



А.С. Дмитриев, В.В. Ицков,
М.М. Петросян, М.Г. Попов, А.И. Рыжов

**Сверхширокополосные средства
беспроводной связи и активные
радиометки для Интернета вещей
и Интернета робототехники**

Рекомендуемая форма библиографической ссылки

Дмитриев А.С., Ицков В.В., Петросян М.М., Попов М.Г., Рыжов А.И. Сверхширокополосные средства беспроводной связи и активные радиометки для Интернета вещей и Интернета робототехники // Проектирование будущего. Проблемы цифровой реальности: труды 2-й Международной конференции (7-8 февраля 2019 г., Москва). — М.: ИПМ им. М.В.Келдыша, 2019. — С. 72-82. — URL: <https://keldysh.ru/future/2019/7.pdf> doi:[10.20948/future-2019-7](https://doi.org/10.20948/future-2019-7)

Сверхширокополосные средства беспроводной связи и активные радиометки для Интернета вещей и Интернета робототехники

А.С. Дмитриев¹, В.В. Ицков^{1,2}, М.М. Петросян^{1,2}, М.Г. Попов¹,
А.И. Рыжов¹

1 Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН
2 Московский физико-технический институт (государственный университет)

Аннотация. Рассматривается использование сверхширокополосных прямохаотических средств связи и радиоидентификационных меток для организации беспроводных высокоскоростных коммуникаций в интернете вещей и интернете робототехники.

Ключевые слова: искусственное радиоосвещение, генераторы динамического хаоса, приёмник радиосвета, изображение в радиосвете

Direct chaotic communications and active RFID tags for internet of things and internet of robotic things

A.S. Dmitriev¹, V.V. Itskov^{1,2}, M.M. Petrosyan^{1,2}, M.G. Popov¹,
A.I. Ryzhov¹

1 Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS
2 Moscow Institute of Physics and Technology (state university),

Abstract. The use of ultra-wideband direct-chaotic communications and radio identification tags for the organization of wireless high-speed data transmissions on the Internet of things and the Internet of robotics is considered.

Keywords: ultrawideband communications, internet of things, radiofrequency identification, direct chaotic communications

1. Введение

Интернет вещей (Internet of Things – IoT) стремительно развивается с точки зрения концепции, расширения сферы применений, поиска и разработки подходящих беспроводных технологий. В [1] в интернете вещей специально выделена концепция Интернета робототехники (Internet

3. Технологические перспективы цифровой реальности

of Robotic Things – IoRT), Яркий пример системы объектов IoRT – беспилотный автомобильный транспорт. По некоторым оценкам, уже в 2020 г. по дорогам мира будут разъезжать около 250 млн связанных между собой автомобилей [2]. В ближайшие пять лет число автомобилей, снабженных такими средствами коммуникаций, будет расти драматическим образом, делая связанные автомобили одним из главных элементов Интернета вещей. В статье обсуждаются концепции IoT и IoRT, возможности, которые могут быть реализованы для интернета вещей с применением на физическом уровне беспроводных сверхширокополосных прямохаотических средств связи [3] и средств радиоидентификации (Radio Frequency Identification – RFID).

2. Интернет вещей и «умные пространства»

С Интернетом вещей ассоциируется ряд понятий, которые перекрываются по смыслу, но при этом имеют свои особенные черты. Чтобы избежать путаницы, для начала уточним терминологию [4]. В словосочетании «Интернет вещей», «вещи» буквально означают вещи, которые подключаются к Интернету и друг к другу. Каждый из этих подключенных объектов обладает уникальным идентификационным номером и IP адресом. Подключение может производиться с помощью проводов, кабелей или беспроводной связи. Интернет вещей подразумевает возможность перемещения данных для управления процессами на любые расстояния – как из другой комнаты, так и из другой части света. Внутри такой обширной категории, как Интернет вещей, существуют некоторые ключевые различия и нюансы. Поэтому целесообразно ввести базовые определения. Под термином «подключаемые устройства» понимаются такие устройства, которые обмениваются данными по обычному интернет-соединению или подсоединены к общей сети, например, через закрытые или частные сети. Подключаемое устройство необязательно подсоединяется именно к Интернету вещей.

Существует два основных вида подключаемых устройств: в первую очередь они делятся на физические и цифровые [5]. К первой группе относятся такие объекты и процессы, которые сами по себе не генерируют и не передают цифровые данные, если для этого не производятся специальные манипуляции и не вносятся изменения, тогда как ко второй группе относятся устройства, которые по своему назначению способны генерировать данные и передавать их для дальнейшего использования. Поэтому, несмотря на то что многим физическим объектам можно придать метки с применением цифровых технологий, таких как пассивные RFID метки, они не способны на генерацию и передачу сколько-нибудь подробных содержательных данных. При этом радиочастотная идентификация – это основной инструмент, который позволяет

физическим устройствам вступать в цифровой мир через беспроводные каналы связи. Метки могут быть активными и пассивными. И те и другие позволяют расположенным неподалеку считывателям собирать данные и обмениваться ими с компьютером. Еще один термин, относящийся к Интернету вещей, — это «Промышленный интернет», касающийся машин, оборудованных датчиками, которые делают их «умными».

В сфере промышленного Интернета обмен данными обычно осуществляется тремя разными способами: машина–машина (M–M, M2M), человек–машина (Ч–M, H2M) и человек–смартфон (M–С, M2S) (или другое устройство, например планшет). Интернет вещей способен подключать друг к другу, в первую очередь, физические объекты и предметы, а также связывать (подключать) их с цифровыми устройствами, включая компьютеры и программные приложения. Таким образом, все устройства взаимодействуют друг с другом в рамках групповой или многоточечной конфигурации и обмениваются данными в реальном времени – часто с помощью облачных технологий.

Когда все эти машины подключаются к людям, использующим различные вычислительные устройства, возникает совершенно новая концептуальная основа – «Интернет всего». То есть Интернет всего представляет собой более развитую и совершенную структуру, в которой физический и цифровой миры сливаются в единое пространство. В настоящее время большая часть данных в Интернете находится в виде текстовых файлов, сообщений, аудио-, фото- и видеофайлов. Интернет вещей собирает разные новые данные, объединяет их разными способами и дает людям и машинам более широкое и глубокое понимание процессов. Для этого нужно дать компьютерам их собственные средства сбора информации, чтобы они могли видеть, слышать и чувствовать запахи мира самостоятельно [6].

3. Требования к беспроводным коммуникациям

В [6] подчеркиваются два момента, касающиеся сетевой природы силы Интернета вещей:

– Подключение отдельного устройства повышает его мощность, а часто и ценность для пользователя. Однако способность подключать устройство к обширной сети – по сути, к Интернету вещей – заставляет технические возможности расти экспоненциально.

– Польза подключенных устройств не в том, чтобы с помощью приложения для смартфона заводить двигатель или регулировать температуру в доме. Реальная польза появится, когда целые сети устройств будут обмениваться данными и применять их на практике.

Эти свойства IoT полностью соответствуют законам для сетей, характеризующим их возможности. Таких законов три: закон Сарнова, закон Меткалфа и закон Рида [7]. Закон Сарнова был сформулирован с

3. Технологические перспективы цифровой реальности

появлением радио- и телесетей в начале XX в., когда вещание на многочисленные приемники шло от небольшого числа передающих станций. Один из первопроходцев вещания Дэвид Сарнов констатировал очевидное: «Ценность вещательных сетей прямо пропорциональна числу их слушателей и зрителей». Закон Меткалфа, определяет рост ценности сети при наличии связей между ее узлами. Общая ценность сети, где каждому узлу доступны все узлы, возрастает пропорционально квадрату числа ее узлов. Если вы располагаете двумя узлами и ценность каждого равна единице, то с их объединением ценность сети становится равной четырем. Четыре взаимосвязанных узла, каждый ценностью одна единица, в составе сети обретают совокупную ценность в шестнадцать единиц, а ценность сотни таких узлов равна сто раз по сто, то есть десяти тысячам. При экспоненциальном опережении ценности сети числа ее узлов математические последствия получают экономическое выражение: соединение двух сетей дает ценность, значительно превышающую величину, получаемую при сложении их ценности как независимых сетей. Закон Рида показывает, что ценность сети возрастает не в квадратной, а в экспоненциальной зависимости, если внутри нее возможно образование произвольных групп, обменивающихся информацией друг с другом. Существенно как раз то, что преобладающая ценность в обычной сети перемещается от одной категории к другой по мере расширения сети.

Подобный обусловленный расширением ценностный сдвиг можно наблюдать в истории Интернета. Поначалу пользование Интернетом диктовалось его ролью как сети оконечных устройств (терминалов), предоставляющей выборочный доступ к небольшому числу дорогостоящих главных узлов (хостов) с разделением времени. По мере роста Интернета его ценность и использование все больше сосредоточивались на парном обмене электронными сообщениями, файлами и так далее, возрастая в соответствии с законом Меткалфа. А с началом 1990-х гг. в Интернете стал преобладать поток данных между телеконференциями и веб-узлами, рассылок и так далее, возрастающий в соответствии с экспоненциальным законом для сетей с возможностью создания групп.

Хотя преобладавшие прежде функции не утратили своей ценности и не пошли на убыль по мере роста Интернета, ценность и использование услуг, определяемые ставшими преобладающими законами соответствия, росли существенно быстрее. Поэтому многие виды контактов и сотрудничества, проводившихся вне Интернета, оказались поглощенными ширящимися функциями Интернета, ставшего новой сферой соперничества. Естественно, что на начальных этапах развития Интернета вещей «объекты» будут подключаться к неким центрам – узлам сети и в минимальной степени непосредственно взаимодействовать друг с другом. Этими объектами, кроме «вещей» с активными и пассивными RFID-

метками, будут датчики и актуаторы, которые могут собирать и передавать узлам некоторые данные (как в случае с сенсорами) или передавать команды управления «вещам» (в случае актуаторов).

Задача информационного взаимодействия «вещей» друг с другом будет возникать только тогда, когда «вещам» потребуется информация от других устройств для анализа ситуации и принятия каких-то решений. То есть, как минимум, такая «вещь» должна обладать некоторым интеллектуальным ресурсом в виде, например, процессора, с помощью которого осуществляется этот анализ.

Хотя в Интернете вещей могут использоваться различные каналы связи, в том числе кабельные и проводные, мы будем в качестве наиболее востребованных рассматривать радиоканалы и сети на основе беспроводных приемопередатчиков. Тогда можно предположить, что на первом этапе развития IoT наибольшее распространение получат беспроводные локальные сети типа «звезда», где приемопередатчики «вещей» в локальной сети взаимодействуют с некоторым узлом, а непосредственное взаимодействие между приемопередатчиками внутри локальной сети будет минимальным. В этом случае вклад локальных сетей Интернета вещей будет расти пропорционально числу подключенных в этих сетях объектов. В общей зависимости потенциальной «силы» сети появится дополнительный линейный множитель.

При росте числа «вещей» в локальной сети неизбежно возникнет ситуация, при которой «вещи» начнут взаимодействовать. Например, это может быть интеллектуальная сенсорная сеть наблюдения за определенными параметрами территории, скажем, температуры, которая самостоятельно оценивает температурную обстановку на территории путем обмена данными между устройствами и передает результаты этого анализа на узел принятия решения. В этом случае топология локальной беспроводной сети может быть очень разной, в зависимости от расположения датчиков и дальности действия радиосредств.

В общем случае было бы желательно, чтобы сеть допускала реализацию любой топологии и при этом обладала возможностями самоорганизации. В этом случае вклад локальных сетей Интернета вещей будет расти пропорционально квадрату числа подключенных в этих сетях объектов. В общей зависимости потенциальной «силы» сети появится дополнительный квадратичный множитель. Наконец, если «вещи», как и объекты классического Интернета, смогут участвовать в образовании произвольных групп, обменивающихся информацией друг с другом, то начнет работать закон Рида и сила сети будет экспоненциально расти с общим числом объектов в сети.

3. Технологические перспективы цифровой реальности

4. Технические коммуникационные средства

Технические коммуникационные средства Интернета вещей, Интернета робототехники и Интернета всего включают в себя приемопередатчики, сенсоры, актуаторы, метки, считыватели, базы хранения данных (в том числе облачные), программное обеспечение и аппаратные средства, на которых оно располагается. При этом возможности как отдельных точек (узлов) идентификации, так и системы идентификации в целом, будут определяться именно характеристиками радиометок и считывателей информации с них.

Рассмотрим кратко основные типы радиометок и их характеристики. Нас будут, в первую очередь, интересовать средства беспроводной связи и радиоиентификации, работающие в микроволновом диапазоне частот. Это связано как с потенциальной необходимостью передачи больших объемов данных, так и с требованием для большинства массовых приложений малости размеров самих приборов (меток). Кроме того, учитывается, что сверхширокополосные метки должны работать в диапазоне от 2,85 до 10,6 ГГц, и поэтому важно сравнение их характеристик с узкополосными устройствами примерно в том же диапазоне частот.

В принципе в Интернете вещей могут быть использованы три типа меток: пассивные, полупассивные (полуактивные) и активные. Однако они выполняют и будут выполнять в IoT и IoRT разные функции в силу своих технических характеристик. Основными ограничениями для пассивных меток являются малый радиус действия и малые объемы передаваемой информации. Последнее затрудняет использование пассивной радиоиентификации для подключения устройств второго типа – цифровых устройств, генерирующих информацию или собирающих информацию (например, от датчиков), обрабатывающих ее и передающих считывателю или соседним узлам. Здесь речь должна идти об активных метках. При этом метка из устройства узкого назначения будет превращаться в универсальный информационно-коммуникационный узел.

Ниже в качестве кандидата на роль таких устройств рассматриваются прямохаотические сверхширокополосные универсальные приемопередающие модули, способные, в том числе, выполнять роль активных меток. Прямохаотические приемопередатчики [8-10] создавались с характеристиками, ориентированными на стандарт IEEE 802.15.4a – 2007 [11], регламентирующий использование сверхширокополосных сигналов в персональных беспроводных сетях связи на физическом уровне (Ultra Wideband Personal Area Networks. Physical level). В этом стандарте прямохаотические сигналы (хаотические радиоимпульсы) используются в качестве опционального (дополнительного) носителя информации.

5. Универсальный модуль и сетевые узлы на его основе

С учетом тенденций развития сверхширокополосных средств связи, характеристик разработанных приемопередатчиков на основе хаотических радиоимпульсов и накопленного при этом опыта в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН был создан универсальный СШП прямохаотический приемопередающий модуль (ППМ) [12], предназначенный для решения широкого круга задач в области беспроводных средств связи малого радиуса действия.

Разработанный сверхширокополосный прямохаотический приемопередающий модуль ППМ-47 – малогабаритное устройство, к которому на специальных платах могут быть подключены датчики, актуаторы, элементы питания и другие компоненты. Он включает в себя блок сверхширокополосного передатчика (ПД), блок сверхширокополосного приемника (ПР), антенну, ключ (К), а также цифровой блок (ЦП), обеспечивающий управление передачей и приемом, обеспечение сетевых функций и сопряжение модуля с внешними устройствами. Такими устройствами могут быть сенсоры и актуаторы, выполненные на отдельных платах. Внешние устройства могут быть как цифровыми, так и аналоговыми. Во втором случае для преобразования сигнала в цифровую форму может быть использован встроенный аналого-цифровой преобразователь микроконтроллера. В приемопередатчике используется высокопроизводительный 32-разрядный микроконтроллер STM232L с пониженным потреблением мощности.

Конструктивно модуль представляет собой плату размером $50 \times 35 \times 6$ мм³, выполненную на материале FR-4 с толщиной, равной 0,6 мм. Диапазон рабочих частот приемопередающего модуля лежит в пределах 3-5 ГГц, физическая скорость передачи до 6 (12) Мбит/сек. Модуль может быть использован самостоятельно, без специальных дополнительных плат или устройств, например, в качестве корневого узла (базовой станции), подключаемого к компьютеру, или как ретранслятор. Он также может входить в состав сенсорных и актуаторных узлов, где вместе с ним присутствуют датчики или актуаторы, соответственно. Использование различных дополнительных блоков в виде специализированных плат позволяет реализовать широкий круг устройств.

Примерами таких блоков являются: плата с аккумуляторной батареей, что обеспечивает возможность использования модуля в качестве ретранслятора, плата с одноразовой батареей, позволяющая использовать модуль в режиме сверхширокополосной активной метки, и плата с акустическим модулем. Узел-ретранслятор используется при необходимости увеличения дальности связи. Наряду с универсальным модулем включает в себя плату, содержащую аккумулятор. Зарядка аккумулятора осуществляется через микро-USB разъем. Активная RFID метка – устройство, обеспечивающее идентификацию объекта, к которому

3. Технологические перспективы цифровой реальности

она приставлена. Активная RFID метка кроме универсального приемопередающего модуля включает в себя плату электропитания с литиевой батареей емкостью 600 мАч, которая обеспечивает автономную работу метки от двух лет и более (в зависимости от режима эксплуатации).

Метка, как и другие устройства на основе универсального модуля, помещена в пластмассовый корпус с форм-фактором спичечного коробка. Акустический сенсорный узел – устройство, которое может быть использовано для персональной голосовой связи между людьми в офисе или в домашней обстановке. Условно его можно назвать «удаленным голосом». Наряду с универсальным модулем оно включает в себя плату, содержащую микрофон, динамик, микроконтроллер и аккумулятор. Зарядка аккумулятора производится через микро-USB разъем. Акустический сенсорный узел, как и метка, помещен в пластмассовый корпус в форме спичечного коробка.

6. Активная сверхширокополосная метка

В качестве примера узла прямохаотической сети рассмотрим более подробно активную сверхширокополосную метку. Метка на основе хаотических радиоимпульсов может работать в двух режимах:

1. *Режим маячка.* В этом случае метка периодически излучает содержащуюся в ней информацию в виде пакетов. Периодичность послылки пакетов может меняться в пределах от 0,01 пакета в секунду до 10 пакетов в секунду.

2. *Режим отклика.* Информация посылается в виде пакета в ответ на запрос со стороны внешнего устройства, например, считывателя. Метка работает в паре с корневым узлом (считывателем). В считывателе используется тот же приемо-передающий модуль, что и в метке.

Для обеспечения длительной автономной работы устройства используется система энергосберегающих режимов.

При работе радиометки в режиме маячка радиометка отправляет с некоторым постоянным периодом сообщение, в которое включается идентификационная информация. Это сообщение принимается и обрабатывается на считывателе. Общий цикл работы радиометки будет выглядеть следующим образом. Основное время своего рабочего цикла устройство находится в спящем режиме, при этом периодически просыпаясь на время, необходимое для отправки пакета. Переходами между режимами управляет микроконтроллер. В спящем режиме вся периферия устройства, за исключением стабилизаторов питания, выключена. Сам микроконтроллер при этом останавливает все операции и отсчитывает время до следующего пакета. По окончании он переходит в рабочий режим и последовательно включает всю необходимую периферию. После отправки идентификационного пакета микро-

контроллер отключает все остальные узлы и снова переходит в режим отсчета времени до следующего пакета.

7. Кремниевая электроника в Российской Федерации

Одним из ключевых вопросов при развитии Интернета вещей является вопрос об электронной технологической базе и, в первую очередь, о кремниевых технологиях, доступных и развиваемых в стране.

Какими возможностями здесь обладает Россия сейчас, и каковы перспективы?

Чтобы понять масштаб проблемы, рассмотрим, что из себя представляют мировые лидеры в этой сфере, на примере компании TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company). TSMC – тайваньская компания, занимающаяся исследованиями и производством полупроводниковых изделий. Основана в 1987 г. правительством Китайской республики (Тайвань) и частными инвесторами.

Согласно информации TrendForce на конец 2017 г., TSMC – крупнейший контрактный производитель полупроводниковых микросхем с долей рынка 55,9%. В настоящее время в компании по всему миру работает около 20 тыс. научно-технических сотрудников. Объем производства в 2017 г. более чем \$35 млрд. Компания обладает более чем 15 кремниевыми фабриками с технологическими нормами (шириной линий) от 7 до 90 нм. Всего – 9÷10 норм. Построение новой фабрики и освоение новой нормы занимает до 1,5 года. Т.е. для того, чтобы дойти до сегодняшних технологических норм на TSMC, нужно при очень больших вложениях примерно 15 лет.

Может ли Россия быстро сконцентрировать такие средства и технические возможности? Очевидно, нет.

Есть ли место для дополнительных заметных участников рынка в этой области? Тоже нет. Область устоявшаяся, свободных сегментов международного рынка не наблюдается. Только колоссальный объем рынка позволяет дальше развивать эти технологии. Стоимость одного современного ФАБа (фабрики, производящей кремниевые микросхемы) составляет не менее \$2 млрд, и их никто не продаст «чужакам».

Есть ли у России разработки мирового уровня в области кремниевых микросхем? Да, есть. Например, микропроцессор Эльбрус 8СВ. Это восьмиядерный процессор, разработанный и изготавливаемый по технологическому процессу 28 нм, тактовая частота до 1500 МГц, производительность 288 Гфлопс при операциях с двойной точностью. Он, конечно, пока уступает процессорам Intel, но выглядит вполне достойно и может применяться в критических областях. Недостаток – изготовление на зарубежных фабриках.

Из технологических процессов в России в наличии только процессы до 90 нм (например, у ПАО «Микрон»). На этой технологии при

3. Технологические перспективы цифровой реальности

соответствующих разработках можно выпускать многие необходимые стране микросхемы для военной и аэрокосмической промышленности. Такие работы ведутся.

Критическими являются не только сам уровень имеющихся в стране кремниевых технологий, но и совокупный потенциал разработчиков микросхем. В целом он соответствует уровню всей полупроводниковой промышленности. Разработчиков мало, и мало проектов, на которых могли бы вырасти мощные коллективы. Объективная сторона этой ситуации заключается в малости внутреннего рынка и отсутствии условий для выхода на внешние рынки.

Какие пути преодоления?

Нужно искать малозатратные и перспективные альтернативы. Они есть.

В области разработки. В первую очередь следует наладить процесс подготовки специалистов, включая интенсивную практику разработки со студенческой скамьи реальных микросхем, используя для этих целей системы типа Europractis. Такой путь вполне доступен для российских вузов, но проектов от России там на удивление мало. В перспективе можно подумать о какой-то подобной системе и в России.

В области технологий. Активно использовать для разработки и изготовления собственных микросхем зарубежные фаундари-фабрики (работающие на небольшие внешние экспериментальные партии микросхем). Да, это не полноценное собственное производство, но для гражданских целей это – принятая экономически эффективная схема.

Обратить внимание на технологию *minimal Fab*, которая эффективна при производстве небольших партий микросхем и основана на технологической оснастке в сотни и тысячи раз дешевле классических кремниевых фабрик.

На сегодняшний день технологические процессы на *minimal Fab* еще далеки от лучших образцов на классических кремниевых производствах, но уже приближаются к лучшим результатам в России. И, самое главное, можно и нужно участвовать в дальнейшем развитии этих технологий.

8. Заключение

Анализ перспектив развития Интернета Вещей и Интернета Всего показывает, что их сила будет определяться количеством взаимодействующих на малых расстояниях «вещей». Для того чтобы ценность Интернета Всего возрастала как минимум пропорционально квадрату числа подключенных «вещей», необходимы беспроводные сети связи короткого радиуса действия, обеспечивающие реализацию практически любой топологии и при этом обладающие достаточно высокой скоростью передачи информации. Беспроводные СШП прямохаотические средства связи отвечают перечисленным требованиям,

предоставляют IoT и IoRT широкий круг возможностей и могут рассматриваться для них как она из перспективных платформ, как для узлов общего назначения, так и для активных меток.

Литература

1. The Internet of Robotic Things. <https://www.abiresearch.com/marketresearch/product/1019712-theinternet-of-robotic-things/> (accessed October 12, 2016).
2. Gartner Says By 2020, a Quarter Billion Connected Vehicles Will Enable New In-Vehicle Services and Automated Driving Capabilities. <http://www.gartner.com/newsroom/id/2970017> (accessed October 12, 2016).
3. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Герасимов М.Ю. Мультимедийные сенсорные сети на основе сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов. РЭ, 2015, 60(4), 1-9.
4. Greengard S. The Internet of Things (MIT Press Essential Knowledge series). Cambridge, Massachusetts, Publisher: The MIT Press, 2015, 232 pages.
5. «Internet of Things vs. Internet of Everything. What's the Difference?», ABI Research., 2014., May, 10 pages.
6. Ashton K. That 'Internet of Things' Thing. RFID Journal, 2009.
7. Rheingold H. Smart mobs: The Next Social Revolution. Cambridge, Publisher: Basic Books, 2003, 288 pages.
8. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Клецов А.В., Кузьмин Л.В., Лактюшкин А.М., Юркин В.Ю. Сверхширокополосная беспроводная связь и сенсорные сети. РЭ, 2008, 53(10), 1278-1289.
9. Дмитриев А.С., Лазарев В.А., Герасимов М.Ю., Рыжов А.И. Сверхширокополосные беспроводные нателные сенсорные сети. РЭ, 2013, 58(12), 1160-1170.
10. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Герасимов М.Ю. Мультимедийные сенсорные сети на основе сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов. РЭ, 2015, 60(4), 1-9.
11. IEEE Standards Association, «802.15.4a-2007 – IEEE Standard for Information technology – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for LowRate Wireless Personal Area Networks (WPANs) Amendment 1: Add Alternate PHYs», 2007.
12. Дмитриев А.С., Герасимов М.Ю., Ицков В.В., Лазарев В.А., Попов М.Г., Рыжов А.И. Активные беспроводные сверхширокополосные сети на основе хаотических радиоимпульсов. РЭ, 2017, 62(4), 354-363.