиостанций представлены на рис. 4.



Рис. 4. Внешний вид пары макетов СШП персональных прямохаотических станций диапазона 370 – 600 МГц

Соединение внешней платы с исходной рацией Baofeng осуществляется с помощью двух типов проводов – обычных, для передачи низкочастотных сигналов, и коаксиальными кабелями, для передачи СВЧ сигналов.

Включается и выключается устройство поворотным переключателем рации. При включении питание подается с аккумулятора рации. После чего устройство переходит в режим приема данных из эфира. В этом режиме помимо микроконтроллера приемопередатчика включен еще ПЛИС, логарифмический детектор и усилитель для динамика.

При получении пакета с аудио данными из эфира, содержащиеся в нем данные декодируются и отправляются на усилитель динамика для их воспроизведения. Громкость воспроизведения регулируется с помощью поворотного переключателя.

Если в процессе работы нажать на кнопку передачи на рации, то приемная часть выключается, включается передатчик, микрофон, блок АЦП, а микроконтроллер с ПЛИС переходят в режим передачи. При этом аналоговый сигнал с микрофона поступает на вход АЦП и после оцифровки и кодирования в виде пакетов посылаются в эфир, используя генератор хаоса внешней платы - модема совместно с усилителем мощности и антенной рации.

Полевые испытания

В экспериментах использовались макеты созданных СШП прямохаотических раций. Мощность непрерывного сигнала при подаче на согласованную нагрузку составляет 22 дБм. Потери мощности при излучении по проведенным экспериментальным оценкам находятся на уровне 1,0 – 1,5 дБ.

Средняя излучаемая мощность с учетом с учетом модуляции и скважности между пакетами, составляет 6-7 дБм, т. е. около 4-5 мВт.

Выводы по полевым измерениям. Разработанные макеты СШП прямохаотической радиации имеют рабочий диапазон 370 – 600 МГц и среднюю излучаемую мощность при скорости передачи 32 Кбит/с около 4 мВт.

Дальность действия макетов на плоской поверхности в условиях прямой видимости при расположении макетов на высоте 1,5 м достигает 200 метров.

Поднятие одной из станций на высоту 15-17 м (увеличение высоты в 10 раз) увеличивает дальность связи в 3 раза до 500-600 метров.

На эталонной трассе, в районе г. Звенигорода, где условия распространения близки к условиям свободного пространства дальность действия макетов составила 550 - 650 метров при высоте поднятия обеих макетов над поверхностью земли на 1,5 метра.

Таким образом созданные макеты попадают по своим характеристикам в класс средств персональной беспроводной связи и при этом имеют значительно более низкую среднюю излучаемую мощность.

Повышение средней излучаемой мощности в такого типа устройствах до 40-50 мВт позволит достичь дальность работы таких средств до 400 – 600 м при расположении на высоте 1,5 м над поверхностью земли и до 1200 - 1800 м в условиях свободного пространства. Для перехода к станциям тактического звена необходимо при прочих равных условиях поднять среднюю мощность излучения до 300-500 мВт, что позволит увеличить дальность работы СШП связи до 1,0 – 1,5 км при расположении антенн на высоте 1,5 м и до 3,0 – 5 км в условиях свободного пространства.

Заключение

Рассмотрена возможность создания персональных сверхширокополосных прямохаотических радиостанций в дециметровом диапазоне. Актуальность рассматриваемой проблемы связана с наличием многочисленных задач для радиосредств этого класса, и дополнительными возможностями СШП средств связи по отношению к узкополосным средствам связи, присутствующим на рынке. Сформулированы технические требования к ним.

На основе узкополосной стандартной радиации дециметрового диапазона разработан макет СШП прямохаотической станции с параметрами, близкими к требуемым, проведены его лабораторные и полевые исследования. На основании полученных теоретических и экспериментальных результатов делается вывод, что разработанные макеты могут служить основой для создания простых, недорогих персональных СШП персональных субтактических и тактических радиаций на основе хаотических сигналов.

Литература

1. Пат. 7075476 США. Ultra-wideband sensor interface network and method: заявл. 29.12.2003 : опубл. 11.07.2006 / Kim J.H. 38 с.
2. Ameti A., Fontana R.J., Knight E.J., Richley E. Ultra Wideband Technology for Aircraft Wireless Intercommunications Systems (AWICS) Design // IEEE Aerospace and Electronic Systems magazine. 2004. V. 19, No 7. P. 14-18. doi: [10.1109/MAES.2004.1346839](https://doi.org/10.1109/MAES.2004.1346839)
3. Fontana R.J. Recent System Applications of Short-Pulse Ultra-Wideband (UWB) Technology. // IEEE Trans. on microwave theory and techniques. 2004. V. 52, No 9. P. 2087-2104. doi: [10.1109/TMTT.2004.834186](https://doi.org/10.1109/TMTT.2004.834186)
4. Дмитриев А.С., Попов М.Г., Рыжов А.И. Повышение дальности действия сверхширокополосных прямохаотических средств связи // РЭ. 2020. Т. 65, №9. С. 902-910.
5. Процессы передачи информации в системах со сложной динамикой / Под ред. А.С. Дмитриева, Е.В. Ефремовой. М.: Техносфера. 2019. 319 с.
6. 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 // РЭ. 2022. Т. 67, №8. С. 797-806.

7. Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002. 252 с.
8. Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Максимов Н.А., Панас А.И., Старков С.О. Перспективы создания прямохаотических систем связи в радио и СВЧ диапазонах // Радиотехника. 2000. № 3. С. 9-20.
9. Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Панас А.И., Старков С.О. Прямохаотические схемы передачи информации в сверхвысокочастотном диапазоне // РЭ. 2001. Т. 46, №2. С. 224-233.
10. Dmitriev A.S., Panas A.I., S. O. Starkov S.O. // <http://arxiv.org/abs/nlin.CD/0110047> 2001. <https://doi.org/10.48550/arXiv.nlin/0110047>
11. Патент Пат. 2185032 РФ. Способ передачи информации с помощью хаотических сигналов. Оpubл. офиц. бюл. «Изобретения. Полезные модели» № 19 от 10.07.2002 / Дмитриев А.С., Панас А.И., Старков С.О., Андреев Ю.В., Кузьмин Л.В., Кяргинский Б.Е., Максимов Н.А.
12. Standard IEEE 802.15.4a-2007. UWB. 2007. 185 p.
13. Генерация хаоса / Под ред. А.С. Дмитриева, Е.В. Ефремовой. М.: Техносфера. 2012. 423 с.