

# Беспроводные соединения для любого проекта

Легкое соединение с помощью вставных модулей от Microchip  
и плагинов инструментальных средств разработки



Соединение устройства с сетями, облаком и другими устройствами значительно проще реализовать с помощью широкого ряда простых в использовании беспроводных решений Microchip. Функционально законченные беспроводные модули и плагины инструментальных средств помогут быстро создать прототип и ускорят вывод изделия на рынок. Компания Microchip предлагает следующие решения: Wi-Fi® с очень малым потреблением, Bluetooth® Low Energy (BLE), ZigBee® 3.0, MiWi™ Mesh, Sigfox или беспроводную платформу LoRa с дальним радиусом действия и малым потреблением.



**microchip**  
**DIRECT**  
[www.microchipdirect.com](http://www.microchipdirect.com)

 **MICROCHIP**

[www.microchip.com/wireless](http://www.microchip.com/wireless)

Название и логотип Microchip являются зарегистрированными торговыми марками. MiWi является торговой маркой компании Microchip Technology в США и других странах. Название LoRa и соответствующий ему логотип являются торговой маркой Semtech Corporation и ее дочерних компаний. Все иные упомянутые торговые марки являются собственностью соответствующих компаний.  
© 2017 Microchip Technology Inc. Все права защищены DS70005228B. MEC2139Rus01/17

**Главный редактор**

Павел Правосудов | pavel@fsmedia.ru

**Заместитель главного редактора**

Ольга Зайцева | olga\_z@fsmedia.ru

**Редактор**

Екатерина Трофимова  
ekaterina.trofimova@fsmedia.ru

**Новостной редактор**

Наталья Новикова | natalia.novikova@fsmedia.ru

**Дизайн и верстка**

Дмитрий Никаноров | dmitry.nikanorov@fsmedia.ru

**Отдел рекламы**

Ирина Миленина | irina@fsmedia.ru

**Отдел подписки**

Наталья Виноградова | podpiska@fsmedia.ru

**Отдел распространения**

**Москва**

105120, Нижняя Сыромятничская ул.,  
д. 10, стр. 4, оф. 218  
Тел./факс (495) 987-3720

**Санкт-Петербург**

197101, Санкт-Петербург,  
Петроградская наб., д. 34, лит. Б  
e-mail: compitech@fsmedia.ru  
web: www.fsmedia.ru

**Республика Беларусь**

«ПремьерЭлектрик»  
Минск, ул. Маяковского, 115, 7-й этаж  
Тел./факс: (10\*37517) 297-3350, 297-3362  
e-mail: murom@premier-electric.com

Подписано в печать 29.09.2017

Тираж 3000 экз.

Свободная цена

Журнал «Беспроводные технологии»  
зарегистрирован Федеральной службой  
по надзору за соблюдением законодательства  
в сфере массовых коммуникаций и охране  
культурного наследия. Свидетельство  
о регистрации средства массовой информации  
ПИ № ФС-7791 от 07.11.2005.

**Учредители**

ООО «Издательство Файнстрит»

Дружинина Галина Алексеевна

**Адрес редакции:**

Издатель, редакция: ООО «Медиа КиТ»  
197101, г. Санкт-Петербург,  
Петроградская наб., 34Б

Отпечатано в типографии  
«Принт24» 192102, Санкт-Петербург,  
ул. Самойлова, д.5, литер В

Редакция не несет ответственности  
за информацию, приведенную в рекламных  
материалах. Полное или частичное  
воспроизведение материалов допускается  
с разрешения ООО «Медиа КиТ».  
Все рекламируемые товары и услуги имеют  
необходимые лицензии и сертификаты.

Журнал включен в Российский индекс  
научного цитирования (РИНЦ).  
На сайте Научной электронной библиотеки  
eLIBRARY.RU (www.elibrary.ru) доступны полные  
тексты статей. Статьи из номеров журнала  
текущего года предоставляются на платной основе.

# Содержание

## Рынок

IoT World Summit Russia 2017 .....	6
Переход к «цифре»: чем раньше, тем лучше .....	10
Технологическая конференция «R&D в сфере IoT: Стандарты. Сетевые технологии. Компоненты. Тестирование» .....	12

## Технологии и стандарты

**Сара Йост (Sarah Yost)**

**Перевод: Виктор Алексеев**

Технологии 5G становятся ближе.....	14
-------------------------------------	----

## Компоненты

**Батор Батуев**

SIM7000E/SIM7000E-N: применение энергосберегающих режимов PSM и eDRX в сети NB-IoT.....	17
--	----

**Дмитрий Новинский**

Модуль SIM868E: обзор новых возможностей комбинированного решения....	22
---	----

**Виктор Алексеев**

Совмещенные чип и модуль Bluetooth/Wi-Fi производства Espressif Systems .....	28
--	----

**Виктор Алексеев**

Программно-аппаратные решения русской компании «Тингеникс» для LPWAN. Часть 1. Сети LoRaWAN ....	38
---	----

**Алексей Рудневский**

Перспективы технологий LTE для IoT и их реализация в модулях Telit.....	43
---	----

## Интернет вещей

**Джил Рейтер (Gil Reiter)**

Руководство по инициализации подключения к Wi-Fi для устройств из мира IoT .....	46
---	----

## Интеграция

**Сергей Гаевский**

Построение корпоративной сети LoRaWAN с использованием открытого программного обеспечения.....	52
---	----

## Новые технологии

**Сяо Лу (Xiao Lu), Пинг Ванг (Ping Wang), Дусит Ниято (Dusit Niyato),**

**Донг Ин Ким (Dong In Kim), Чжу Хан (Zhu Han)**

**Перевод: Алексей Гречишников**

Технологии беспроводной зарядки. Часть 1. Теоретические основы и способы аппаратной реализации .....	56
---	----



Выставка  
**ЭЛЕКТРОНИКА**  
Урал

Идеальный контакт  
**«ЭЛЕКТРОНИКА—Урал 2017»**  
III Международная  
специализированная  
выставка  
**ПРИГЛАШАЕМ К УЧАСТИЮ!**

**28–30 ноября**  
Екатеринбург, ЦМТЕ

Проходит одновременно  
с выставкой «Передовые  
Технологии Автоматизации.  
ПТА-Урал 2017»

#### Тематика выставки

- Электронные компоненты и комплектующие
- Источники питания
- Программное обеспечение и услуги
- Оборудование и технологии для производства электроники

#### В деловой программе

- Электронные компоненты и технологии
- Промышленная электроника

[www.pta-expo.ru/ural/electronics](http://www.pta-expo.ru/ural/electronics)

Организатор:  
**ЭЛЕКТРОПРОМ**

Екатеринбург Тел. +7 (343) 270-23-76 • [info@pta-expo.ru](mailto:info@pta-expo.ru)  
Москва Тел. +7 (495) 234-22-10 • [info@pta-expo.ru](mailto:info@pta-expo.ru)

## Технология беспроводной зарядки Wi-Charge



Компания Wi-Charge, девиз которой «To power with light», разработала новую одноименную технологию беспроводной зарядки носимых устройств, основанную на принципе, очень похожем на уже известную индукционную зарядку, но без необходимости плотного контакта гаджета с базой. Беспроводное зарядное устройство Wi-Charge крепится на потолок, позволяя заряжать батарею в любом месте этого помещения.

Компания при создании своих устройств учла тот факт, что разные батареи имеют разную емкость и, соответственно, заряжаются по-разному. Поэтому существует несколько вариантов работы: Light рассчитан на быструю подзарядку батарей мобильных телефонов в области одного рабочего места. Второй вариант получил название Kiik, и он ориентирован на обеспечение энергией устройств, которые обладают малым энергопотреблением, например различной носимой электроники. Последний способ зарядки — Rayo — самый мощный, способен обеспечить энергией помещение площадью до 25 квадратных метров и может заряжать даже планшеты.

На данный момент технология Wi-Charge проходит необходимые этапы тестирования с целью выявить ее недостатки, а также узнать о том, как она может (и может ли вообще) повлиять на здоровье человека.

[www.wi-charge.com](http://www.wi-charge.com)

## Беспроводная зарядка Pi



Компания Pi, образованная выходцами из Массачусетского технологического института (Massachusetts Institute of Technology, MIT), представила беспроводную зарядную станцию, которая позволяет заряжать одновременно несколько мобильных устройств. Главное преимущество этой разработки перед другими, использующими стандарт Qi, заключается

в отсутствии необходимости устанавливать устройство на конкретное место.

Зарядная станция Pi способна заряжать гаджеты в радиусе до 30 см, при этом их можно перемещать. С устройством совместимы все новинки, которые поддерживают беспроводную зарядку, включая Samsung Galaxy S8, S8+, Note8, iPhone X, iPhone 8, Mate 9 и другие смартфоны. В случае если в смартфоне нет такой функциональности, разработчики готовы предложить специальный чехол, который позволит пользоваться зарядной станцией Pi. Мощность зарядного устройства составляет 10 Вт.

Ожидается, что цена станции составит около \$200, а продажи начнутся в следующем году.

[www.picharging.com](http://www.picharging.com)

## Гаджеты Google поговорят и подумают за вас



Корпорация Google анонсировала беспроводные наушники Pixel Buds. Устройство поддерживает работу голосового помощника Assistant, кроме того, в новинку интегрирован переводчик Google Translate. Чтобы воспользоваться функцией, надо задать Assistant желаемый язык, после чего произнесенные пользователем фразы будут автоматически переводиться и транслироваться из динамика сопряженного смартфона. Ответные фразы на неизвестном для пользователя языке будут переводиться обратно и звучать уже в наушниках. Отметим, что «лингвистические навыки» устройства ограничены способностями переводчика Google.

Автономность устройства заявлена на уровне пяти часов, а комплектный футляр увеличивает ее до суток. Для использования в качестве наушников будет достаточно любого смартфона с Android 5.0, iOS 10 и более свежих версий. Купить новинку можно будет в ноябре этого года по цене \$160.

[www.theverge.com](http://www.theverge.com)



Еще один «умный» гаджет от корпорации — беспроводная видеочка Google Clp. В новинке

присутствует система искусственного интеллекта Moment IQ, задача которой — определение ситуаций, когда в ваше отсутствие необходимо записать короткие видеоролики, например, поведение детей или домашних животных.

Устройство оснащено 16 Гбайт flash-памяти для хранения видеороликов. В комплект входят адаптеры беспроводных интерфейсов, аккумулятор, которого хватит на 3 ч работы, порт USB-C для зарядки, объектив с 130-градусным углом обзора. Размеры Clip — 48,3×53,3 мм. Для сопряжения с камерой необходимо устройство, работающее под управлением Android 7.0 или выше.

Предположительная стоимость Google Clip — \$250.

[store.google.com](http://store.google.com)

## БЕЛТЕЛ и Cisco модернизировали сетевую инфраструктуру отеля Park Inn by Radisson Прибалтийская



Как известно, наличие качественного Wi-Fi является одним из ключевых факторов при выборе отеля. Если же речь идет о гостинице с конгресс-центром, то надежное интернет-подключение — это уже не пожелание, а обязательное требование. Для предоставления гостям крупнейшего в России конгресс-отеля Park Inn by Radisson Прибалтийская (а это 1184 номера разных категорий и 26 конференц-залов с максимальной вместимостью до 1500 делегатов) сервиса более высокого уровня было принято решение модернизировать сетевую инфраструктуру.

Для реализации проекта был выбран системный интегратор БЕЛТЕЛ, имеющий большой опыт выполнения гостиничных проектов для отелей сети Carlson Rezidor Hotel Group в Санкт-Петербурге и других городах России.

Новая беспроводная инфраструктура отеля построена на базе оборудования Cisco. Более 360 новых точек доступа Cisco Aironet серии 1700 и 2700 обеспечивают постояльцам отеля, а также посетителям конгресс-центра качественный доступ Wi-Fi, позволяя эффективно работать с новым поколением смартфонов, планшетов и высокопроизводительных ноутбуков с поддержкой стандарта 802.11ac. Управление точками доступа реализуется на базе передовых контроллеров беспроводной сети Cisco серии 5520, оптимизированных для развертывания на крупных площадках.

[www.beltel.ru](http://www.beltel.ru)

## Сельский Wi-Fi



По состоянию на 30 июня 2017 г. универсальные услуги связи с использованием точек доступа Wi-Fi оказывались в 4690 населенных пунктах России. Это составляет 34% от общего плана (обещано, что до конца 2019 г. должны быть построены почти 14 тыс. точек). Откуда такой прогресс? А связан он с тем, что «Ростелеком» сообщила о резком росте востребованности беспроводных точек доступа к Интернету, построенных по проекту «устранения цифрового неравенства в России». Напомним, что задача по устранению «цифрового неравенства» между жителями городского и сельского населения была поставлена в Федеральном законе «О связи» еще в 2014 г. Инициатива предусматривает создание точек доступа в населенных пунктах численностью от 250 до 500 человек и предоставление доступа в Интернет на скорости не менее 10 Мбит/с.

К данному моменту в рамках проекта проложено 35 000 км волоконно-оптических линий связи.

[www.rostelecom.ru](http://www.rostelecom.ru)

## Бесплатный Wi-Fi на «квадратной миле»



Британский оператор O2 предложил Cisco стать партнером проекта по развертыванию в лондонском Сити бесплатной публичной сети Wi-Fi. В ходе реализации проекта совместно с компанией Cornerstone Telecommunication Infrastructure (CTI) и администрацией лондонского Сити (City of London Corporation) Cisco установит наружные точки доступа следующего поколения, которые обеспечат доступом в Интернет более 400 тыс. человек, ежедневно приезжающих на работу в этот район, иначе называемый «квадратной милей».

Фундамент многомиллионного проекта, который станет одним из крупнейших в Лондоне по объему инвестиций в инфра-

структуру беспроводной связи, обеспечат базовые станции Cisco Aironet 1560, обладающие достаточной полосой пропускания для обслуживания современных устройств. Использование технологий Cisco позволит сделать данную сеть более технически совершенной, чем те, которые обслуживают международные финансовые центры, в том числе в Нью-Йорке и Сингапуре.

В сочетании с сетью оператора O2 оборудование Cisco обеспечит гибкость, необходимую для удовлетворения спроса на беспроводное покрытие при одновременном бесшовном развертывании. По окончании проекта пользователи смогут после одноразовой регистрации в бесплатной сети City Wi-Fi получать доступ к таким широкополосным сервисам, как видеозвонки и потоковое видео.

Данный проект предусматривает замену действующего сервиса The Cloud; полный ввод в эксплуатацию ожидается осенью 2017 г.

## Новые Wi-Fi-решения от Zyxel



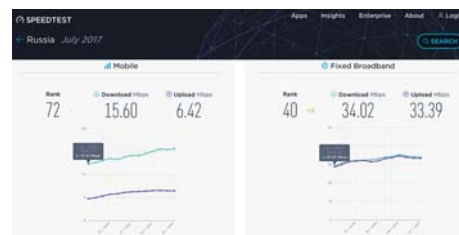
Компания Zyxel Communications анонсировала решения Multy Whole-Home WiFi Mesh Solution, задача которых — обеспечить надежное, высокоскоростное и повсеместное подключение к беспроводной сети Wi-Fi. В серию вошли два продукта — Multy X и Multy PRO.

Первый продукт ориентирован на рядовых потребителей, которым нужно простое, но достаточно мощное Wi-Fi-решение для всего дома. Доступ к сети осуществляется из любой части строения, а потребители, переходя из помещения в помещение, не теряют сигнал. Сеть Multy автоматически переключает пользователя на соединение с тем устройством, которое обеспечивает самый сильный сигнал. Управление может осуществляться посредством интуитивно-понятного приложения с графическим интерфейсом. Кроме того, поддерживается функция голосового помощника Amazon Alexa.

Решение Multy PRO предназначено для сервис-провайдеров. Оно позволяет построить у абонента управляемую Wi-Fi-сеть, полностью покрывающую всю площадь дома или приусадебного участка. Поддерживаются средства удаленного управления. Функция автоматического конфигурирования экономит затраты рабочего времени на настройку. Эти особенности в перспективе позволят значительно сократить число обращений клиентов в техническую поддержку и количество выездов инженеров к абонентам.

[www.zyxel.com](http://www.zyxel.com)

## По данным Speedtest, российские сотовые сети не так уж медленны



Хорошо известный интернет-сервис Speedtest.net, принадлежащий компании Ookla, обработал июльские данные измерений скорости для беспроводного и проводного доступа. Отчет называется Speedtest Global Index, в нем приведены усредненные результаты для 122 стран мира (сотовые абоненты) и для 133 стран (фиксированный доступ).

Согласно данным Speedtest, Сингапур, Южная Корея и Исландия оказались в десятке лучших в обеих категориях — и в ранжировании результатов мобильного доступа, и в ранжировании измерений скорости фиксированного ШПД.

Наиболее высокая средняя скорость доступа в сетях сотовой связи отмечена в Норвегии — 52,59 Мбит/с. Самый худший усредненный результат измерений скорости мобильного интернет-доступа наблюдался в Ираке: 122-е место, 3,03 Мбит/с. У США в этой категории 46-е место, Россия занимает 72-е.

[www.speedtest.net/global-index](http://www.speedtest.net/global-index)

## ПО для разработчиков «Интернета вещей» от Lantronix

Американская компания Lantronix представляет новейший программный комплекс MACH-10.

Разработка приложений для «Интернета вещей» и задач промышленной автоматизации зачастую связана со значительными трудностями. Выбор платформы, инструментов аналитики, протоколов и средств защиты передаваемых данных связан с затратами времени и сил разработчика.

Программный комплекс Lantronix MACH-10 представляет собой готовый и протестированный комплект «строительных блоков», таких как библиотеки, базы данных, средства защиты информации, протоколы и готовые приложения для разработчиков.

Использование данного программного комплекса совместно с серверами устройств Lantronix позволяет:

- снизить время разработки готового изделия;
- сократить затраты на разработку и тестирование программного обеспечения;
- получить масштабируемое решение, готовое для использования в облачных средах.

Более подробную информацию можно узнать на сайте компании [www.rodnik.ru](http://www.rodnik.ru).

# IoT World Summit Russia 2017



Рис. 1. Логотип саммита IoT World Summit Russia 2017

С 19 по 20 сентября 2017 г. в наукограде Иннополис, расположенном в 35 км от Казани, прошел IoT World Summit Russia 2017 (рис. 1) — первое значимое событие мирового масштаба в области «Интернета вещей» (IoT), состоявшееся в России [1]. Нужно отметить, что место проведения саммита было выбрано не случайно. Иннополис — это особая экономическая зона, в которой расположен кампус АНО ВО «Университет Иннополис», офисы и лаборатории инновационных ИТ-проектов, а также построены доступное жилье и места отдыха для студентов, преподавателей и сотрудников. Здесь созданы все условия для развития высоких технологий, поэтому Иннополис все чаще в СМИ называют ИТ-столицей России [2].

Организатором саммита была международная консалтинговая компания Redenex, основные направления деятельности которой связаны с бизнес-аналитикой, выставочной деятельностью, обучением, аутсорсингом бизнес-коммуникаций в области энергоэффективных и цифровых технологий, «Интернета вещей», больших баз данных, информационной безопасности и т. д. [3].

Значимую поддержку в организации саммита оказали Министерство промышленности и торговли и Министерство информатизации и связи Республики Татарстан. В качестве основного национального партнера саммита выступил «АК БАРС» Банк.

Из наиболее мощных партнеров саммита можно отметить Cisco, Huawei, Microsoft, Neoflex, Softline, МТС, Dassault Systèmes и др.

Среди участников саммита присутствовали такие известные эксперты, как: Ин Донг Чо — вице-мэр г. Сеул (Республика Корея), директор программы «Инновационный Сеул»; Денис Валеев — заместитель министра промышленности и торговли Республики Татарстан; Эйнар Ландре — главный ИТ-аналитик Statoil (Норвегия); Андрей Троицкий — эксперт направления «Интернет вещей», SAP СНГ; Уиллсон Дэнг — исполнительный директор Arcstone Pte. Ltd. (Сингапур); Арсений Тарасов — директор по цифровой трансформации Microsoft в России;

Александр Хайтин — исполнительный директор, YANDEX DATA FACTORY; Армен Бадалов — вице-президент по стратегии и развитию бизнеса Schneider Electric в России и СНГ; Александр Сафонов — ЕвроМобайл (электронные компоненты для приложений IoT).

Работа саммита была распределена по параллельным секциям:

- Технологии и приложения IoT.
- «Умный город».
- Интеллектуальные системы управления сельским хозяйством.
- Интеллектуальное промышленное производство.
- Интеллектуальные сервисные приложения (включая программно-аппаратные комплексы для беспроводных систем, беспроводную телемедицину, беспроводной маркетинг и др.).
- Стартапы.

Кратко отметим некоторые доклады, в которых были представлены наиболее инновационные разработки, имеющие, на наш взгляд, реальные перспективы практического использования. В то же время необходимо подчеркнуть, что у участников саммита вызвали интерес абсолютно все выступления.

## Технологии и приложения IoT

Ключевым в этой секции был тезис о том, что развитие новых технологий во многом определяется политикой и соответствующими правовыми актами страны. Для РФ важной, с этой точки зрения, является программа «Цифровая экономика Российской Федерации», утвержденная 28 июля 2017 г. (распоряжение Правительства № 1632-р). Эта программа включает комплекс мер государственной политики РФ по созданию необходимых условий для развития цифровой экономики, в которой данные в цифровой форме являются ключевым фактором производства во всех сферах социально-экономической деятельности.

Вторым важным моментом, на который обратили внимание многие докладчики, в том числе такие лидеры рынка, как Microsoft и Cisco, были вопросы безопасности. В этом плане акцентировались следующие моменты:

- безопасность инфраструктуры;
- надежность связи;
- безопасность передачи данных.

Ведущие производители техники, поставщики услуг и операторы связи из 170 стран мира пользуются протоколом Z-Wave при создании решений для «умного дома». В планы Huawei входит развитие сетей NB-IoT и экосистемы Huawei OceanConnect на базе существующих сетей LTE на территории РФ. Концерн Huawei

выпускает все необходимые компоненты для создания сетей NB-IoT, включая базовые чипы, модули, терминалы, сетевые устройства и сервисные платформы.

Директор проектов Центра технологических инноваций Сбербанка Дмитрий Булычков затронул в своем выступлении чрезвычайно интересную тему — использование технологии блокчейна, которую иногда называют «Интернетом ценностей», для управления устройствами IoT [4]. Так, например, датчики приложения IoT могут быть использованы для контроля и верификации информации, внесенной в блокчейн-реестр (владелец, месторасположение предмета, температурные условия хранения, задымленность помещения хранения, несанкционированное проникновение, электронная подпись и т. д.). Подобный подход позволяет надежно обезопасить сведения конфиденциального характера. Реализация концепции Banking Of Things является одним из бурно развивающихся направлений в мировой банковской сфере. Исследования и разработки блокчейн-технологий для финансовой индустрии проводятся под руководством блокчейн-консорциума R3, в состав которого входят более 80 участников, среди которых крупнейшие международные финансово-кредитные организации, например Bank of America и др.

Интересным и познавательным представляется доклад представителя Mail.ru о платформе Tarantool IIoT, разработанной специально для IIoT (Industrial Internet of Things). Платформа предназначена для сбора информации с датчиков и отправки ее в центр обработки данных (ЦОД) для формирования единой сети IIoT (рис. 2). Такой подход позволяет удаленно управлять автоматизированным производством из центрального командного офиса. Характерной особенностью этой сети является то, что она легко может быть адаптирована для большинства существующих на рынке бытовых устройств беспроводной связи. При этом надежность и производительность обеспечиваются программным обеспечением, которое дублирует работу исполнительных устройств в случае выхода одного из них из строя. По существу, Tarantool IIoT — это известное ПО Tarantool с поддержкой ARM, x86, MQTT, MRAA. Для передачи данных между датчиками и хабом (микрокомпьютером, промышленным аналогом Raspberry PI) нужно оборудование с поддержкой LoRa. Однако для этого оборудования нет необходимости в использовании различных протоколов многочисленных датчиков, поскольку Tarantool IIoT позволяет обрабатывать данные с помощью скриптов непосредственно на IoT Hub.

## Интеллектуальное промышленное производство

На этой секции практически все докладчики, так или иначе, затрагивали тему Industry 4.0 и ее роли в развитии экономики стран на ближайшие десятилетия.

Концепция Industry 4.0, включающая в себя IoT, IIoT и другие новейшие технологии,

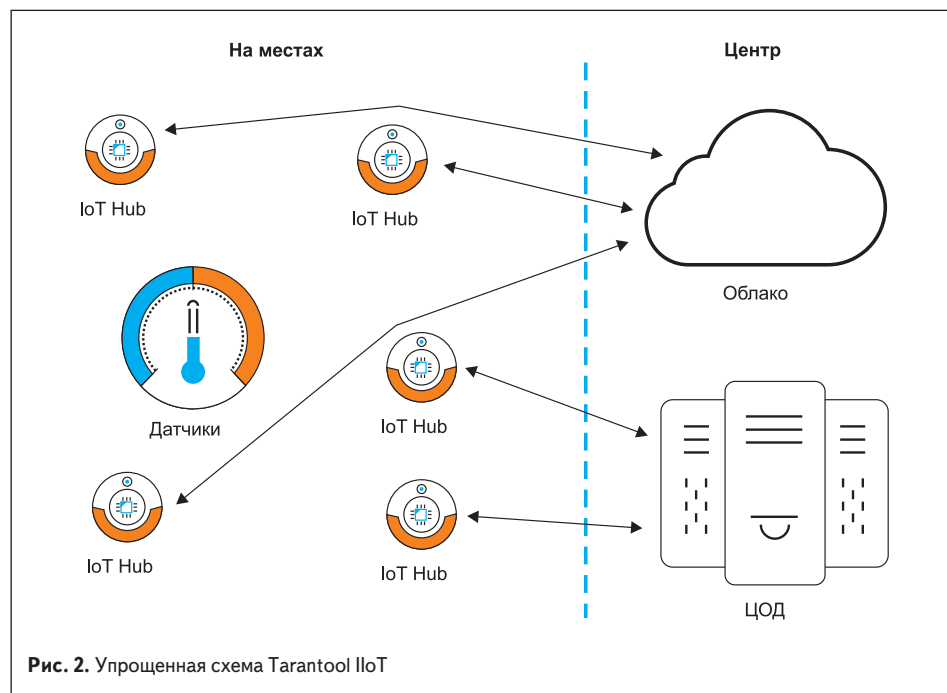


Рис. 2. Упрощенная схема Tarantool IIoT

предусматривает «цифровизацию» практически всех физических активов и их интеграцию в глобальную цифровую экосистему.

Цифровая трансформация и создание киберфизических систем Industry 4.0 подразумевает следующие основные этапы развития:

- цифровизация продуктов, товаров и услуг;
- цифровые бизнес-модели и цифровые модели административного управления;
- цифровые системы управления экономикой [5].

Уже сегодня примеры инновационного цифрового производства можно наблюдать в медицине, космонавтике, аддитивных технологиях. Прототипирование и аддитивные технологии (Additive Manufacturing), использующие метод послойного синтеза, будут интенсивно развиваться в ближайшем будущем. В качестве примера можно привести технологии 3D-печати, которые все больше используются в производстве микроэлектроники и медицинских микромашин.

Директор по развитию бизнеса Smart Architects Максим Арзумян подчеркнул, что цифровая трансформация — это реальный способ кардинально увеличить эффективность ведения бизнеса, возможность производить товары и услуги на совершенно новом качественном уровне. Для реализации этой концепции необходимо, прежде всего, разработать цифровую стратегию и поэтапный план перехода к цифровому предприятию. При этом начать нужно с освоения существующих передовых методов digital technology.

Российские докладчики в этой секции в своих выступлениях делали основной упор на САПР, АСУ и системы предиктивного ремонта, реализованные на их предприятиях.

Международная управляющая компания «ГК Галактика» координирует исследования и разработки в аэрокосмической области. Одно из направлений ее деятельности — анализ больших массивов спутниковых данных с по-

мощью уникальных алгоритмов машинного обучения собственной разработки. Кроме того, «ГК Галактика» разрабатывает облачную платформу единого глобального покрытия в сегменте M2M. В рамках этого проекта ведутся работы по созданию собственного наземного терминала, предназначенного для предоставления услуг пакетной связи в труднодоступных регионах.

## «Умный город»

Из прозвучавших в этой секции выступлений масштабностью практической реализации выделялся доклад вице-мэра города Сеула Ин Донг Чо, который рассказал о единой системе управления городским хозяйством, основанной на энергосберегающих технологиях с широким привлечением сетей IoT. Докладчик обратил внимание на эффективную систему управления городским транспортом, которая позволила уменьшить загруженность дорог за счет интеллектуального регулирования трафика на базе беспроводных дорожных информационных служб. В основе этих проектов лежит технология Big Data, позволившая, кроме управления трафиком, реализовать программу защиты пожилых людей и детей от ДТП с помощью беспроводных модемов, которые способны передавать информацию в полицию, пожарную охрану или скорую медицинскую помощь. В качестве другого примера можно привести smart city Сонгдо (рис. 3), используемый в качестве полигона для отработки новейших достижений IoT, IIoT и Industry 4.0. Этот город возводится на искусственном острове примерно в 56 км к западу от столицы Южной Кореи [6].

В ходе строительства города концерн Cisco внедрил десятки тысяч сенсоров в городские дороги, улицы и строения. Каждый датчик отправляет непрерывный поток данных в центральный узел управления, который анализирует энерго- и водопотребление, городской

трафик, температуру снаружи и внутри зданий, освещение и т. д. Таким образом, создается инфраструктура, основанная на сетевых технологиях, объединяющих все эксплуатационные системы в единое целое.

Из других выступлений интерес и множество вопросов вызвал доклад регионального представителя Microsoft Александра Данилина. Он подчеркнул роль единой среды хранения и обработки больших массивов данных (Big Data), генерируемых городской системой IoT. На примере облачной экосистемы Microsoft

Azure, содержащей более миллиона серверов и сотни ЦОД по всему миру, показана эффективность перехода от локальных систем обработки и хранения данных к единой информационной городской или региональной системе.

### Автоматизированные системы управления сельским хозяйством

В докладах представителей британского университета Harper Adams University было

отмечено, что в настоящее время агросектор во всем мире переживает мощную революцию, которая коренным образом изменит процесс производства сельскохозяйственной продукции. При этом ожидается полная перестройка способа ведения сельского хозяйства на базе использования робототехники, IoT и Big Data. Теория Smart Agro (рис. 4) базируется на индивидуальном подходе к каждому элементу с/х производства [7]. Например, даже в пределах одного поля содержание минеральных и органических веществ, влажность, уплотненность почв, их кислотность могут значительно различаться. Поэтому для достижения максимальной эффективности сельхозугодий используются новейшие технологии, такие как агрохимический мониторинг грунта, специальные датчики, аэрофотосъемка и спутниковые снимки поверхности полей. Широко используются в настоящее время и будут развиваться такие направления, как применение дронов в сельском хозяйстве для создания электронных карт полей в формате 3D, космические снимки, зонирование, точечное внесение химикатов и т. д.

Директор по развитию АО «Агросила» Марат Золин рассказал о новых цифровых методиках и проектах, реализованных и планируемых холдингом «Агросила» с целью создания информационной базы и последующего развития концепции «точного земледелия».

Руководитель проекта цифровых технологий «Ростсельмаш» Олег Александров рассказал о новых разработках холдинга [8], таких, например, как интегрированные системы контроля, мониторинга и анализа, беспилотные комбайны, автоматизированные системы полива и т. д. (рис. 5).

### Интеллектуальные сервисные приложения

В этой секции обсуждались вопросы облачных платформ и программного обеспечения для конкретных приложений IoT. Большинство докладов носило чисто технический характер, описывающий детали конкретных программных приложений. Так, профессор Альберто Силитти рассмотрел проблемы безопасности ПО для приложений IoT/IIoT. В частности, отмечено, что безопасность IoT, в первую очередь, связана с целостностью кода, обрабатываемого на устройствах. Кроме того, большое значение имеют такие аспекты, как регламентация прав доступа к самим устройствам и генерируемым этими устройствами данным. Немаловажную роль играют вопросы устойчивости устройств сети к виртуальным и физическим атакам.

В этой секции оживляющим и информативным для широкого круга участников стал доклад представителя Visa Russia о новых возможностях платежной системы концерна, включающей элементы IoT (рис. 6) [9].

Новый совместный проект объединяет платежную систему Visa и IoT и приложение IBM Watson. Суть проекта заключается в том, чтобы обеспечить возможность оплаты товаров и услуг для потребителя с использованием любых подключенных к Интернету устройств



Рис. 3. «Умный город» Сонгдо

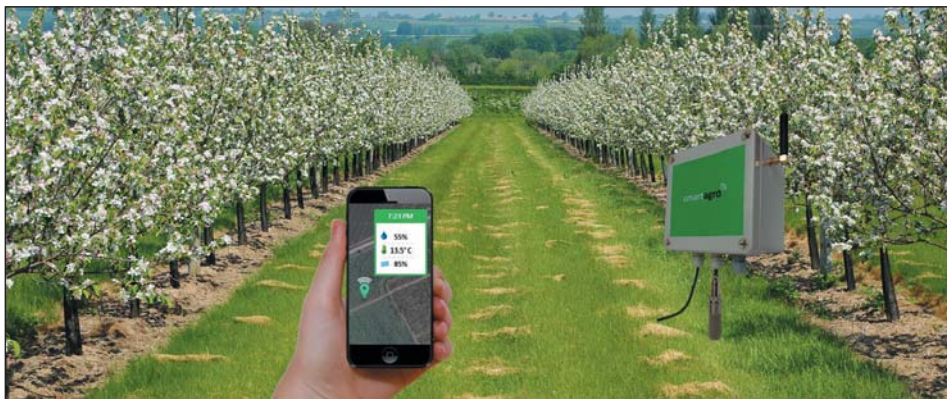


Рис. 4. Smart Agro



Рис. 5. Инновационная техника концерна «Ростсельмаш»



IoT. Так, например, платежи можно будет совершать не только с помощью гаджетов и смартфонов, но также и через интеллектуальный счетчик электроэнергии или воды, включенный в облако IoT. Планируется оснастить такими системами автомобили, телевизоры, кондиционеры и другие устройства, которые смогут сами платить за свои услуги. Кроме того, эта система сможет давать рекомендации по расходованию средств, поиску нужных товаров, исходя из анализа различных ценовых вариантов, представленных на рынке. На рынке уже появились образцы такой продукции. Так, недавно Jaguar анонсировала технологию, позволяющую водителю использовать сенсорный экран своего автомобиля для оплаты топлива на АЗС сети Shell в Великобритании.

## Стартапы

В зоне выставки работала секция стартапов, в которой можно было продемонстрировать образцы продукции и рассказать о своей фирме. Авторитетное жюри, состоявшее из представителей Фонда развития интернет инициатив (ФРИИ), ПАО «АК БАРС», Инвестиционного венчурного фонда РТ, бизнес-инкубатора IT-парка Казани, высказывало свое мнение о каждом из проектов. Остановим внимание лишь на некоторых из них.

Фирма UGREY продемонстрировала облачный сервис, который обеспечивает надежный круглосуточный контроль за потреблением коммунальных ресурсов. Для ввода системы в эксплуатацию достаточно в любом месте, где есть Интернет, подключить модем UGREY или другое имеющееся у потребителя устройство к приборам учета. Показания счетчиков передаются на центральный сервер по обычным сетям мобильной связи (рис. 7). Система UGREY позволяет не только контролировать текущую ситуацию, но также прогнозировать потребление, планировать затраты и получать уведомления о нештатных ситуациях на объектах [10].

Из программно-аппаратных комплексов нового поколения, предназначенных для приложений IoT, следует особо отметить продукцию российской фирмы Thingenix для сетей LPWAN. На стенде компании была представлена универсальная сенсорная платформа — «Программно-аппаратный комплекс для сетей LoRaWAN и NB-IoT», предназначенная для сбора информации с различных датчиков и интерфейсов, включая шины RS-485, CAN и другие. В качестве примеров применения были показаны законченные программно-аппаратные комплексы для мониторинга параметров содержания вредных веществ в атмосферном воздухе и воде, контроля влажности почвы в сельскохозяйственном производстве, а также для непрерывного измерения вибраций и температуры в различных промышленных процессах. Необходимо особо отметить, что все представленные решения используют единую аппаратную платформу и облачный сервис, разработанные непосредственно Thingenix, которые дают возможность полного управления сетями LoRaWAN. Кроме



Рис. 6. Безопасные платежи Visa и IoT

того, эти решения позволяют конфигурировать устройства как в сетях LoRaWAN, так и в сетях NB-IoT.

\* \* \*

IoT World Summit Russia 2017 стал крупнейшим практическим IoT-событием в России. На мероприятии, в рамках которого были представлены обзоры последних трендов и пути развития «умных» технологий, можно было встретить самые разнообразные примеры проникновения IoT в ключевые сферы экономики. Для России это означает возможность ускоренного развития и усовершенствования различных промышленных и социальных отраслей народного хозяйства.

К сожалению, в кратком обзоре нет возможности процитировать все выступления

и рассказать обо всех представленных инновациях. Подробную информацию о проектах и стартапах, которые остались за рамками данной статьи, можно найти в материалах IoT World Summit Russia 2017 [1]. ■

## Литература

1. [iotworldsummit.ru](http://iotworldsummit.ru)
2. [www.innopolis.ru](http://www.innopolis.ru)
3. [www.redenex.com](http://www.redenex.com)
4. [blockchain.open.ac.uk](http://blockchain.open.ac.uk)
5. [www.gov.sg](http://www.gov.sg)
6. [www.worldfinance.com](http://www.worldfinance.com)
7. [smartagro.cl](http://smartagro.cl)
8. [rostselmash.com](http://rostselmash.com)
9. [usa.visa.com](http://usa.visa.com)
10. [ugrey.ru](http://ugrey.ru)

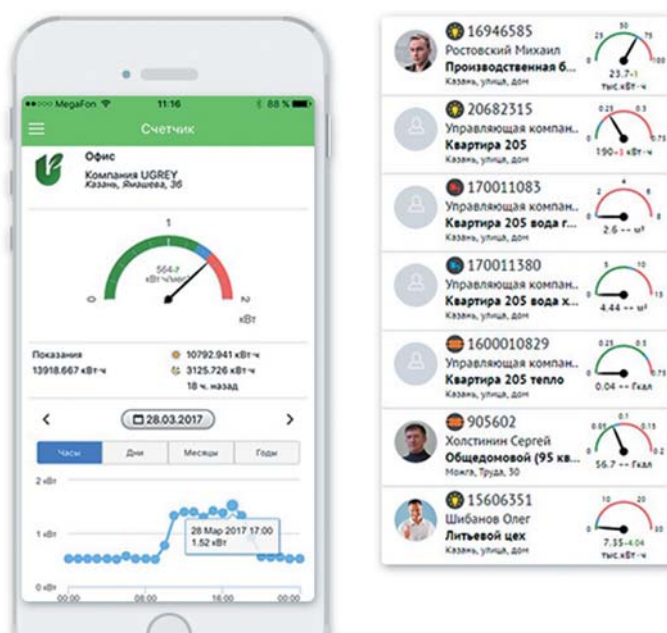
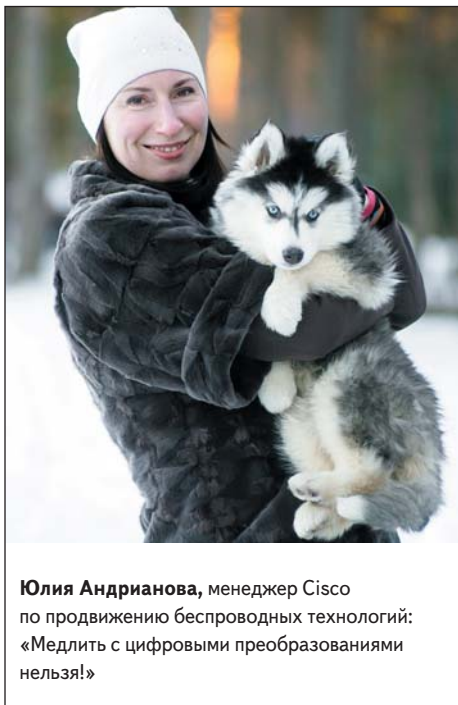


Рис. 7. «Умный учет» от UGREY

# Переход к «цифре»:

чем раньше, тем лучше

**Словосочетание «Интернет вещей» сегодня, пожалуй, не удивляет даже далеких от технологий связи людей. А вот термин «цифровизация» все еще не так глубоко вошел в обиход и вызывает множество различных вопросов. Прояснить некоторые нюансы мы попросили Юлию Андрианову, менеджера Cisco по продвижению беспроводных технологий.**



**Юлия Андрианова**, менеджер Cisco по продвижению беспроводных технологий: «Медлить с цифровыми преобразованиями нельзя!»

*Какие требования цифровая трансформация бизнеса и промышленных отраслей предъявляет к организации беспроводной связи?*

Сегодняшний рост количества мобильных устройств вызвал в беспроводных сетях потребность, во-первых, в поддержке высокой плотности пользователей — High Density Wi-Fi. Для реализации таких сценариев нужно высокопроизводительное оборудование, особое внимание к дизайну и конфигурации сети. Во-вторых, это требования к беспроводной безопасности, то есть предотвращение атак на сеть «с воздуха», а также работа с помехами, поскольку одновременно работающих сетей в одном помещении становится много и, используя один и тот же диапазон, они снижают производительность друг друга.

Более глобальные тренды относятся не к беспроводному сегменту исключительно, но в целом к организации связи на корпоративном уровне. Ранее для корпоративных сетей основными факторами были производительность, надежность, безопасность. Сегодня рост числа подключенных устройств, увеличение количества угроз и сложности сетей ведут к потребности в новых свойствах сетей.

Сегодня также важен новый уровень прозрачности — важно видеть, что происходит в сети: что делают пользователи, какие приложения используют сетевой ресурс, насколько оптимально они работают и где наблюдаются «узкие» места.

Еще один акцент сделаю на программируемости, или возможности внедрения новых функций в сеть, способствующих повышению уровня ее автоматизации. Обслуживание огромной сети с распределенными филиалами и тысячами клиентов посредством командного интерфейса требует больших временных затрат и имеет высокий уровень сложности. Программируемость должна сделать большие сети конфигурируемыми в несколько кликов мыши.

Также важен новый уровень гибкости, поскольку потребности промышленных комплексов отличаются от потребностей малого

бизнеса, и, безусловно, требуется соответствие регулированию в условиях высокой скорости внедрения новых сервисов.

Завтра требований к сетям станет еще больше. Они должны будут делать поведенческий анализ по устройствам, клиентам и приложениям, потребуется полная автоматизация управления сетью, она станет обучаемой и автонастраиваемой, или интуитивной.

Новое поколение сетевых решений Cisco, которое компания анонсировала в июне 2017 г., позволит подключить миллиарды устройств, практически мгновенно их идентифицировать, понять, какие из них заслуживают доверия, а какие — нет, получить максимальную пользу от подключений, и сделать все это за несколько часов или даже минут, а не за несколько недель или месяцев, которые обычно уходят на конфигурирование вручную. Бизнесу, в распоряжении которого есть такая сеть, не страшны никакие перемены и неожиданности.

*Какие технологии беспроводной связи (Wi-Fi, LoRa, NB-IoT...) в большей степени могут удовлетворить потребности грядущего процесса повальной цифровизации всего и вся? Если возможно, в этом вопросе имеет смысл разделить потребности и возможности промышленности, частного оконечного пользователя и разномасштабного бизнеса.*

Беспроводные технологии являются важнейшим элементом концепции «Интернета вещей», т. к. это удобный, легко наращиваемый транспорт для передачи трафика с любого количества устройств. Технологии при этом используются разные, иногда им приходится конкурировать между собой.

Абсолютно все клиенты ожидают бесперебойной работы сети Wi-Fi. Небольшие компании и частные пользователи ожидают также, что стоимость сети будет невысока. Для них разработаны экономичные решения, недорогие точки доступа с необходимым функционалом, которые могут на своей процессорной базе выполнять наиболее важные функции контрол-

лера беспроводной сети, пограничного шлюза и менеджера политик доступа в сеть.

Крупный бизнес требует более продвинутого функционала, высокой производительности, возможности определения нахождения клиентского устройства или оборудования, помеченного специальными метками, сбора аналитики перемещения клиентов в сети и интерактивного взаимодействия с устройствами с учетом их местоположения, а также работы голосовых приложений поверх Wi-Fi.

**«Умный дом», «умный город», «умное предприятие» — можно ли (если можно, то в какой степени) эти понятия приравнять к понятию «цифровизация»?**

В современном мире понятие «умный» основывается на использовании цифровых технологий передачи и обработки информации. Поэтому «умное» предприятие — это такое предприятие, на котором в различной степени используются цифровые технологии: сбор информации о технологическом процессе, передача информации, ее анализ, использование средств моделирования изделий и процессов, выстраивание системы заказов по цепочке поставщиков и потребителей. В основе всего этого лежат программные и аппаратные средства на базе цифровых технологий.

**Как эксперты Cisco оценивают перспективы «цифровизации» в России и какую роль в этом движении играют именно беспроводные технологии?**

Цифровизация в России набирает ход, это видно по знаковым проектам, уникальным для всего мира, например Wi-Fi-сети в метро Москвы и Санкт-Петербурга. Мы видим внедрение мировых «цифровых» практик в России, таких как навигация с помощью Wi-Fi в музеях, аэропортах, торговых центрах, внедрение новых методов оплаты товаров в магазинах, где как транспорт для проведения оплаты используется надежная Wi-Fi-сеть,

Wi-Fi высокой плотности на стадионах, Wi-Fi в образовательных учреждениях.

По прогнозам Cisco, количество публичных хотспотов Wi-Fi в РФ с 2015 по 2020 г. вырастет в 36 раз. К 2021 г. доля модулей межмашинной связи (M2M) составит около половины подключенных устройств. В частности, в России это 57% всех сетевых устройств и 7,7% IP-трафика. Не забудем и про носимые гаджеты, число которых к 2021 г. достигнет 32 млн. Из них почти 2 млн будут оснащены встроенными средствами сотовой связи.

Мы ожидаем, что публичный Wi-Fi вырастет существенно и охватит новые индустрии.

**Готов ли в целом отечественный бизнес к новым вызовам в виде угроз безопасности личных и коммерческих данных, передаваемых по беспроводным сетям?**

Бизнес действительно не всегда торопится переходить к «цифре», ссылаясь на риски информационной безопасности. С одной стороны, эти опасения можно понять. В среднем проходит три месяца, прежде чем подвергшаяся кибератаке организация понимает, что произошло. При этом размер ущерба от одной атаки достигает \$4 млн. Надо отметить, что Cisco блокирует ежедневно 20 млрд угроз (а это в шесть раз больше числа ежедневных поисковых запросов Google).

С другой стороны, медлить с цифровыми преобразованиями нельзя: по прогнозам IDC, 40% ведущих компаний могут быть вытеснены с рынка новичками, которые с самого начала уже встали на путь цифрового бизнеса.

Именно поэтому Cisco предлагает совершенно новую концепцию сетевого взаимодействия — интуитивную сеть, которая распознает намерения, нейтрализует зашифрованные угрозы и постоянно обучается, открывая новые возможности и увеличивая маневренность бизнеса. Технология продвинутого анализа угроз Enhanced Threat Analytics (ETA) решает проблему сетевой безопасности: ETA находит

известные сигнатуры атак даже в зашифрованном трафике, помогая обеспечивать безопасность при сохранении конфиденциальности.

**Если дать волю фантазии, в каком направлении дальше могли бы развиваться беспроводные технологии? Что нас ждет лет через 10–15? Могут ли появиться какие-то, доселе неизвестные, протоколы и стандарты?**

Я думаю, дальнейшее развитие беспроводных технологий пойдет в нескольких направлениях. Беспроводные сети смогут одновременно поддерживать еще большее количество устройств для «Интернета вещей». На базе развернутых беспроводных сетей в помещениях появятся новые сервисы для клиентов — навигация, информация о помещении, поиск друга, ближайшей примерочной, парковки. Проходя мимо цифровых панелей, мы будем видеть информацию, адресованную именно нам.

Радикально улучшится управляемость сетей, большое развитие получит собственный сетевой интеллект, который автоматически будет справляться с изменяющейся радиосредой, поведением приложений и клиентских устройств. По аналогии с современным смартфоном, который во многом «думает» за нас, управляя множеством процессов в то время, как мы просто касаемся иконки на дисплее, сеть будет собирать информацию о среде, клиентах, приложениях, автоматически настраиваться до оптимума, отправляя специалисту ИТ лишь предупреждения о возникающих рисках. Сеть будет тестировать себя, находить узкие места, дополнительные ресурсы и перенастраиваться. Управление сетью станет интуитивно понятным, специалисты ИТ будут оперировать бизнес-понятиями, такими как политики, роли, приложения, приоритеты, оставив журналы учета IP-адресов для музеев связи.

Я уверена, что цифровизация захватила мир, и дальше нас ждут еще большие технологические прорывы, связанные с объемами данных и методами их обработки. ■

## НОВОСТИ

### Супрессор RClamp2431TQ от Semtech для защиты антенн автомобильных устройств



Корпорация Semtech представила одноканальный супрессор RClamp2431TQ, предназначенный для защиты автомобильных антенн от электростатического разряда.

В связи с увеличением числа автомобильных устройств, использующих беспроводную связь, выросло количество антенн, требующих надежной защиты от электростатических разрядов. Супрессор RClamp2431TQ является частью платформы компонентов AEC-Q100 компании Semtech и обладает уникальным сочетанием низкого уровня напряжения ограничения и сверхнизкой емкости.

Современные автомобили оборудуются различными антеннами радиосетей — от GPS до Bluetooth, V2V и NFC. Сверхнизкая емкость RClamp2431TQ позволяет использовать данный компонент с антеннами, обеспечивающими высокую пропускную способность, не влияя на целостность радиочастотного сигнала. Супрессор с рабочим напряжением 24 В может быть применен для антенн систем связи ближнего диапазона

действия. Кроме малой емкости, радиочастотные схемы требуют достаточно низкого напряжения ограничения от электростатического разряда. По сравнению с существующими традиционными стандартными компонентами защиты пиковое напряжение ограничения электростатического разряда супрессора RClamp2431TQ уменьшено на 40%.

Основные особенности супрессора RClamp2431TQ компании Semtech:

- защита одной линии ввода/вывода от переходных процессов высокоскоростных сигнальных линий в соответствии с IEC 61000-4-2;
- рабочее напряжение: 24 В;
- малогабаритный корпус: 1×0,6 мм;
- небольшая емкость: 0,35 пФ.

[www.icquest.ru](http://www.icquest.ru)

# Технологическая конференция «R&D в сфере IoT: Стандарты. Сетевые технологии. Компоненты. Тестирование»

20 сентября 2017 г. состоялась технологическая конференция «R&D в сфере IoT: Стандарты. Сетевые технологии. Компоненты. Тестирование», организованная издательством «Телеспутник», Фондом развития интернет-инициатив (ФРИИ), Ассоциацией участников рынка «Интернета вещей» (АИВ), медиагруппой «Электроника» при партнерстве с Keysight Technologies.

Заместитель директора по технологическому развитию ФРИИ и председатель правления АИВ Сергей Алимбеков в своем приветственном слове назвал конференцию «брутальной тусовкой разработчиков». И тут же объяснил, зачем ФРИИ, развивающий в стране цифровое предпринимательство и инвестирующий в технологические стартапы, поддержал мероприятие. По его словам, развитие «Интернета вещей» (IoT), являющегося одной из основ цифровой экономики, перешло в плановое русло, в отличие от многих «хайповых» технологий, которые теряют актуальность по мере того, как «хайп» вокруг них затихает. В этих условиях ФРИИ считает особенно важной работу по консолидации стандартов и технологий IoT, чтобы разработчики использовали наиболее перспективные из них, и такая работа ведется, в том числе и на площадке АИВ, учрежденной ФРИИ.

Говоря о консолидации IoT-стандартов, руководитель направления беспроводных

технологий агентства J'son & Partners Consulting Виталий Солонин, вкратце упомянув о «зоопарке» беспроводных технологий для IoT (рис. 1), представил прогноз исхода «войны стандартов и технологий LPWAN» (Low Power Wide Area Network), от которой зависит победа в «Интернете вещей» как таковая. По мнению Солонина, в IoT неприемлема идеология «одного размера, подходящего каждому», поэтому делать ставку на какую-то конкретную технологию бесперспективно. Будущее — в конвергенции технологий, например такой, как ее представляет телеком-оператор Orange: сочетание LoRaWAN + LTE-M — подходящая комбинация для провайдера IoT-сервисов. В этих условиях LoRaWAN может обеспечить подключение к сети, например, газовых счетчиков и детекторов дыма, а LTE-M — Connected Car, видеочамер и др. Актуальной становится поддержка различных технологий LPWAN на одной платформе или чипсете. Например, Actility ThingPark поддерживает LoRaWAN, LTE-M и NB-IoT, а в июне 2017 г. появился первый в мире чипсет с поддержкой LTE-M и NB-IoT плюс (опционально) 2G. В России же, считает Солонин, на различных вертикальных рынках могут соседствовать разные технологии: для международной логистики — зарубежная LoRa, в ЖКХ — отечественные «Вавиот» и «СТРИЖ».

В ходе конференции состоялось первое публичное представление новейшей разработки компании «Вавиот» — сетевой технологии NB-Fi. Генеральный директор «Вавиота» Евгений Ахмадишин презентовал свое детище через сравнение с сетями NB-IoT, которые развивают множество сотовых операторов по всему миру, в том числе в РФ. Из слов главы «Вавиота» следовало, что NB-Fi имеет преимущество перед



NB-IoT при скоплении большого количества устройств или там, где нет сотовой сети вообще. Стандарт, по мнению Ахмадишина, будет востребован при работе в ЖКХ, с датчиками дыма, в промышленном IoT и сельском хозяйстве, на «умных» дорогах. В свою очередь, NB-IoT даст фору NB-Fi при потребности в глобальном покрытии, например при совместном использовании с носимыми устройствами, подключенными автомобилями, системами слежения, потребительской электроникой, медицинскими гаджетами. Ахмадишин прогнозирует, что операторы коммерческих сетей NB-Fi и NB-IoT появятся в РФ уже в IV кв. 2018 г. Добавочная цена устройства в российских условиях составит 100 руб. для первого стандарта и 1 тыс. руб. для второго, стоимость базовой станции начального уровня — 5 тыс. и 500 тыс. руб., базовой станции премиум-уровня — 50 тыс. и 2 млн руб. соответственно.

Впрочем, участники конференции, в частности эксперт отдела развития радиочастотного ресурса и ЭМС ПАО «Мобильные ТелеСистемы» (МТС) Василий Скрынников, критически отнеслись к представленным руководителем «Вавиота» показателям. Представитель МТС уточнил, что в NB-IoT три режима организации канала, и если работа NB-IoT организуется в стандартном канале уже работающей базовой станции, то ни о каких затратах в 2 млн руб. говорить не приходится, поскольку для запуска NB-IoT требуется смена прошивки станции, а не ее изначальная установка и подключение.

Компания «ЭФО» представила свой взгляд на дальнейшее развитие технологии Bluetooth в рамках концепции IoT — Bluetooth Mesh, базирующийся на спецификациях Bluetooth 5.0 (опубл. 06.12.2016) и Mesh Networking (опубл. 13.07.2017). Эта технология имеет ряд преимуществ (табл. 1, рис. 2).

Борис Кривошеин, исполнительный директор ООО «ИнЧип Технологии», посвятил свое выступление проблемам безопасности цифровой среды IoT. Среди основных угроз он отметил:

- неавторизованный доступ, модификацию и удаление ключей сервисного уровня IoT-шлюзов и конечных устройств;
- извлечение закрытых данных из IoT-шлюзов и конечных устройств;
- вмешательство в уровень управления IoT-устройствами;
- атаки типа «человек посередине» (Man-in-the-middle);
- атаки внедрения (Injection Attacks) — навязывание системе ложной реакции через манипуляции данными;
- атаки на встроенное ПО IoT-шлюзов и конечных устройств;
- ошибки при конфигурировании и администрировании цифровой среды IoT.

По мнению Кривошеина, для защиты IoT-сетей от киберугроз необходимы следующие технологии и компоненты:

- всесторонний анализ угроз для сетей, включающих IoT-шлюзы и IoT-устройства;
- устройства для построения защищенной сетевой инфраструктуры;
- граничные маршрутизаторы с поддержкой защищенного стека протоколов (IEEE802.15.4/6LoWPAN/Thread...);

- средства разработки, обеспечивающие базовые механизмы защиты, такие как Kura (Eclipse Foundation), ESF (Eurotech), IAR Embedded Workbench (Silicon Labs);
- технологии сбора и обработки больших массивов данных;
- средства мониторинга и управления сетями IoT. ■

Видеозапись конференции можно посмотреть на YouTube по ссылке [https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=2312&v=AexYt5gYLFE](https://www.youtube.com/watch?time_continue=2312&v=AexYt5gYLFE).

Таблица 1. Сравнение различных беспроводных Mesh-сетей

	Bluetooth Mesh	Thread	ZigBee
Область применения	• Освещение • Домашняя автоматизация	• Освещение • Домашняя автоматизация • Автоматизация зданий	• Освещение • Домашняя автоматизация • Снятие показаний со счетчиков
Уровень приложения	• Обязательная собственная спецификация (совместимость)	• Любой IP-протокол (dotdot, OCF, Weave)	• ZigBee Cluster Library (ZCL) • dotdot
IPv6	Нет	Да	Нет
Способ выхода в IP-сети	• Смартфоны, планшеты • Шлюзы	• Border Router (очень простой) • Шлюзы	• Шлюзы
Размер сети	Сотни узлов (ручной выбор роутеров с планшета или смартфона, легкость переназначения роутеров)	Сотни узлов (автоматический выбор роутеров)	Сотни узлов (ручной выбор роутеров)
Доставка сообщений	Управляемая лавинная (экономия памяти, скорость перестроения, только очень короткие сообщения)	Полноценная маршрутизация (более высокая пропускная способность)	Полноценная маршрутизация (более высокая пропускная способность)
Дополнительные плюсы	BLE радиомаяки для локализации	Сквозной защищенный канал от конечного устройства до сервера	Наиболее развитый уровень приложения



Bluetooth Mesh: резюме			
НАДЕЖНОСТЬ	РАСШИРЯЕМОСТЬ	БЕЗОПАСНОСТЬ	СОВМЕСТИМОСТЬ
<ul style="list-style-type: none"> <li>* Несколько путей доставки сообщений</li> <li>* Сеть продолжит работать после выхода из строя любого из узлов</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Увеличение зоны покрытия</li> <li>* Поддержка нескольких сотен узлов</li> <li>* Простота добавления и замены узлов</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Защита сети от всех известных на сегодняшний день типов атак</li> <li>* Простота добавления для разных приложений</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Обмен данными регламентируется на всех уровнях, что обеспечивает совместимость устройств различных производителей</li> </ul>
<p><b>Рис. 2.</b> Особенности Bluetooth Mesh</p>			

# Технологии 5G становятся ближе

**В любой научно-технической дискуссии о перспективах развития технологий беспроводной связи вопрос о 5G, так или иначе, становится центральным. Судя по последним заявлениям на конгрессе Mobile World, технологии 5G — это уже реальность. Однако, по мнению автора статьи, ситуация несколько иная, и мы только начинаем приближаться к технологиям 5G.**

**Сара Йост (Sarah Yost)**

**Перевод: Виктор Алексеев,  
к. ф.-м. н.**

**В** настоящее время гонка за стандарты 5G, возможно, уже потеряла свою первоначальную остроту — по крайней мере, существует некоторое понимание этой технологии, но в разработках, проектировании оборудования и внедрении мы находимся в самом начале процесса.

В мире беспроводной связи за последний год произошло много значимых событий — начиная от стандартизации и важнейших обновлений, полученных от регулирующих органов, до понимания канала миллиметрового диапазона (mmWave) и технологий, которые позволят коммерциализировать 5G. Давайте разберемся, что означают последние достижения в рамках этой технологии.

## Частотный диапазон 5G: от mmWave до 6 ГГц

Существует множество проблем и спорных вопросов, которые необходимо решить в технологиях, объединенных под общим названием 5G. Однако можно с уверенностью говорить

о том, что, во-первых, крайне важен диапазон частот в нижнем пограничном районе 6 ГГц. Во-вторых, в технологиях 5G mmWave будет дополнять основной интервал 6 ГГц.

Основные требования, предъявляемые к 5G, иллюстрирует рис. 1. Прежде всего, это исключительно надежная и устойчивая широкополосная связь, обеспечивающая работу приложений расширенного мобильного широкополосного доступа (eMBB). Такая связь должна удовлетворять требованиям как медленных, но крайне надежных M2M-приложений, так и высокоскоростных приложений IoT/IIoT, работающих в режиме реального времени. Понятно, что при использовании только одного частотного диапазона очень трудно, если это вообще возможно, удовлетворить перечисленным базовым требованиям. Однако комбинация двух отмеченных выше диапазонов позволяет надеяться на успешное решение этой проблемы. С одной стороны, диапазон ниже 6 ГГц сможет обеспечить лучшее распространение и обратную совместимость для узкополосных приложений. С другой — смеж-

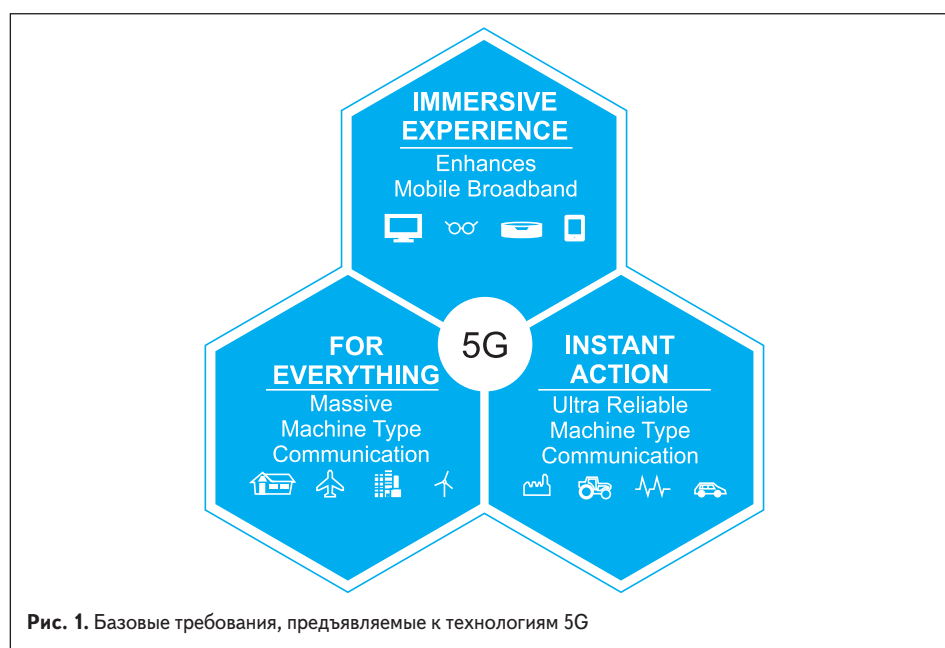
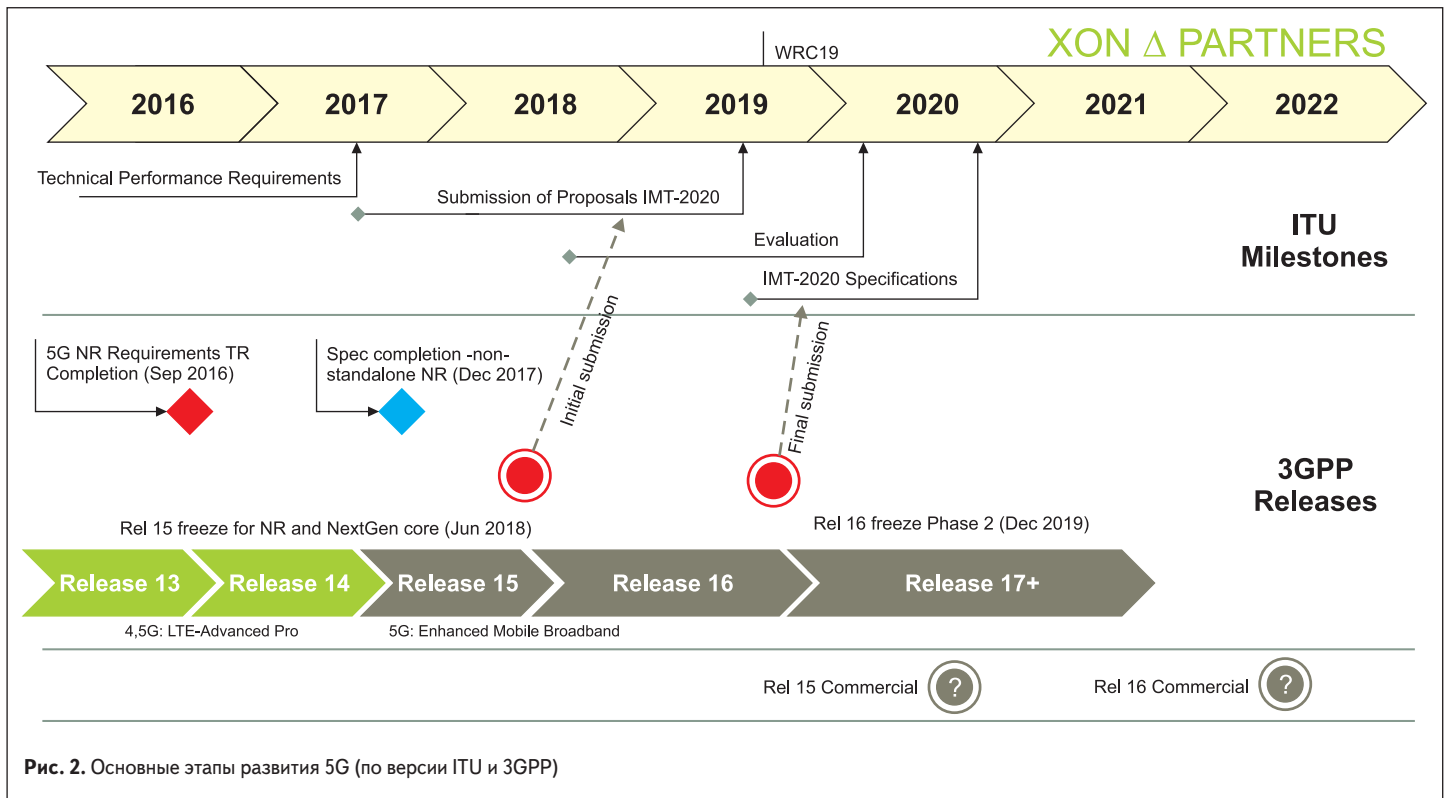


Рис. 1. Базовые требования, предъявляемые к технологиям 5G



ная полоса пропускания в mmWave позволит поддерживать широкополосные приложения eMBB в технологиях 5G.

### Этапы развития 5G

Международный союз по электросвязи (The International Telecommunications Union, ITU) и консорциум 3rd Generation Partnership Project (3GPP) выделяют две фазы развития 5G (рис. 2): первая для частот ниже 40 ГГц, вторая — для частот выше 100 ГГц. Первый этап должен завершиться выпуском релиза 3GPP LTE-Rel 15, который планируется опубликовать в июне 2018 г. Второй планируется завершить в декабре 2019 г., когда ожидается выпуск официальной документации по LTE 16 [1].

Рекомендации ITU, к сожалению, не содержат конкретной технической информации, кроме общих положений о частотах и форматах данных технологий 5G. В марте 2017 г. состоялось пленарное заседание 3GPP RAN, на котором был представлен перспективный план ускоренного развития, названный в документах Way Forward (WF) и подразумевающий новые радиотехнологии, объединенные под общим названием 5G New Radio (NR). Основные этапы этого плана показаны на рис. 3.

Ведущий японский провайдер мобильной связи NTT DOCOMO на заседании RAN4 представил свои соображения по поводу WF — какие полосы частот следует использовать в перспективном решении [3]. В таблице 1 показаны диапазоны частот, выделяемые для ведущих операторов мобильной связи в различных регионах мира.

### 28 ГГц и сети Verizon

Теоретические и практические разработки для диапазона 28 ГГц наиболее интенсивно и успешно проводит один из мировых лидеров

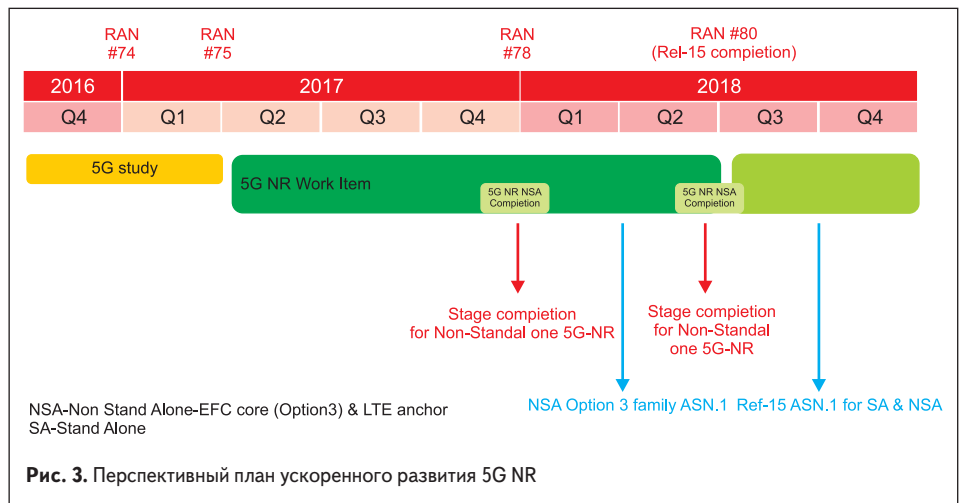
мобильной связи американская корпорация Verizon.

В марте 2016 г. состоялось совещание рабочей группы по новым частотным диапазонам США, в котором приняли участие ведущие американские законодательные организации, входящие

в Федеральную комиссию по вопросам регулирования связи США (Federal Communications Commission, FCC), — Office of Engineering and Technology (OET), Wireless Telecommunications Bureau (WTB) и др. Итоговым документом стало извещение о предполагаемом пересмо-

**Таблица 1.** Диапазоны частот, выделяемые для ведущих операторов мобильной связи в различных регионах мира в соответствии с решениями RAN4

Частотный диапазон/полоса LTE	Операторы связи, предполагающие работу в указанном диапазоне частот
3,3–4,2 ГГц	DOCOMO, KDDI, SBM, CMCC, China Unicom, China Telecom, KT, SK Telecom, LG Uplus, Etisalat, Orange, Telecom Italia, British Telecom, Deutsche Telekom
4,4–4,99 ГГц	DOCOMO, KDDI, SBM, CMCC, China Unicom, China Telecom
25,25–29,5 ГГц	DOCOMO, KDDI, SBM, CMCC, KT, SK Telecom, LG Uplus, Etisalat, Orange, Telecom Italia, British Telecom, Deutsche Telekom
31,8–33,4 ГГц	Orange, Telecom Italia, British Telecom
37–40 ГГц	AT&T, Verizon, T-mobile
1710–1785 МГц/1805–1880 МГц (полоса 3)	CMCC, China Telecom
2500–2570 МГц/2620–2690 МГц (полоса 7)	CHTTL, British Telecom
880–915 МГц/925–960 МГц (полоса 8)	CMCC
832–862 МГц/791–821 МГц (полоса 20)	Orange
703–748 МГц/758–821 МГц (полоса 28)	Orange
2496–2690 МГц (полоса 41)	Sprint, China Telecom, C-Spire, China Unicom
1710–1780 МГц/2110–2200 МГц (полоса 66)	T-mobile
1920–1980 МГц/2110–2170 МГц (полоса 1)	China Unicom, China Telecom



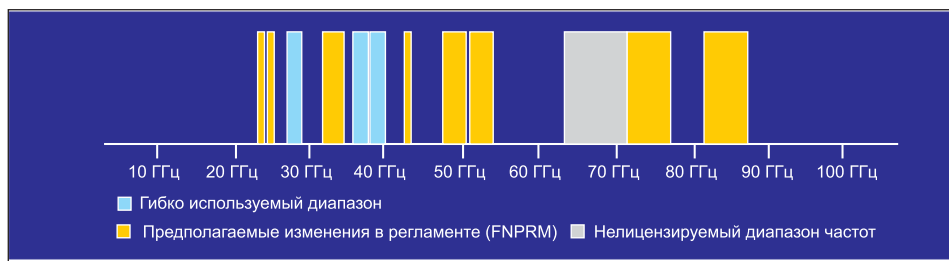


Рис. 4. Частотные диапазоны mmWave, разрешенные FCC для использования в США

тре правил (NPRM) Commission's Spectrum Frontiers [4], в котором регламентировалось использование частот mmW. Этот документ был одобрен FCC. Таким образом, было узаконено использование полосы 28 ГГц, которая является одной из трех, доступных сегодня для лицензионного использования в США [5]. На рис. 4 показано распределение полос.

В прошлом году Verizon получила от XO Communications [6] лицензию на использование полосы 28 ГГц и анонсировала намерение использовать эту частоту для развертывания в своих сетях. Несмотря на то, что в настоящее время не существует единого стандарта на протоколы и оборудование для частотного диапазона 28 ГГц, Verizon оснащает свои тестовые сети оборудованием, которое может быть адаптировано под любую спецификацию благодаря мощной и гибкой программной платформе [7]. Другие американские операторы, например AT & T и T-Mobile, также подтвердили свои планы использования диапазона 28 ГГц и сотрудничества с ведущими производителями оборудования с целью тестирования новых моделей.

Основная проблема, связанная с развертыванием оборудования именно сейчас, при отсутствии единых стандартов, заключается в том, насколько оборудование, используемое Verizon, будет соответствовать разрабатываемым стандартам 3GPP 5G. Если оборудование можно будет адаптировать через несколько лет под стандарты 3GPP 5G, то Verizon окажется лидером в 5G. В противном случае фирма будет вынуждена заменять оборудование на разворачиваемых в настоящее время сетях. Поэтому Verizon делает все возможное для проведения предварительной стандартизации технологий mmWave.

В 2015 г. Verizon совместно с Cisco, Ericsson, Intel, LG, Nokia, Qualcomm и Samsung основали Технический форум 5G (5GTF) [8]. Основной целью рабочей группы этого форума стала разработка на базе диапазона mmWave беспроводной альтернативы проекту Fiber to the Home (FTTH), получившей название Fixed Wireless Access (FWA). В большинстве проектов 5GTF, базирующихся на стандарте LTE, используются новые концепции, разрабатываемые в рамках программы 5G 3GPP.

В проектах 5GTF используются поднесущие 75 кГц вместо стандартного значения 15 кГц, что позволяет увеличить полосу пропускания до 100 МГц для каждой несущей частотной составляющей. Кроме того, с целью согласования со стандартным вариантом LTE, используется обратная пропорциональная зависимость, уменьшающая размер подкадра. Также следует отметить технологию формирования направ-

ленного сигнала, предварительное кодирование и расширенный набор фреймов управления.

На прошедшей в марте 2017 г. в Сан-Франциско конференции IEEE по беспроводным сетям и связи (Wireless Communications and Networking Conference, WCNC) фирма National Instruments (NI) продемонстрировала работу оборудования 5GTF в режиме реального времени [9]. Следует особо подчеркнуть, что это была первая демонстрация полностью рабочего проекта.

Основываясь на планах развития диапазонов частот (WF), предложенных на совещании RAN4 Meeting #82WF, ведущие европейские сотовые операторы, в том числе Orange, British Telecom и Telecom Italia, пришли к общему соглашению о возможности использования диапазона 24–28 ГГц. Преимущества этого частотного диапазона победили господствующее в прошлом мнение о том, что в Европе невозможно использование частот в районе 28 ГГц. Следует отметить, что европейские провайдеры внесли также предложение об использовании диапазона 32 ГГц.

### Модернизация радиочастотного блока оборудования 5G

Как уже говорилось, общие характеристики и перспективный план разработки радиочастотной части устройств 5G (5G New Radio, NR) были сформулированы на пленарном заседании 3GPP RAN plenary meeting (#75) в марте 2017 г.

Из основных требований, предъявляемых к NR, можно выделить следующие:

- поддержка всех мобильных приложений во всех частотных диапазонах в полном соответствии с рекомендациями ITU;
- расширенная мобильная широкополосная связь (Enhanced mobile broadband, eMBB);
- ультранадежная связь с минимальными значениями задержки (Ultra Reliable Low Latency Communications, URLLC);
- поддержка массивированной беспроводной связи между различными машинами и механизмами (Massive Machine Type Communications, MMTС).

Перечисленные требования предполагают существенные изменения физического уровня (PHY) оборудования 5G, которое должно обеспечивать высокоскоростную широкополосную связь для сотен тысяч устройств Narrow Band IoT (NB-IoT). Кроме того, для некоторых приложений, таких, например, как роботизированные транспортные средства (без водителей), необходимо, чтобы PHY 5NR обеспечивал максимально высокую степень надежности при минимальных временах обработки данных.

Необходимо отметить, что требования, предъявляемые 3GPP к 5G NR, значительно жестче и разнообразнее, чем параметры PHY устройств Verizon 5G (V5G). Так, например, в отличие от V5G, в котором используется единый механизм формирования направленного сигнала, в требованиях 3GPP к 5G NR рассматриваются две схемы этой технологии — быстрая и медленная. Кроме того, в идеологии 5G NR предполагается максимально возможная адаптация существующих стандартов LTE к новым сетям при использовании разных скоростей передачи данных и поднесущих частот.

Несмотря на искусственный перегрев темы NR и попытки стимулировать предварительную стандартизацию оборудования, имеется очень мало публикаций о реальных испытаниях технологии 5G NR и полученных экспериментально параметрах. Немногочисленные отчеты о тестовых испытаниях оборудования на частотах 28 ГГц были, в основном, направлены на зондирование каналов передачи данных, а не на всестороннюю демонстрацию всех возможных в настоящее время параметров и функций 5G NR.

NI разработала свой вариант оборудования для 5G NR, поддерживающий MIMO-связь с мультимедиа. Основу этого оборудования составляют комплексный радиочастотный блок NI mmWave Transceiver System (MTS) и протокол физического уровня, разработанный на базе LabVIEW [10].

### Промежуточный финиш 5G

Вероятнее всего, в 2018 г. мы сможем ответить на вопрос, что такое 5G. Согласно планам ускоренного развития (3GPP RAN #75), в конце 2017 г. будут стандартизованы PHY- и MAC-уровни для 5G NR. По вопросам окончательного выбора частных диапазонов 5G нет точных сроков. Тем не менее проведенные в течение 2017 г. полевые испытания говорят о том, что реальное внедрение технологии 5G операторы начнут на частотах 28 ГГц. Во всяком случае, ведущий оператор Южной Кореи (KT) объявил о том, что запустит сети 5G в Пхёнчхане к открытию Зимних Олимпийских игр 2018 г.

Первый этап развития 5G должен завершиться в 2018 г. с появлением официальных стандартов 3GPP. Этот этап будет служить промежуточным финишем, после которого должны стартовать реальные технологические процессы 5G. ■

### Литература

1. <http://frankroyal.com/2016/08/08/will-5g-be-the-last-g/>
2. [www.nttdocomo.co.jp](http://www.nttdocomo.co.jp)
3. [www.3gpp.org](http://www.3gpp.org)
4. [https://apps.fcc.gov/edocs\\_public/attachmatch/FCC-15-138A1.pdf](https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-15-138A1.pdf)
5. Use of Spectrum Bands Above 24 GHz for Mobile Radio Services, GN Docket No. 14-177, Notice of Proposed Rulemaking, 15 FCC Record 138A1 (rel. Oct. 23, 2015).
6. [www.xo.com](http://www.xo.com)
7. [www.fiercewireless.com/tech/verizon-files-to-conduct-28-ghz-market-trials-4-states](http://www.fiercewireless.com/tech/verizon-files-to-conduct-28-ghz-market-trials-4-states).
8. [www.5gtf.org/](http://www.5gtf.org/)
9. <http://wcnc2017.ieee-wcnc.org/>
10. [www.ni.com/sdr/mmwave/](http://www.ni.com/sdr/mmwave/)



# SIM7000E/SIM7000E-N:

применение энергосберегающих режимов PSM и eDRX в сети NB-IoT

С релизом стандарта 3GPP Rel-13 [1] весной прошлого года миру мобильных IoT-устройств открылись три новые технологии — LTE Cat-NB1 (или Cat-M2, далее — NB-IoT), LTE Cat-M1 (eMTC) и EC-GSM-IoT, предназначенные обеспечить стабильную, повсеместную и, главное, энергоэффективную связь. Рынок IoT находится в самом начале развития, чтобы осознать все преимущества этих технологий, и только готовится применить их в практическом русле. Однако уже сегодня наметились тенденции к выбору той или иной технологии в разных странах (рис. 1). В частности, в России суждено быть сетям связи стандарта NB-IoT. Именно этой технологии и ее практическому применению посредством мультидиапазонных NB-IoT/GSM-модулей SIM7000E и SIM7000E-N посвящена данная статья.

**Батор Батуев**  
bator.batuev@sim.com

На скорость проникновения технологии NB-IoT в России, как и в других странах, влияет много факторов: публикация международного стандарта 3GPP, наличие абонентского оборудования (SIM7000E, SIM7000E-N и т. п.), организационно-техническая готовность операторов сотовой связи и проч. К последнему надо добавить простоту интеграции NB-IoT в существующие сети без глобальной модернизации сетевого оборудования. А это — обозримые перспективы внедрения новых технологий, свидетельствующие о том, что производителям IoT-оборудования новые разработки надо начинать уже сегодня, чтобы не оказаться в арьергарде в новой эпохе IoT-устройств. Ведь эти технологии позволят устройствам на батарейном питании работать без подключения к сети энергоснабжения в течение 10 лет [2]. А если обеспечено питание от солнечных батарей, то можно добиться почти неограниченного срока службы! Кроме того,

имея в виду технические особенности NB-IoT, покрытие узкополосной сети «глубже» по сравнению с GSM/GPRS-сетью, часто применяемой в M2M. Это значит, к большому сроку жизни добавляется уверенное покрытие. Все эти аргументы есть приложение к главному: существует реальная потребность в NB-IoT, огромный парк устройств, которые «ждут» энергоэффективной технологии связи.

## NB-IoT/GSM-модули SIM7000E и SIM7000E-N

Справедливости ради надо отметить, что в России полномасштабно развернутых сетей NB-IoT пока нет (прогноз — 2018 г.), и стандарт NB-IoT все еще развивается и дополняется новыми возможностями, которые мы можем видеть в более новых релизах 3GPP, но главные новинки, такие как энергосберегающие режимы PSM (Power Save Mode) и eDRX (Extended Discontinuous Reception), можно проверить и применить на практике уже сегодня на базе

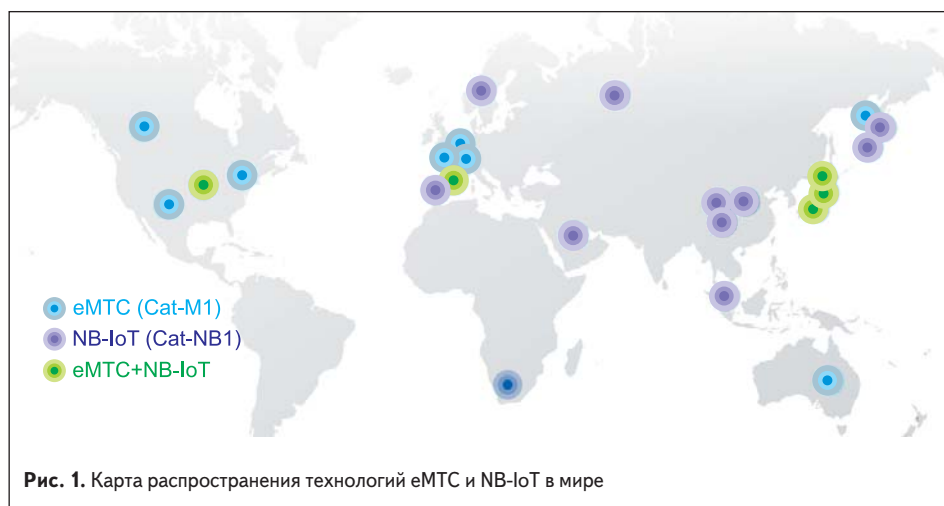


Рис. 1. Карта распространения технологий eMTC и NB-IoT в мире

Таблица 1. Сравнительная таблица основных характеристик модулей SIM7000E и SIM7000E-N

		SIM7000E	SIM7000E-N
Платформа		Qualcomm	
Корпус		LCC 24×24 мм	
Диапазоны частот	LTE NB-IoT	Band 3/8/20/28	
	CAT-M1 (eMTC)	Band 3/8/20/28	-
	GSM	GSM900/DCS1800	-
Пакетная передача данных, выгрузка/скачивание, кбит/с	GPRS	85,6/85,6	-
	EDGE	236,8/236,8	-
	NB-IoT		66/34
	eMTC	375/300	-
	GSM		-109
Чувствительность приемника в сети, дБм	LTE NB-IoT		-129
	UART	2	1
Интерфейсы	USB		1
	Аудио	1 (PCM)	-
	АЦП		1
	I <sup>2</sup> C		1
	GPIO		5
	Напряжение питания, В	3,0–4,3	
Потребление в сети LTE NB-IoT	Peak	0,6 А	
	LTE Idle	11 мА	
	LTE Sleep	1 мкА	
	PSM	9 мкА	
	eDRX	1–2 мА	
	Power off	7 мкА	
Диапазон рабочих температур, °C		-40...+85	
ПО	Протоколы TCP/IP, UDP, HTTP, FTP, PING, PPP, Email, MMS, NTP и проч. Совместимы с протоколами модулей SIM800-й серии и 3G-модулей SIM5300E/EA		Протоколы TCP/IP, UDP, PPP. Совместимы с протоколами модулей SIM800-й серии и 3G-модулей SIM5300E/EA
	SMS		
	Embedded AT		
Навигационный приемник	ГЛОНАСС/GPS/Beidou/Compas/Galileo/QZSS		Опция (по умолчанию нет)
Обновление ПО		USB, FOTA (ожидается)	

специализированных лабораторий операторов сотовой связи. Это и было сделано с применением мультидиапазонного NB-IoT/GSM-модуля сотовой связи SIM7000E (рис. 2).

SIM7000E — первый на рынке NB-IoT/GSM-модуль, поддерживающий широкий спектр частот: B3, B8, B20 и B28. Для России, в перспективе, данный набор (за исключением B28) означает доступность сети NB-IoT практически везде, где существует покрытие сетей сотовой связи. Можно сказать, что такой набор частот делает этот модуль универсальным, в отличие от прочих модулей, представленных на рынке.

SIM7000E-N (рис. 3) является менее функциональной версией SIM7000E, и при этом он pin2pin совместим с последним. Сравнительная характеристика SIM7000E и SIM7000E-N наглядно показана в таблице 1.

Оба модуля совместимы с устройствами других стандартов: с GSM-модулями SIM800/SIM800F и 3G-модулями SIM5300E/SIM5300EA. Вопрос аппаратной совместимости с 2G- и 3G-дизайнами можно изучить более подробно, обратившись к соответствующей документации [3]. Программная совместимость между модулями обеспечена одинаковой системой AT-команд в части основных стандартных и проприетарных функций.

Из таблицы 1 можно сделать вывод, что SIM7000E применим там, где нужны обе сети — и GSM, и NB-IoT. А SIM7000E-N является модулем LTE Only. При работе в сети LTE есть одно техническое преимущество — максимальный ток в пике составляет всего 600 мА. В случае с SIM7000E-N это удешевляет источник питания и упрощает требования к нему при работе в экстремальных условиях. Хотя такого же потребления можно добиться и с SIM7000E, если принудительно, при помощи соответствующей AT-команды перевести его в режим LTE Only (как это сделать, будет рассказано далее).

Пару слов о поддержке eMTC в SIM7000E. Платформа позволяет работать и в сетях eMTC, это делает модуль универсальным решением для устройств, подлежащих продаже на европейский рынок, где может сложиться такая ситуация, когда доступна только эта сеть (рис. 1).

Говоря о надежности покрытия сети NB-IoT, стоит обратить внимание на чувствительность в сетях GSM и NB-IoT: последняя качественно выделяется на фоне GSM, не оставляя выбора в споре о том, покрытие какой сети в перспективе будет доступней и надежней.

Диапазон питающих напряжений SIM7000E/E-N позволяет эксплуатировать стандартную батарею вплоть до полного ее разряда, что может продлить срок службы устройства от одного заряда на значимое количество недель и месяцев.

Программное обеспечение (ПО) модулей SIM7000E/E-N может быть обновлено через интерфейс USB, а также (в скором времени) посредством FOTA (Firmware Over The Air), когда файл прошивки доставляется в память модуля посредством сети GSM или LTE и автоматически записывается.

Для устройств, где малые габариты и бюджет проекта имеют существенное значение, в скором времени будет доступно SDK для разработки

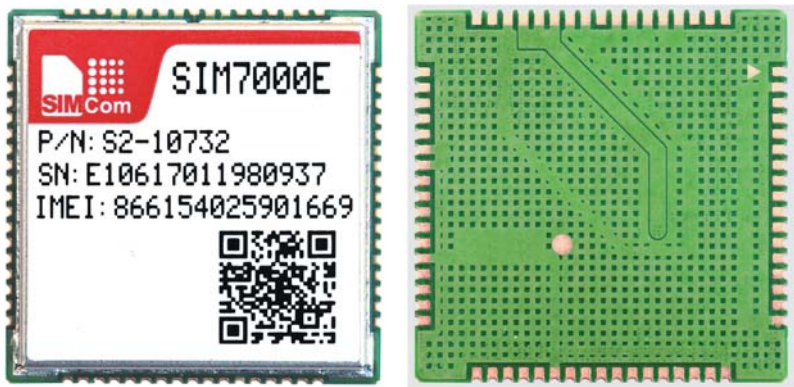


Рис. 2. Мультидиапазонный NB-IoT/GSM-модуль SIM7000E (слева — вид сверху, справа — вид снизу)



Рис. 3. Мультидиапазонный NB-IoT/GSM-модуль SIM7000E-N (слева — вид сверху, справа — вид снизу)

пользовательского ПО и его последующей записи прямо в память программ модуля. Эта технология называется Embedded AT, ей была посвящена статья [4] применительно к GSM-модулям SIM800-й серии. Эта технология может существенно сэкономить средства и нацелена на недорогое массово выпускаемое оборудование, как, например, бытовые счетчики.

И главное, что должен заметить опытный разработчик в таблице, это потребление тока в режимах eDRX и PSM. Как эти режимы работают и чем отличаются?

### Режимы PSM и eDRX

Прежде чем перейти к практической части, познакомимся с нововведениями стандарта 3GPP Rel-13 подробнее, а именно — с режимами PSM и eDRX.

#### eDRX

Данное понятие относится к пейджингу, к режиму LTE Idle, который оговаривается между модулем и сетью (SGSN/MME). На рис. 4 показана типичная эпюра потребления тока модулем во времени в режиме LTE Idle (и LTE Sleep) и во время обмена данными с сетью. Большую часть времени модуль находится в режиме LTE Idle (или LTE Sleep) и только в окнах пейджинга может получить от сети какие-либо данные.

Идея режима eDRX заключается в том, что скважность цикла пейджинга можно регулировать в пользу уменьшения среднего потребления тока в целом. В окне пейджинга модуль лишь слушает эфир и потребляет малый ток, а средний ток за цикл пейджинга может быть уменьшен вплоть до 1 мА при комбинировании с режимом энергосбережения модуля LTE Sleep. Наибольшее потребление тока будет лишь в моменты обмена данными с сетью, и именно эти сеансы будут определять срок жизни батарейного устройства. Чем больше данных, тем меньше срок.

Как же происходит переход в режим eDRX? Сеть и модуль «договариваются» о параметрах пейджинга в момент регистрации модуля в сети или во время периодической процедуры TAU (Tracking Area Update) и RAU (Routing Area Update). К примеру, во время регистрации в сети модуль шлет в сеть запрос Attach Request (рис. 5) с указанием параметров длительности окна пейджинга (Paging Time Window, PTW) и длительности цикла пейджинга (Cycle Length). Сеть, в свою очередь, может принять или не принять эти параметры (зависит от сети) и в ответном сообщении Attach Accept указать параметры, которые модуль должен в свою очередь принять. Спустя некоторое время режим eDRX придет в действие.

Система команд модулей SIM7000E и SIM7000E-N позволяет варьировать PTW в пределах от 1,28 до 20,48 с, а Cycle Length — в пределах от 5,12 до 10485,76 с (~3 ч). Параметры eDRX рекомендуется согласовывать с провайдером, и следует помнить, что увеличение Cycle Length ведет не только к увеличению срока жизни абонентского устройства, но и увеличивает время отклика устройства на запросы, инициированные удаленной

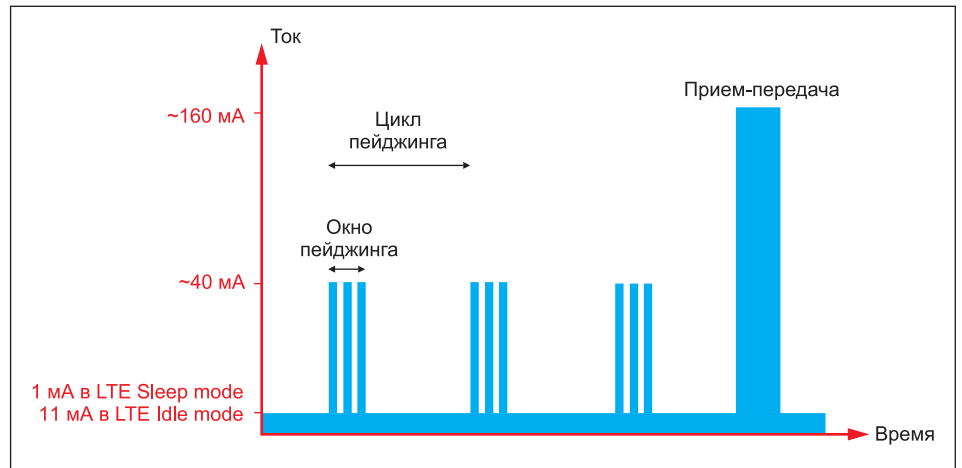


Рис. 4. Потребление тока модулем в режимах LTE Sleep/LTE Idle и во время обмена данными с сетью

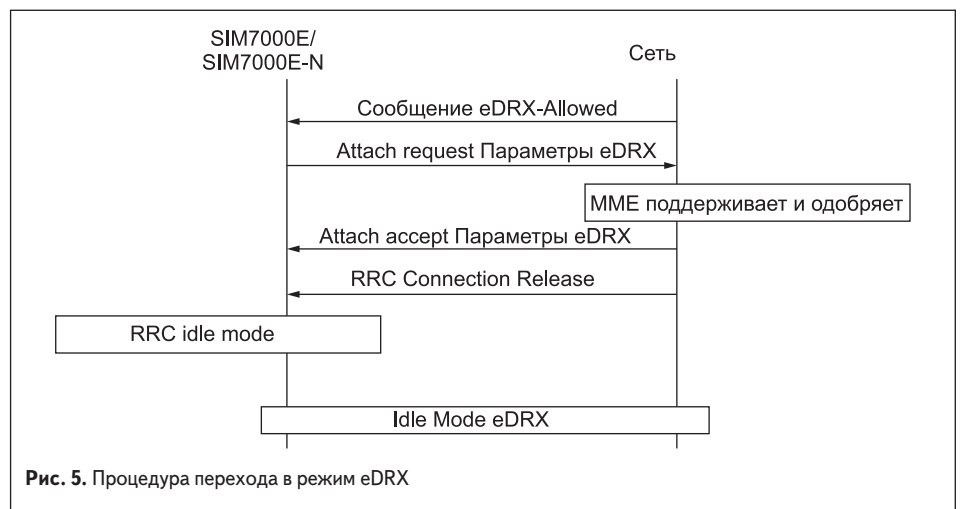


Рис. 5. Процедура перехода в режим eDRX

стороной. А длительные Cycle Length приводят к недоступности модуля со стороны «внешнего мира» (например, TCP/IP-сервера), при этом данные в сторону от модуля можно слать в любой момент.

#### PSM

Можно ли добиться меньшего потребления тока в режиме PSM? Да, и этот режим больше подходит для устройств, которые сами инициируют сеанс связи, скажем, по расписанию. Например, для счетчиков, которые раз в день

передают на сервер сбора данных показания расхода электричества/воды/газа.

PSM — это режим, при котором модуль находится в состоянии, близком к выключенному. При этом он не теряет регистрацию в сети и при выходе из этого режима не тратит время и ресурсы батареи на процедуру Attach или восстановление PDN-соединения. Модуль лишь производит редкие периодические процедуры TAU (рис. 6). В отсутствие передачи данных общее потребление тока будет определяться периодом TAU, за который отвечает параметр

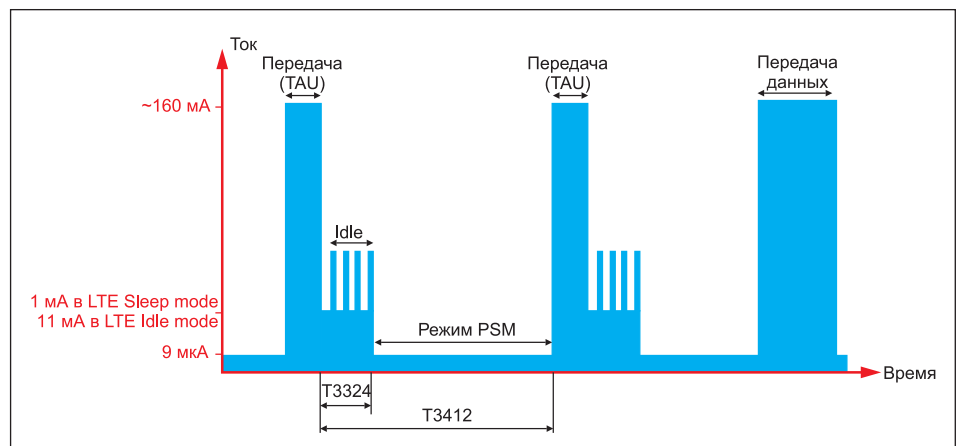


Рис. 6. Потребление тока модулем в режиме PSM

T3412. Потребление тока в режиме LTE Idle можно снизить, применив режим энергосбережения модуля LTE Sleep, в котором средний ток может быть уменьшен с 11 до 1 мА.

Система команд модулей SIM7000E/SIM7000E-N позволяет настраивать параметры T3324 и T3412. Эти параметры, так же как и параметры eDRX, согласовываются модулем с сетью посредством запроса Attach Request или TAU/RAU, как показано на рис. 7.

Инициатором обмена данными с «внешним миром» может быть только модуль. Он должен выйти из режима PSM по произвольному расписанию и инициировать сеанс связи с удаленной стороной как обычно. С момента выхода из режима PSM данные могут передаваться в обе стороны.

Есть одна возможность побудить устройство выйти на сеанс связи не по расписанию устройства, а «по заказу» от удаленной стороны: можно послать SMS-сообщение, которое будет доставлено устройству в моменты коротких промежутков времени LTE Idle после TAU.

Нетрудно догадаться, что режимы PSM и eDRX допускается комбинировать друг с другом, если это не противоречит идеологии работы устройства. Поверх этих режимов также можно наложить режим энергосбережения модуля LTE Sleep. А теперь перейдем к практической части.

### Работа модуля SIM7000E на практике

Работа модуля была проверена на базе лабораторий российских операторов сотовой связи. Во время тестов было выполнено следующее:

- переход модуля в режим NB-IoT Only, в котором был зарегистрирован факт успешного Attach как на стороне модуля, так и на стороне сети;
- обмен данными с удаленным сервером по протоколам TCP/IP и UDP в сети LTE NB-IoT и LTE eMTC;
- переход в режим eDRX с контролем пакетов Attach Request и Attach Acccept на стороне сети;
- переход в режим PSM с контролем пакетов Attach Request и Attach Acccept на стороне сети.

Для наглядности далее приведены AT-логи, раскрывающие детали тестов.

Переход в режим NB-IoT Only:

```

AT+CPIN?
+CPIN: READY // SIM-карта готова к работе
OK
AT+CNMP=38 // Выбор режима LTE Only
OK
AT+CMNB=2 // Выбор режима NB-IoT
OK
AT+CREG?
+CREG: 0,3 // Регистрации в сети GSM, конечно, нет
OK
AT+CGREG?
+CGREG: 0,1 // Регистрация в NB-IoT есть
OK
AT+CGATT?
+CGATT: 1 // Доступ к пакетной передаче данных есть
OK
    
```

```

AT+CPSI?
+CPSI: LTE NB-IOT,Online
OK
    
```

Обмен данными с удаленным сервером по протоколу TCP/IP:

```

AT+CGREG?
+CGREG: 0,1
OK
AT+CGATT?
+CGATT: 1
OK
AT+CGNAPN
+CGNAPN: 1,"*****" // Выяснить точку доступа
OK
AT+CSTT="*****" // Установить точку доступа
OK
AT+CIICR // Активировать контекст
OK
AT+CIFSR
172.16.15.183 // IP-адрес модуля в сети
AT+CIPSTART="TCP","11.22.33.44","5678" // Подключа-
емся к TCP/IP-серверу по его IP-адресу
OK
CONNECT OK // Сервер принял соединение
AT+CIPSEND?
+CIPSEND: 1460 // Проверим MTU
OK
AT+CIPSEND
>
..... // Шлем данные в сторону сервера,
данные доходят
SEND OK
hellofromremoteserver! // Данные от сервера
AT+CIPCLOSE // Закрываем сокет
CLOSE OK // Сокет закрыт
AT+CIPSHUT // Деактивируем контекст
SHUT OK // Соединение закрыто
    
```

Лог обмена данными с удаленным сервером по протоколу UDP аналогичен логу обмена данными по протоколу TCP/IP. Для краткости не будем его приводить.

Переход в режим eDRX:

```

AT+CGREG?
+CGREG: 0,1
OK
AT+CPSI?
+CPSI: LTE NB-IOT,Online
OK
AT+CEDRX= 2,1,3,0 // режим eDRX в сети NB-IoT,
PTW = 5,12 с, Cycle Length = 5,12 с
OK
AT+CPOWD=1 // Здесь перезагрузили модуль, чтобы
инициировать процедуру Attach при след. включении
NORMAL POWER DOWN
RDY
+CFUN: 1
+CPIN: READY
SMS Ready
AT+CGREG?
+CGREG: 0,1 // Модуль зарегистрирован в сети NB-IoT,
что подтверждается трейс-логами на стороне оператора
OK
AT+CPSI?
+CPSI: LTE NB-IOT,Online
OK
    
```

Переход в режим PSM:

```

AT+CGREG?
+CGREG: 0,1
OK
AT+CPSI?
+CPSI: LTE NB-IOT,Online
OK
    
```

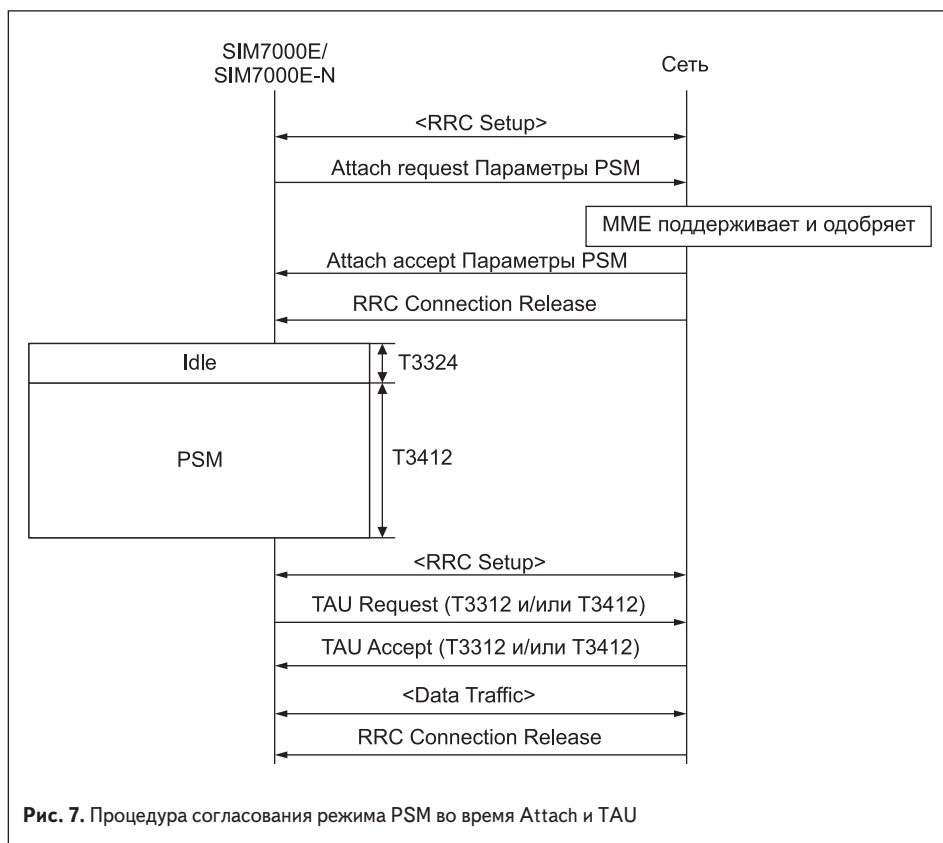


Рис. 7. Процедура согласования режима PSM во время Attach и TAU

```

AT+CPMSMS?
+CPMS: 1,,,"00001110","00001111" // T3324 = 30 с
и T3412 = 60 мин
OK
AT+CPMSMODE=1 // Включаем режим PSM
OK
AT+CPOWD=1 // Здесь перезагрузили модуль, чтобы
инициировать процедуру Attach при след. включении
NORMAL POWER DOWN
// В течение 30 с (inactivity, зависит от сети) произойдет
RRC Release, и включится таймер T3324 на 30 с. Затем,
по истечении таймера T3324, включится таймер T3412,
и модуль войдет в режим PSM на 60 мин, что подтверж-
дается трейс-логами на стороне оператора. Индика-
торы (выводы модуля) Netlight и STATUS переходят
в неактивное состояние. Теперь, чтобы передать данные,

```

модуль можно разбудить только по сигналу POWER KEY или «будильником» при помощи часов реального времени (Real Time Clock, RTC).

Итак, на практике мы убедились, что сеть NB-IoT вполне может служить транспортной средой для обмена данными с удаленным сервером взамен классической сети GSM/GPRS. Также мы удостоверились в готовности и работе новых режимов энергосбережения eDRX и PSM. Эти два режима не могут остаться незамеченными в среде профессиональных разработчиков M2M-оборудования. Режимы eDRX и PSM очень скоро найдут практическое применение в устройствах, где требуются одновременно и связь со внешним миром,

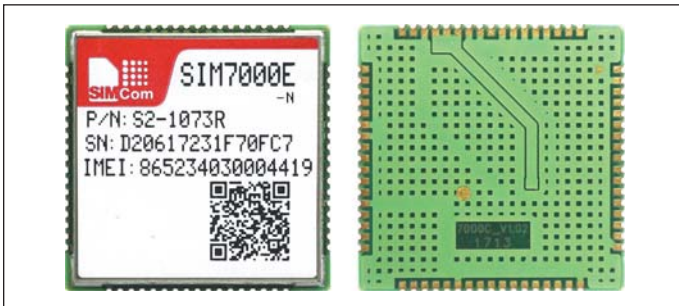
и сверхнизкое потребление тока, что раньше считалось взаимоисключающими факторами. Теперь, с появлением NB-IoT и eMTC, это стало возможным. ■

## Литература

1. [www.3gpp.org/release-13](http://www.3gpp.org/release-13)
2. Nokia\_LTE\_Evolution\_for\_IoT\_Connectivity\_White\_Paper\_EN
3. SIM800F\_SIM900\_SIM5300E\_Migration\_to\_SIM7000\_Application\_Note\_V1.00, инструкция по применению.
4. Батуев Б. Б. Embedded AT: начало работы с технологией интеграции пользовательского ПО в GSM/GPRS-модуль SIM800/SIM800H // Беспроводные технологии. 2014. № 4.

## НОВОСТИ

### LTE-модули Cat NB1, Cat. 1, Cat. 4 от SIMCom Wireless Solutions



Компания SIMCom Wireless Solutions анонсирует выпуск сразу нескольких модулей стандарта LTE различных категорий.

LPWA-модуль SIM7000E-N, являясь оптимизированной версией модуля SIM7000E (LTE Cat. NB1, Cat. M1 и GSM/EDGE), ориентирован исключительно на IoT-приложения и поэтому предназначен только для режима NB-IoT. Модуль поддерживает российские частоты LTE: B3/B8/B20. SIM7600E — LTE-модуль Cat. 1, действует не только на частотах FDD-LTE B1/3/5/7/8/20, но и на TDD-LTE B38/40/41. Важной особенностью является поддержка функции open Linux, которая позволит разработчикам использовать собственные утилиты под Linux.

SIM7600E-H — старшая версия модуля SIM7600E, поддерживающая высокие скорости передачи данных, соответствующие LTE Cat. 4: скачивание 150 Мбит/с, выгрузка 50 Мбит/с. При отсутствии покрытия LTE-сети модули SIM7600E/E-H также поддерживают работу в UMTS/HSPA/HSPA+ и GSM/GPRS/EDGE.

Дополненная продуктовая линейка предоставляет широкий выбор и возможность использовать оптимальный для решения конкретной задачи модуль LTE.

[www.sim.com](http://www.sim.com)

# LTE NB-IoT и CAT-M1(eMTC) SIM7000E



- FDD-LTE: B3/B8/B20
- GPRS/EDGE: 900/1800 МГц
- ГЛОНАСС, GPS, BeiDou/Compass, Galileo, QZSS
- 1×USB2.0 (high-speed), 2×UART, 1×SIM-карта 3,0 В / 1,8 В, 1×I2C, 5×GPIO, 1×ADC

### LTE CAT-M1(eMTC)

до 375 кбит/с «вверх»  
до 300 кбит/с «вниз»

### EDGE Class

до 236,8 кбит/с «вверх» и «вниз»

### NB-IoT

до 66 кбит/с «вверх»  
до 34 кбит/с «вниз»

### GPRS

до 85,6 кбит/с «вверх» и «вниз»



БЕСПЛАТНЫЕ ОБРАЗЦЫ



[www.macrogroup.ru](http://www.macrogroup.ru)

«Макро Групп» – официальный дистрибьютор  
Санкт-Петербург, ул. Свеаборгская, дом 12  
тел.: (812) 370-60-70 e-mail: [wireless@macrogroup.ru](mailto:wireless@macrogroup.ru)

# Модуль SIM868E:

## обзор новых возможностей комбинированного решения

Продуктовая линейка компании SIMCom Wireless Solutions, ведущего производителя OEM-модулей стандартов GSM, 3G, LTE, GPS/ГЛОНАСС, пополнилась комбинированным решением, совмещающим функции модуля сотовой связи и навигации (GSM+GNSS), — SIM868. Сочетание компактных размеров, малого энергопотребления, а также наличие Bluetooth сделало данный модуль популярным решением для применений, где требуется объединенный функционал и низкая себестоимость. Однако рынок постоянно предъявляет новые требования к M2M-оборудованию, поэтому, как продолжение серии комбинированных решений, был выпущен SIM868E — GSM-модуль со встроенной навигацией и поддержкой Bluetooth Low Energy (BLE). В статье рассмотрены ключевые особенности данного решения, а также практические аспекты его применения, которые будут полезны специалистам и разработчикам устройств транспортной и промышленной телеметрии, систем охраны, автоматизации и передачи данных.

Дмитрий Новинский  
novinsky.d@mt-system.ru

### Введение

Комбинированные модули, совмещающие в себе сразу несколько технологий, нашли широкое применение в различных M2M-устройствах. Долгое время функционал, не связанный с передачей данных по сетям сотовой связи, был вторичным для GSM-модулей: к примеру, качество встроенной в чипсет навигации зачастую уступало дискретным решениям. Аналогичная ситуация наблюдалась и с другими интегрированными технологиями. Только недавно у производителей появилась возможность объединять на одной подложке сразу несколько отдельных чипсетов. Таким образом, на основе комбимодулей могут быть реализованы компактные и бюджетные решения с низким энергопотреблением, без ущерба функционалу и качеству работы. Одним из таких all-in-one решений и является SIM868E.

### Возможности и отличительные особенности SIM868E

SIM868E (рис. 1) — самый миниатюрный четырехдиапазонный GSM/GPRS-модуль с поддержкой спутниковой навигации в системах GPS/ГЛОНАСС, а также технологии Bluetooth (BR/EDR и BLE), реализованной на уровне чипсета.

Модуль полностью совместим с ранее вышедшим SIM868 — по форм-фактору, назначению контактных площадок, а также программной части (AT-командам). Поэтому, как и предшественник, он обладает высокой чувствительностью ВЧ-тракта, компактными размерами (15,7×17,6 мм, LCC), наличием широкого функционала: встроенные стеки (TCP/IP, UDP/IP), работа с различными протоколами (SMTP, MMS, FTP, HTTP, SSL), DTMF, работа с аудиофайлами, SD-картами и т. д.

GNSS-функционал модуля обладает лучшим в своем классе сочетанием времени первого определения местоположения (TTFF) и чувствительности (до -165 дБм), а дополнительный малошумящий усилитель позволяет отказаться от использования внешнего.

Учитывая полную совместимость модулей SIM868 и SIM868E, в данной статье не будут рассматриваться общие моменты касательно режимов работы, питания, интерфейсов и т. д. Они были подробно изложены в [3] и также применимы к модулю SIM868E.

### Спутниковая навигация в SIM868E

Как было отмечено в [3], GSM и навигационные части модулей SIM868 и SIM868E имеют отдельные шины питания. Это связано

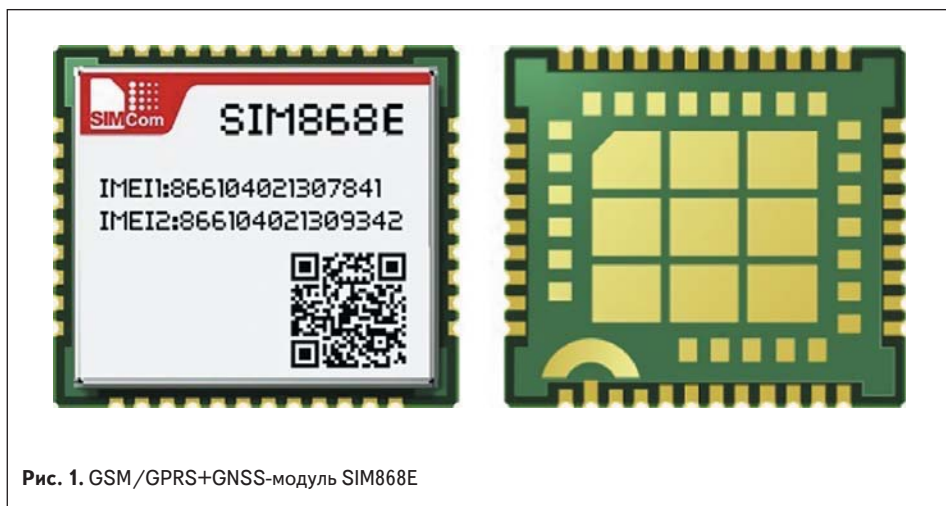


Рис. 1. GSM/GPRS+GNSS-модуль SIM868E

с тем, что внутри модуля они независимы друг от друга. Поэтому возможны два режима работы:

- независимый, когда работа с GSM ведется через UART1 (UART2), а с навигационной частью — через GNSS\_UART;
- совместный (All-in-One), когда весь обмен информацией и управление, в т. ч. GNSS-частью, ведется через UART1 GSM-части.

Первый режим фактически является аналогом работы с дискретными модулями сотовой связи и навигации. При таком способе организации работа ведется по различным последовательным портам: UART1 и UART2 (опционально) используются для AT-команд, GNSS\_UART — выдача NMEA-данных, а также обработка PMTK- и PSIM-команд.

Чтобы реализовать второй режим, потребуется внести ряд изменений в плату:

- соединить UART2 GSM-части с GNSS\_UART для обмена данными;
- соединить выводы GPIO1 и GNSS\_EN через резистор 10 кОм для управления включением/выключением навигации.

Схема для обеспечения All-in-One представлена на рис. 2.

Кроме описанных выше возможностей, при работе с модулем в совместном режиме появляется возможность обновлять программное обеспечение (ПО) навигационной и GSM-частей одновременно с помощью USB, загружать EPO (таблицы аппроксимированных эфемерид) и управлять GNSS-частью [4] через основной UART.

Все управление в режиме All-in-One происходит с помощью AT-команд, пример работы с основными из них:

```
AT+CGNSPWR=1 // Включение навигационной части
OK
AT+CGNSINF // Получение данных из последнего NMEA-пакета
+CGNSINF: 1,1,20170821151419.000,59.897274,30.252513,16.902,0.00,275.4,2,,1.9,2.1,0.9,,9
,10,,45,, // Выдаются основные параметры — статус GNSS, определены ли местоположе-
ние, время, координаты, скорость, количество спутников и т. д.
AT+CGNSURC=5 // Автоматическая выдача URC-сообщений с навигационными данными,
параметр команды отвечает за частоту появления соответствующих сообщений
OK
+UGNSINF: 1,1,20170821151443.000,59.897274,30.252513,16.902,0.00,275.4,2,,1.9,2.1,0.9
,11,10,,47,,
AT+CGNSURC=0 // Отключение
AT+CGNSTST=1 // Команда для вывода NMEA-данных напрямую
OK
$GNGGA,...
$GPGSA,...
...
AT+CGNSTST=0
AT+CGNSCMD=",$PMTK605*31" // Отправка PMTK-команд, в данном случае — холод-
ный старт
OK
```

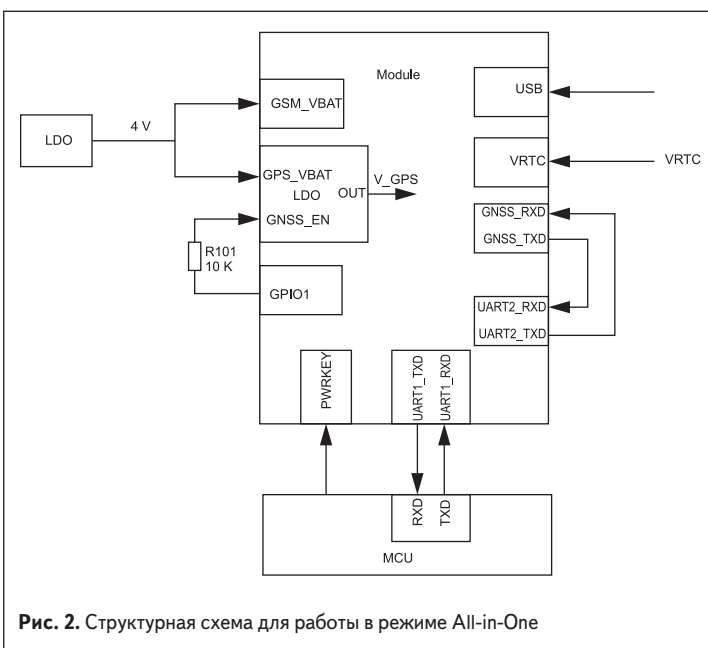


Рис. 2. Структурная схема для работы в режиме All-in-One

## RAIM

Новой функцией, введенной во все навигационные (линейка SIM68x, SIM33ELA), а также комбинированные (SIM868E и SIM868) решения SIMCom Wireless Solutions, стал автономный контроль целостности приемника (Receiver Autonomous Integrity Monitoring, RAIM). Принцип его работы основан на том, что, когда навигационному приемнику доступно больше спутников, чем необходимо для вычисления местоположения (т. е. информация избыточна), полученные дополнительные псевдоизмерения используются для оценки целостности навигационных сигналов. Если в процессе работы были обнаружены измерения, несовместимые с рассчитанными координатами позиции, они исключаются из расчета навигационного решения, при этом модуль продолжает работу без прерывания.

Технология RAIM является обязательным требованием для систем, где важно обеспечить надлежащий уровень безопасности, например в терминалах системы «ЭРА-ГЛОНАСС», для которых его наличие является обязательным требованием [5].

Факт срабатывания RAIM отражен в пакете \$--GBS, имеющем формат

$$\text{\$--GBS,m1,f2,f3,f4,d5,f6,f7,f8*cc,}$$

где: m1 — время UTC соответствующего связанного GGA-сообщения; f2–f4 — ожидаемые ошибки в определении широты, долготы, высоты над уровнем моря, [м]; d5 — ID не валидного спутника; f6–f8 — оценки смещения.

Наличие RAIM будет также интересно и для более традиционных применений, т. к. при его работе повышается надежность данных, выдаваемых модулем.

## Bluetooth 3.0 vs 4.0

Стандарт Bluetooth 4.0 (Bluetooth Core Specification [6]) определяет две основные технологии передачи данных: Bluetooth BR/EDR и Bluetooth Smart. Первая технология получила широкое распространение в устройствах общего применения, где требуется большая скорость и/или потоковая передача данных. Вторая (также известная как Bluetooth Low Energy), наоборот, была специально разработана для решений на батарейном питании, таких как датчики, мониторы сердечного ритма и т. п., где передаются данные на небольшой скорости с большим временем «сна» между сеансами передачи для экономии заряда.

К основным отличиям технологий можно отнести:

1. Физический канал. В BR/EDR используются 79 каналов в диапазоне 2400–2483,5 МГц. В случае Bluetooth Smart — 40 каналов в том же частотном диапазоне, при этом каналы 37, 38 и 39 являются рекламными, т. е. используются для синхронизации (рис. 3).
2. Энергопотребление. Основная особенность BLE заключается в том, что пользователь может гибко настроить приложение, чтобы управлять интервалами выхода на связь, тем самым позволяя конечному устройству работать месяцами и даже годами от обычной батарейки таблеточного типа.
3. Топология сети. BR/EDR поддерживает Piconet, которая является топологией «звезда»: к одному ведущему устройству (Master) подключаются подчиненные (Slave). Также возможна реализация, когда одно и то же устройство может выступать в двух ролях (Master/Slave) в разных сетях Piconet, используя временное разделение (Scatternet). Структура таких сетей показана на рис. 4. В случае BLE устройство поддерживает т. н. «двойной режим». Оно может одновременно выступать как в роли центрального устройства (инициализация установки соединения), так и в роли периферийного (которое принимает эти запросы).
4. Разработка. Технология Bluetooth Smart является более гибкой с точки зрения разработчика, т. к. кроме профилей, определенных Bluetooth SIG, есть возможность создавать собственные, подстраивая устройство под конкретную задачу.
5. Образование пары. Образование пары — обязательный процесс для взаимодействия BR/EDR-устройств, но в случае BT Smart процесс становится опциональным и может не использоваться для простых приложений.

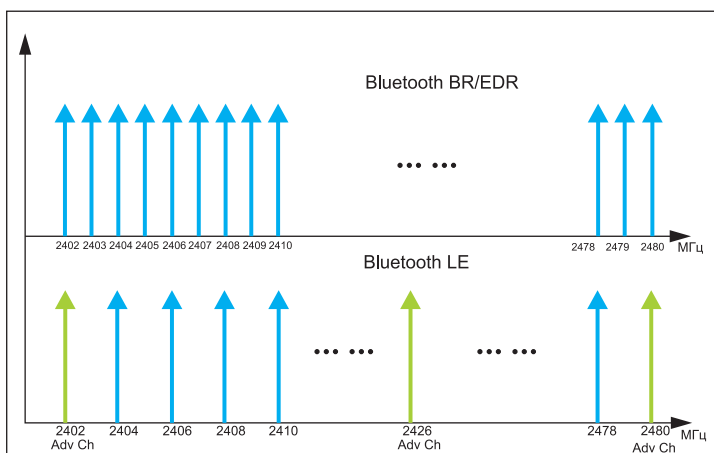


Рис. 3. Частотное распределение каналов для Bluetooth

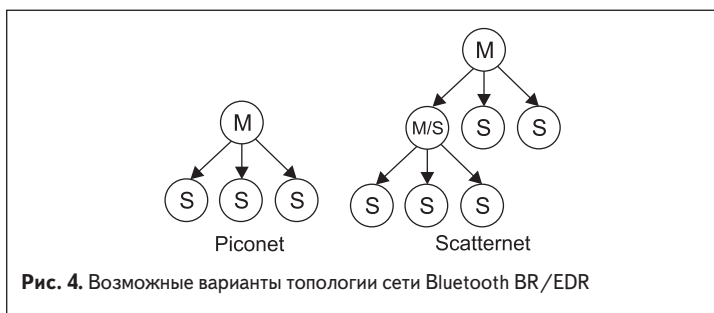


Рис. 4. Возможные варианты топологии сети Bluetooth BR/EDR

6. Пропускная способность: максимальная пропускная способность BT Smart составляет 1 Мбит/с, но зависит от конкретного режима работы. Максимум для BR/EDR — более 2 Мбит/с, что позволяет использовать такие устройства для передачи аудио высокого качества или других типов потоковых данных, где требуется большая пропускная способность.
7. Профили. Основной профиль для BLE — GATT (Generic Attribute), на нем базируются другие профили. Для BR/EDR существует множество профилей, определенных Bluetooth SIG, и не все из них имеют аналог для Bluetooth Smart, среди них: HFP (профиль для подключения гарнитуры), A2DP (передача аудио), OBEX (обмен объектами), VDP (передача видео) и FTP (передача файлов). Однако работы в данном направлении ведутся, и возможно, со временем их удастся реализовать для BLE.

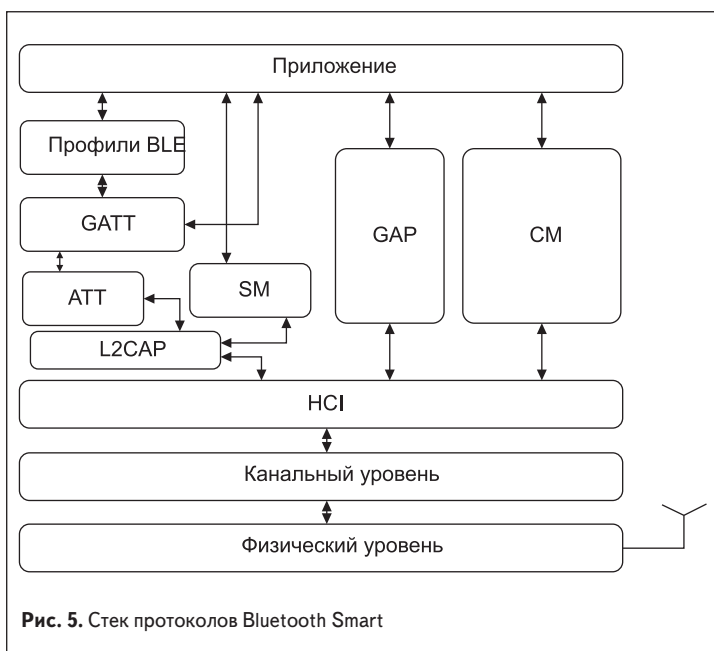


Рис. 5. Стек протоколов Bluetooth Smart

Комбинированный модуль SIM868E объединяет в себе обе технологии — Bluetooth BR/EDR и SMART, поэтому является устройством Bluetooth Smart Ready (в отличие от BR/EDR, которым являлся SIM868 и остальная линейка SIM800x).

Внутри модуля реализованы два стека для работы с соответствующими технологиями, что позволяет использовать преимущества каждой из них. Работа со стеком Bluetooth BR/EDR была подробно описана в [7] и аналогична для всех модулей SIMCom Wireless Solutions SIM800x/SIM868x. Поэтому в данной статье рассмотрим особенности работы со стеком Bluetooth Smart (BLE).

### Стек BLE в модуле SIM868E

Преимущества технологии Bluetooth Smart, описанные выше, могут быть использованы в конечных M2M-устройствах для различных целей: обмена данными, считывания параметров, оповещения о различных событиях и т. д.

Рассмотрим организацию стека BLE (рис. 5). Уровень приложения — самый высокий уровень стека протоколов; CM, GATT (профиль общих атрибутов) и ATT (профиль общих атрибутов) используются для обнаружения сервисов; GAP (профиль общего доступа) используется для обнаружения устройства и установки соединения; SM (менеджер безопасности) отвечает за установку пары и обмен ключами, а также предоставляет функции криптографии; L2CAP (протокол логического соединения и адаптации) обеспечивает обмен данными, направляя их в протоколы верхнего уровня (SM, ATT); отвечает за мультиплексирование и разбивку данных на более мелкие сегменты для отправки в канальный уровень и обратные операции; HCI — хост-интерфейс для обмена между хостом и контроллером.

Если говорить непосредственно о профилях BLE, то они также имеют несколько уровней:

- Верхний уровень — профиль GATT (сервер). В себе он может содержать ряд сервисов [8]. Как пример — Link Loss, который определяет поведение при разрыве соединения.
- Каждый из сервисов содержит в себе ряд характеристик, содержащих информацию. Для упомянутого выше Link Loss характеристикой является Alert Level, определяющий, какой уровень тревоги получает устройство при потере связи. При этом информация из характеристик может быть закрыта, и для клиентского устройства потребуется разрешение со стороны сервера.

Команды для работы с BLE-стеком описаны в [9]. Для примера рассмотрим работу модуля SIM868E с использованием различных профилей. Для наглядности в качестве клиентского устройства используется мобильное приложение.

### Встроенные профили BLE

Стандарт Bluetooth в части BLE не только позволяет создавать собственные профили на основе GATT, но также определяет ряд стандартных [10], со строго определенными сервисами и характеристиками. Так как требования к ним стандартизированы, SIMCom Wireless Solutions реализовала наиболее востребованные, для более простого использования, без необходимости задания всех параметров пользователем. Рассмотрим основные из них.

#### Find Me Profile (FMP)

Данный профиль определяет поведение устройства при нажатии кнопки на спаренном клиентском устройстве. Из названия становится понятным его основное назначение: обнаружение устройства, которое было утеряно.

```

AT+BTPOWER=1 // Включение Bluetooth
OK
AT+BLEADDR? // Информация о MAC-адресе устройства
+BLEADDR: 0,d2:fe:e6:1b:14:f4
OK
AT+BLEFMP=1 // Активация профиля FMP
OK
+BLEFMPCON: 1,4b:7b:b8:e2:64:aa // Уведомление о присоединенном устройстве
    
```

Теперь рассмотрим работу со стороны клиентского устройства:



GENERIC ACCESS	
0x1800 PRIMARY SERVICE	
DEVICE NAME	R
UUID: 00002A00-0000-1000-8000-00805F9B34FB Properties: READ	
APPEARANCE	R
UUID: 00002A01-0000-1000-8000-00805F9B34FB Properties: READ	
GENERIC ATTRIBUTE	
0x1801 PRIMARY SERVICE	
IMMEDIATE ALERT	
0x1802 PRIMARY SERVICE	
ALERT LEVEL	W
UUID: 00002A06-0000-1000-8000-00805F9B34FB Properties: WRITE_NO_RESPONSE Write Type: WRITE REQUEST	

При соединении с устройством мы видим все задействованные профили и сервисы. Сервис, с которым возможна непосредственная работа, — **IMMEDIATE ALERT**, он имеет одну характеристику, **ALERT LEVEL**. Свойство **WRITE\_NO\_RESPONSE** означает, что возможно изменить значение характеристики без подтверждения со стороны сервера (SIM868E). Сама характеристика может принимать три значения: **No Alert/Mild Alert/High Alert**. При задании одной из них модуль сразу фиксирует изменения. То есть этот профиль может быть использован для быстрого оповещения, вызывая необходимую реакцию со стороны устройства, где установлен SIM868E:

```
+BLEFMPWREQ: 4b:7b:b8:e2:64:aa,0 // «0» — No Alert
+BLEFMPWREQ: 4b:7b:b8:e2:64:aa,1 // «1» — Mild Alert
+BLEFMPWREQ: 4b:7b:b8:e2:64:aa,2 // «2» — High Alert
+BLEFMPCON: 0,4b:7b:b8:e2:64:aa // Уведомление о разрыве соединения
AT+BLEFMP=0 // Деактивация профиля FMP
OK
```

### Proximity (PXP)

Данный профиль определяет поведение устройства, которое удаляется от сопряженного, с реакцией на разрыв соединения. Этот профиль может быть использован для задания поведения при потере связи — например, заблокировать устройство, которое более не используется.

```
AT+BTPOWER=1 // Включение Bluetooth
OK
AT+BLEPXP=1 // Активация PXP-профиля
OK
+BLEPXPON: 1,50:70:d1:2d:32:cf // Уведомление о присоединенном устройстве
```

На стороне клиента профиль представлен следующими сервисами:

LINK LOSS	
0x1803 PRIMARY SERVICE	
ALERT LEVEL	R W
UUID: 00002A06-0000-1000-8000-00805F9B34FB Properties: READ, WRITE Write Type: WRITE REQUEST	
TX POWER	
0x1804 PRIMARY SERVICE	
TX POWER LEVEL	R
UUID: 00002A07-0000-1000-8000-00805F9B34FB Properties: READ Hex: 0xF6	
IMMEDIATE ALERT	
0x1802 PRIMARY SERVICE	
ALERT LEVEL	W
UUID: 00002A06-0000-1000-8000-00805F9B34FB	

Сервис **TX POWER** может быть использован для считывания уровня сигнала. Это позволит определить факт увеличения расстояния между

устройствами и с помощью **IMMEDIATE ALERT** послать мгновенное оповещение об этом событии. Сервис **LINK LOSS** определяет уровень тревоги со стороны сервера при разрыве.

```
+BLEPXPPLAT: 47:f9:d7:9c:e5:62,0
+BLEPXPPLAT: 47:f9:d7:9c:e5:62,1
+BLEPXPPLAT: 47:f9:d7:9c:e5:62,2 // URC, связанные с сервисом IMMEDIATE ALERT
(мгновенные оповещения)
+BLEPXPDISAT: 50:70:d1:2d:32:cf,1 // URC при разрыве соединения, перед этим характеристика в сервисе LINK LOSS была установлена в «1» — Mild Alert
AT+BLEPXP=0 // Деактивация PXP-профиля
OK
```

### SPP BLE

Этот профиль не определен Bluetooth SIG, но был добавлен для обеспечения простого способа обмена данными.

```
AT+BTPOWER=1 // Включение Bluetooth
OK
AT+BLESP=1 // Активация профиля SPP
OK
+BLESPCON: 1,62:20:d8:3f:af:e3 // Уведомление о присоединенном устройстве
```

В данном профиле сервис для работы один, и он пользовательский (Custom), т. е. не определен Bluetooth SIG:

CUSTOM SERVICE	
00004300-0000-1000-8000-00805F9B34FB PRIMARY SERVICE	
CUSTOM CHARACTERISTIC	W
UUID: 00004400-0000-1000-8000-00805F9B34FB Properties: WRITE_NO_RESPONSE Write Type: WRITE REQUEST	
CUSTOM CHARACTERISTIC	N
UUID: 00004401-0000-1000-8000-00805F9B34FB Properties: NOTIFY	
<b>Descriptors:</b>	
Client Characteristic Configuration UUID: 0x2902	R

Сервис имеет две характеристики — для отправки данных на сервер (W) и считывания (R). Обмен ведется в HEX-формате.

```
+BLESPPW: 62:20:d8:3f:af:e3,74657374 // Отправляем test в модуль, задавая значение для данной характеристики
AT+BLESPPN="74657374" // Команда задает значения характеристики, с которой ведется считывание
OK
```

На клиентском устройстве включен параметр **Notify**, поэтому измененное значение сразу отображается (поле hex):

CUSTOM CHARACTERISTIC	
UUID: 00004401-0000-1000-8000-00805F9B34FB Properties: NOTIFY Value: test Hex: 0x74657374	N
<b>Descriptors:</b>	
Client Characteristic Configuration UUID: 0x2902 Notifications enabled	R
+BLESPPCON: 0,62:20:d8:3f:af:e3 // Уведомление о разрыве соединения AT+BLESP=0 // Деактивация профиля SPP OK	

## Создание пользовательского профиля и управление соединением

Одной из ключевых особенностей технологии BLE является возможность реализации пользовательских профилей на основе GATT. Для примера будет реализован пользовательский профиль, позволяющий обмениваться данными с подтверждением на серверной стороне.

```

AT+BTPOWER=1 // Включение Bluetooth
OK
AT+BLEADDR? // Информация о MAC-адресе устройства
+BLEADDR: 0,d2:fe:e6:1b:14:f4
OK
AT+BLESREG // Регистрируем GATT-сервер, в этот же момент начинается процесс рекла-
мы (advertising), и устройство становится видимым
+BLESREG: 1,ABCDEFF0 // «1» — ID, ABCDEFF0 — имя
OK
AT+BLESAD=1,"73657276696365",15,1,1 // Добавляем сервис, в данном примере: «1» —
ID сервера, «736..5» — имя, «15» — количество идентификаторов сервиса, «1» — ID
сервиса, «1» — идентификатор сервиса. Одному и тому же UUID могут быть присвоены
сразу несколько сервисов, и данные параметры позволяют их разграничить (аналогичная
ситуация и с характеристиками внутри сервисов)
+BLESAD: 1,ABCDEFF0,73657276696365,1,1,256 // Сервис успешно создан, «1» — ID сервиса
OK
AT+BLESSEC=1,"6368617231",1,10,17 // Добавляем характеристику сервису: «1» — ID сер-
виса, «636...1» — UUID характеристики, «1» — ID характеристики, «10» — значения данной
характеристики (в приведенном примере — чтение и запись, подробнее см. [9]), 17 —
доступ (чтение и запись с подтверждением [10])
+BLESSEC: 1,ABCDEFF0,256,6368617231,1,258 // Характеристика успешно добавлена
OK
AT+BLESSEC=1,"6368617231",1,16,17 // Добавляем еще одну характеристику — Notify
(оповещение)
+BLESSEC: 2,ABCDEFF0,256,6368617231,1,260 // Характеристика успешно добавлена
OK
AT+BLESSEC=1,"0000",1,0 // Добавим дескриптор к сервису
+BLESSEC: 1,ABCDEFF0,256,6F6E65,1,261
OK
AT+BLESSTART=1,0 // Команда для запуска сервера, «1» — ID, «0» — транспортный
уровень (LE)
+BLESSTART: 1,ABCDEFF0,256 // Сервер успешно создан
OK
+BLESSEC: 1,ABCDEFF0,7d:18:3a:e5:d8:36,1 // Уведомление о подключении

```

На клиентской стороне созданный профиль представлен следую-щими сервисами:

CUSTOM SERVICE	
00000000-0000-0000-0065-636976726573	PRIMARY SERVICE
CUSTOM CHARACTERISTIC	<span>R</span> <span>W</span>
UUID: 00000000-0000-0000-0000-003172616863	Properties: READ, WRITE
	Write Type: WRITE REQUEST
CUSTOM CHARACTERISTIC	<span>N</span>
UUID: 00000000-0000-0000-0000-003172616863	Properties: NOTIFY
<b>Descriptors:</b>	
UNKNOWN	<span>R</span>
UUID: 0x0000	

```

+BLESREQ: ABCDEFF0,1,17,7d:18:3a:e5:d8:36,258,0,0 // Запрос на чтение характеристики
AT+BLESRSP=0,AABB // Присваиваем значение
+BLESRSP: 0,ABCDEFF0,1,258 // Успешно присвоено, в клиентском устройстве оно от-
бражается в поле hex
OK

```

```

CUSTOM CHARACTERISTIC R W
UUID: 00000000-0000-0000-0000-003172616863
Properties: READ, WRITE
Hex: 0xAABB
Write Type: WRITE REQUEST

```

```

+BLESREQ: ABCDEFF0,1,18,7d:18:3a:e5:d8:36,258,42424141,1,0,0 // Запрос на запись
параметра

```

```

AT+BLESRSP = 1 // Разрешение на перезапись
+BLESRSP: 0,ABCDEFF0,1,258 // Успешно, поле hex изменило свое значение
OK

```

```

CUSTOM CHARACTERISTIC R W
UUID: 00000000-0000-0000-0000-003172616863
Properties: READ, WRITE
Value: BBAA
Hex: 0x42424141
Write Type: WRITE REQUEST

```

```

+BLESSEC: 0,ABCDEFF0,4a:aa:10:fc:62:8d,1 // Уведомление о разъединении
AT+BLESSTATUS? // Статус всех активных профилей BLE
+BLESSTATUS: 1
+BLESSTATUS: 1,0,ABCDEFF0,53:2e:1e:af:9d:51
OK
AT+BLESDISCONN=1 // Разрываем соединение
+BLESSEC: 0,ABCDEFF0,53:2e:1e:af:9d:51,1
OK
AT+BLESSTOP=1 // Останавливаем процесс рекламы (advertising)
+BLESSTOP: 1,ABCDEFF0
AT+BLESSTATUS? // Статус всех активных профилей BLE
+BLESSTATUS: 1 // Соединение закрыто
OK
AT+BTPOWER=0 // Отключение Bluetooth
OK

```

## Заключение

Модуль SIM868E, выполненный на обновленном чипсете от MediaTek, предоставляет новые возможности для производителей M2M-оборудования. Поддержка технологий Bluetooth BR/EDR и Low Energy, улучшенная стабильность и качество работы навигационной части, наличие функционала RAIM делают его одним из самых доступных и востребованных решений для приложений, где требуются компактные размеры и широкий функционал. ■

## Литература

1. [www.simcomm2m.com](http://www.simcomm2m.com)
2. [www.mt-system.ru](http://www.mt-system.ru)
3. Стукало С. Модуль SIM868: функционал и практические аспекты использования // Беспроводные технологии. 2016. № 3.
4. [SIM800 Series GNSS Application Note](#)
5. ГОСТ 33464-2015 «Глобальная навигационная спутниковая система. Система экстренного реагирования при авариях. Устройство/система вызова экстренных оперативных служб. Общие технические требования».
6. [www.bluetooth.com](http://www.bluetooth.com)
7. Стукало С., Шпотак Л. Функционал Bluetooth в GSM-модулях серии SIM800x // Беспроводные технологии. 2016. № 2.
8. [www.bluetooth.com/specifications/gatt/services](http://www.bluetooth.com/specifications/gatt/services)
9. [SIM800 Series Bluetooth Application Note](#)
10. [www.bluetooth.com/specifications/gatt](http://www.bluetooth.com/specifications/gatt)

## НОВОСТИ

### Семейство модулей WLAN Front End от Microsemi



Корпорация Microsemi представляет линейку модулей Front End для IEEE802.11a/b/g/n/ac применений на частоты 2,4 и 5 ГГц. Front End модули WLAN (Wi-Fi) объединяют несколько устройств, необходимых для реализации ВЧ-интерфейса. Как правило, они содержат один или несколько усилителей мощности, согласованных по входу и выходу, переключатель,

а также один или несколько маломощных усилителей.

Области применения:

- ресиверы цифрового телевидения (set-top box);
- абонентские точки доступа (APs);
- сетевые шлюзы (gateway).

[www.ptelectronics.ru](http://www.ptelectronics.ru)

ЭЛЕКТРОНИКА  
КОМПОНЕНТЫ ОБОРУДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ

# ChipEXPO-2017

31.10 – 02.11

15-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА  
РОССИЯ • МОСКВА • ЭКСПОЦЕНТР

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:



МИНПРОМТОРГ  
РОССИИ



Ростех

РОСАТОМ

Департамент радиоэлектронной промышленности  
Министерства промышленности и торговли Российской Федерации  
Государственная Дума Федерального собрания Российской Федерации

Департамент науки, промышленной политики и  
предпринимательства города Москвы

Московская торгово-промышленная палата

ГК "Ростех"

ГК "Росатом"

[www.chipexpo.ru](http://www.chipexpo.ru)

# Совмещенные чип и модуль Bluetooth/Wi-Fi

## производства Espressif Systems

**В статье рассмотрены особенности совмещенных Bluetooth/Wi-Fi-чипов и модулей ESP32, а также основные характеристики, представленные в технической документации, опубликованной компанией Espressif Systems в 2017 г.**

Виктор Алексеев, к. ф.-м. н.  
victor.alexeev@gmail.com

### Структура чипа ESP32 и работа его основных блоков

Китайская фирма Espressif Systems Pte. Ltd. — это полупроводниковая фаблесс-компания с головным офисом в парке высоких технологий Шанхая (Shanghai Zhangjiang High-Tech Park, КНР), хорошо известная во всем мире как один из ведущих производителей простых, бюджетных чипов Bluetooth и Wi-Fi, а также модулей и отладочных комплектов, созданных на базе этих чипов. Фирма не имеет собственных производственных мощностей и производит свою продукцию под торговой маркой Espressif на OEM-предприятиях, например Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC). На российском рынке официальной поставкой и технической поддержкой занимается компания «Макро Групп».

Последняя разработка Espressif, поступившая в массовую продажу в конце 2016 г., представляет собой однокристалльный совмещенный Wi-Fi/Bluetooth-чип ESP32. Он изготовлен на заводе TSMC с использованием технологии 40 нм. Доступные для заказа модели ESP32 (по данным на 10.08.2017) перечислены в таблице 1.

Благодаря двухъядерному процессору, высокой степени интеграции, поддержке интерфейсов SPI, SDIO, I<sup>2</sup>C, I<sup>2</sup>S, UART, Ethernet, IrDA, программируемому усилителю мощности и другим уникальным свойствам, на базе чипов серии ESP32 можно с минимальными затратами создавать законченные, полностью готовые Bluetooth/Wi-Fi-устройства для самых различных приложений.

Общие технические характеристики чипов серии ESP32 приведены в таблице 2. Далее будут даны пояснения к этой таблице.

Небольшие размеры и расширенные режимы энергосбережения позволяют использовать чипы серии ESP32 в миниатюрных устройствах с батарейным питанием, а также в некоторых сегментах IoT, таких, например, как «умный дом», охранные системы и т. д. В серию чипов ESP32 входят модели ESP32-D0WDQ6, ESP32-D0WD, ESP32-D2WD, ESP32-S0WD.

В последней версии технической документации на ESP32 (V1.7) [1] отмечается, что в августе 2017 г. для заказа доступны модели, перечисленные в таблице 1.

Пример маркировки на корпусе чипа серии ESP32 показан на рис. 1. Приведем расшифровку символов. Первый означает ядро: «D» — Dual Core, «S» — Single Core. Второй относится к памяти: «0» — нет встроенной Flash-памяти, «2» — встроенная Flash-память 16 Мбит. Третий и четвертый символы определяют стандарты Wi-Fi и Bluetooth: «WD» — Wi-Fi b/g/n + BT/BLE Dual Mode; «AD» — Wi-Fi a/b/g/n + BT/BLE Dual Mode; «CD» — Wi-Fi ac/c/b/n/g + BT/BLE Dual Mode. Пятый и шестой символы



Рис. 1. Пример маркировки на корпусе чипа серии ESP32

Таблица 1. Доступные для заказа модели ESP32

ESP32-D0WDQ6	Dual core	No embedded flash	Wi-Fi b/g/n + BT/BLE Dual Mode	QFN 6*6
ESP32-D0WD	Dual core	No embedded flash	Wi-Fi b/g/n + BT/BLE Dual Mode	QFN 5*5
ESP32-D2WD	Dual core	16-Mbit embedded flash	Wi-Fi b/g/n + BT/BLE Dual Mode	QFN 5*5
ESP32-S0WD	Single core	No embedded flash	Wi-Fi b/g/n + BT/BLE Dual Mode	QFN 5*5

обозначают конструктив: «Q6» — QFN 6×6, отсутствие символов — QFN 5×5.

Обсудить все технические детали и характеристики чипа ESP32 в данной статье не представляется возможным. Их подробное описание можно найти в документах, которые доступны свободно на сайте Espressif [1]. Мы рассмотрим только общие принципы работы основных его блоков. На рис. 2 показана структурная схема ESP32 [2]. Каналы Wi-Fi и Bluetooth выполнены в виде отдельных аппаратных блоков, работающих под управлением конфигурируемых процессоров Xtensa производства фирмы Tensilica.

Радиочастотный блок чипов ESP32 (рис. 2) содержит следующие элементы:

- приемник 2,4 ГГц;
- передатчик 2,4 ГГц;
- тактовый генератор;
- узлы локального электропитания;
- переключатель сбалансированных линий с согласованным импедансом.

В приемнике (RF receive) чипа ESP32 используется квадратурное преобразование исходного RF-сигнала на нулевую промежуточную частоту с дальнейшей цифровой обработкой. Предварительная селекция сигнала осуществляется полосовым фильтром. Смеситель трансформирует полезный сигнал на фиксированную промежуточную частоту. Далее, в низкочастотной области спектра, сигнал оцифровывается с помощью двух АЦП с высоким разрешением. В приемнике использованы аппаратные средства автоматического контроля усиления и смещения нуля АЦП, обеспечивающие прецизионную обработку принимаемых сигналов.

В передатчике (RF transmit) используется метод оцифровки с повышением частоты, в котором цифровой широкополосный сигнал конвертируется в цифровой сигнал промежуточной частоты. Конвертер ЦАП, на который поступает сигнал, преобразует цифровой сигнал в аналоговый и передает на выходной усилительный каскад. Высокооточный усилитель мощности обеспечивает линейность во всем диапазоне передаваемых частот.

Встроенные калибровочные схемы позволяют свести к минимуму искажения, обусловленные такими факторами, как смещение несущей частоты, рассогласование действительной и мнимой фаз сигнала, нелинейность в полосе частот, рассогласование антенны и др.

Тактовый генератор (Clock generator) вырабатывает квадратурные тактовые сигналы 2,4 ГГц, необходимые для работы приемника и передатчика чипа. Он содержит цепи калибровки и автоматического самоконтроля, разработанные и запатентованные Espressif Systems. Следует подчеркнуть, что все необходимые компоненты, обеспечивающие полноценную работу генератора, интегрированы в чип.

Микропроцессорный блок (Core and memory) содержит процессор и память (ROM, SRAM). Модель ESP32-S0WD имеет один микропроцессор. Остальные чипы серии ESP32 представляют собой двухъядерную систему с двумя микропроцессорами Harvard Architecture Xtensa 32 bit LX6. При этом один процессор можно использовать для работы в реальном времени,

Таблица 2. Общие технические характеристики чипов серии ESP32

Wi-Fi	802.11 b/g/n
Bluetooth	v4.2
Микропроцессор	2×240 МГц Tensilica LX6
ROM, кбайт	448
SRAM, кбайт	520
SRAM (RTC), кбайт	16
QSPI flash/SRAM, Мбайт	4×16
Напряжение питания, В	2,3–3,6
Антенна	PCB-антенна или IPEX-разъем для внешней антенны
Входы/выходы	34×GPIO
UART	3х
Ethernet	MAC-интерфейс с поддержкой DMA и IEEE 1588
SPI	4
I <sup>2</sup> S	2
АЦП, бит	12 (SAR до 18 каналов)
ЦАП, бит	2×8
I <sup>2</sup> C	2
SDIO	Master/Slave, 50 МГц
Поддержка SDIO	Хост-контроллер SD/SDIO/eMMC/
SDIO/SPI	1 Slave
IrDA	Модуль удаленного контроля RMT (Remote Control)
ШИМ	Модуль ШИМ для управления двигателем, контроллер LED_PWM
LED PWM	до 16 каналов
LNA	Низкошумящий аналоговый усилитель для работы с внешними датчиками
Магнитометр	Встроенный датчик Холла
Измерение температуры	Встроенный температурный датчик
Датчики касания	10 вводов для емкостных датчиков касания
RTC	Блок часов реального времени для управления режимами энергосбережения
Таймеры общего назначения	4 встроенных 64-разрядных
Сторожевые таймеры	3 встроенные, программируемые
Синхронизация CPU	Генератор 160 МГц
Синхронизация периферии	Тактовый генератор для периферии I <sup>2</sup> S, кварцевый генератор 8 МГц
Карты памяти	Поддержка интерфейса SD-card
Безопасность	WEP, WPA/WPA2 PSK/Enterprise
Криптографическое аппаратное ускорение	AES/SHA2/Elliptical Curve Cryptography/RSA-4096
OTP	1024 бит, в том числе 768 бит для прикладных задач
Максимальная выходная мощность Wi-Fi, дБм	19,5 (802.11b), 16,5 (802.11g), 15,5 дБм (802.11n)
Минимальная чувствительность приемника, дБм	-98
Энергопотребление в режиме глубокого сна, мкА	5
Диапазон рабочих температур, °C	-40...+125
Конструктив и габариты, мм	QFN 6×6, QFN 5×5

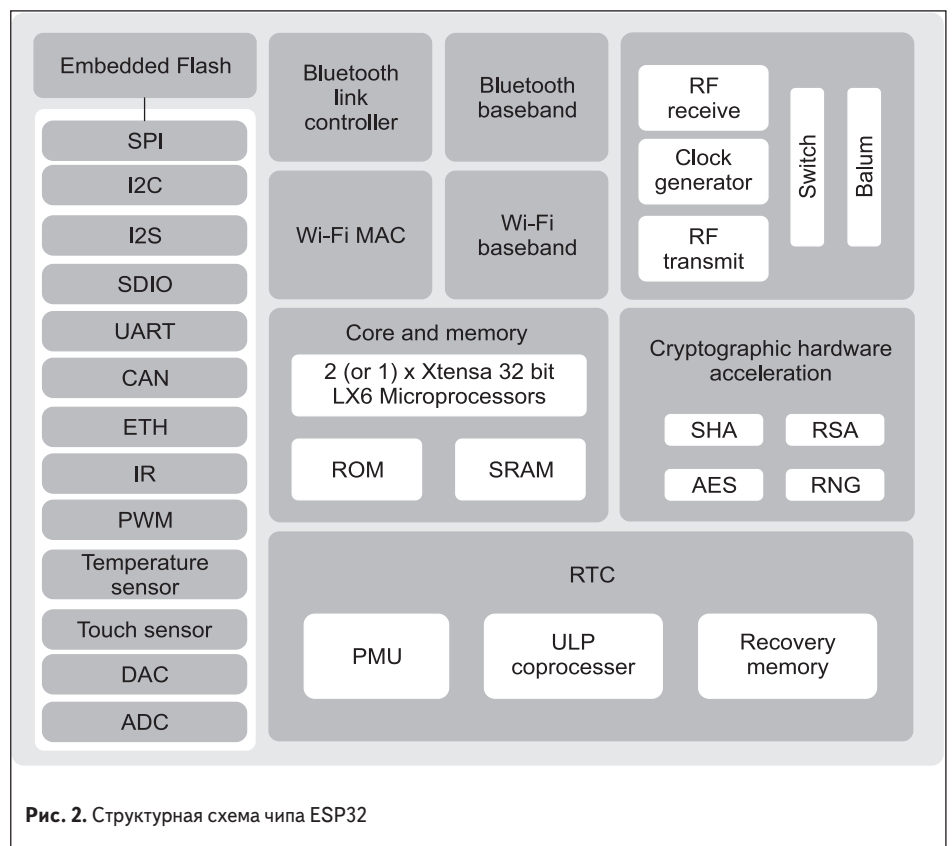


Рис. 2. Структурная схема чипа ESP32

а второму поручить обработку коммуникационных протоколов и приложений. Поэтому два процессора чипа ESP32 получили названия PRO\_CPU (protocol) и APP\_CPU (application). Каждый из двух процессоров Harvard Architecture Xtensa LX6 использует 32-битовую адресацию, которая дает возможность доступа к физическому адресному пространству объемом 4 Гбайт, общему для программ и данных. При этом адресные пространства симметричны между двумя процессорами. Для большинства простых задач, не требующих особого быстрогодействия, оба процессора являются взаимозаменяемыми. Чип ESP 32 может работать как в качестве центрального процессора с поддержкой Open CPU, так и в качестве подчиненного устройства в режиме slave device, которое управляется внешним микроконтроллером.

Процессор Harvard Architecture Xtensa 32 bit LX6 чипа ESP32 обладает следующими характеристиками:

- семиступенчатая конвейерная обработка с тактовой частотой до 240 МГц (160 МГц для модели ESP32-S0WD);
- производительность до 600 dmips;
- 16/24-битный набор инструкций, обеспечивающий высокую плотность кода;
- поддержка режима работы с плавающей точкой;
- поддержка DSP-команд, например 32-разрядный умножитель, 32-разрядный делитель, 40-разрядный MAC-адрес;
- поддержка 32 адресов обработчика прерываний из 70 источников;
- интерфейсы RAM/ROM Xtensa для инструкций и данных;
- интерфейс локальной памяти Xtensa для быстрого доступа к периферийному регистру;
- прерывание с внешними и внутренними источниками;

- отладочный интерфейс JTAG на выводах IO12, IO13, IO14, IO15, предназначенный для разработчиков ПО.

Применение в чипе ESP32 двух мощных микропроцессоров Xtensa позволяет использовать для его программирования множества различных архитектур. Так, например, специалисты Espressif адаптировали известный отладчик OpenOCD (Open On-Chip Debugger) с открытым исходным кодом для чипов ESP32 и написали дополнительные специальные утилиты, которых не было в исходном тексте этого ПО. Кроме того, Espressif применила многозадачную операционную систему реального времени FreeRTOS в микропроцессорной архитектуре нового чипа ESP32. На сайте Espressif представлено подробное описание базового программно-аппаратного обеспечения, предназначенного для отладки ESP32 с помощью OpenOCD, xtensa-esp32-elf-gdb и FreeRTOS.

Система FreeRTOS, поставляемая с отладочным комплектом ESP-IDF v2.0 [3], позволяет программировать одновременную работу двух процессоров, разделяя задачи по сложности и оперативности. Кроме собственных разработок Espressif, для программирования чипов ESP32 можно использовать такие известные программные приложения, как Mongoose OS, MicroPython, NodeMcu, Arduino, Platformio.org. Такой подход предоставляет пользователям ESP32 возможность создавать свои собственные приложения с применением GCC 5.2.0 и C++ в минимальные сроки и с минимальными затратами [4].

Структурная схема распределения памяти чипов ESP32 и ее взаимодействия с процессорами показана на рис. 3 [5].

Внутренняя память серии чипов ESP32 включает в себя:

- 448 кбайт ПЗУ (ROM, рис. 2) для загрузчика и основных функций;

- 520 кбайт СОЗУ (SRAM, рис. 2) для данных и инструкций;
- 8 кбайт SRAM в блоке RTC для работы с процессором в режиме «глубокого сна» (RTC SLOW Memory);
- 8 кбайт SRAM в блоке RTC для хранения данных и работы основного процессора во время загрузки при выходе из режима «глубокого сна» (RTC FAST Memory);
- 256 бит для системы (MAC-адрес и конфигурация микросхемы);
- 768 бит зарезервированы для клиентских приложений, включая Flash-Encryption и Chip-ID.

В серии ESP32 модель ESP32-D2WD имеет встроенную Flash-память объемом 16 Мбит, которая подключена через выводы GPIO16, GPIO17, SD\_CMD, SD\_CLK, SD\_DATA\_0 и SD\_DATA\_1. Другие модели этой серии в настоящее время не имеют встроенной Flash-памяти.

Кроме того, чипы ESP32 поддерживают до 16 Мбайт внешней QSPI Flash-памяти, а также SRAM с аппаратной защитой, использующей метод AES, предотвращающий несанкционированный доступ к программам и данным пользователя.

До 16 Мбайт внешней Flash-памяти могут быть использованы для работы с процессором при 16- и 32-разрядной адресации. До 8 Мбайт внешней Flash-памяти и SRAM можно использовать для 8-, 16-, 32-разрядной адресации. Чтение данных возможно как из Flash-памяти, так и из SRAM. Запись данных организована в память SRAM.

В качестве примера внешней памяти, совместимой с чипами серии ESP32, можно привести SPI Flash W25Q80NE производства Winbond. Эта память с питанием 1,2 В емкостью 8 Мбайт оптимально подходит для чипов ESP32 [6]. Встроенная память, внешняя память и периферийные устройства в серии ESP32 подключены к общей шине данных и шине команд процессора. При этом в двухъядерных чипах оба процессора используют одни и те же адреса для доступа к одной и той же памяти. Периферийные устройства чипа могут получать доступ к встроенной памяти также через DMA.

Блок Cryptographic hardware acceleration (рис. 2) поддерживает на аппаратном уровне ускорение следующих алгоритмов шифрования:

- симметричный Advanced Encryption Standard (AES FIPS PUB 197);
- безопасный хэширования Secure Hash Algorithm (SHA FIPS PUB 180-4);
- криптографический с открытым ключом (Rivest, Shamir, Adleman — RSA);
- генератор случайных чисел (Random Number Generator, RNG).

Блок аппаратного ускорения чипа ESP32 поддерживает независимую арифметику, например большое целочисленное умножение и большое целочисленное модульное умножение. Максимальная длина операции для RSA, ECC, Big Integer Multiply и Big Integer Modular Multiplication составляет 4096 бит. Аппаратное ускорение значительно улучшает время обработки и снижает сложность программного обеспечения. Кроме того, благодаря шифрованию кода и динамическому дешифрованию

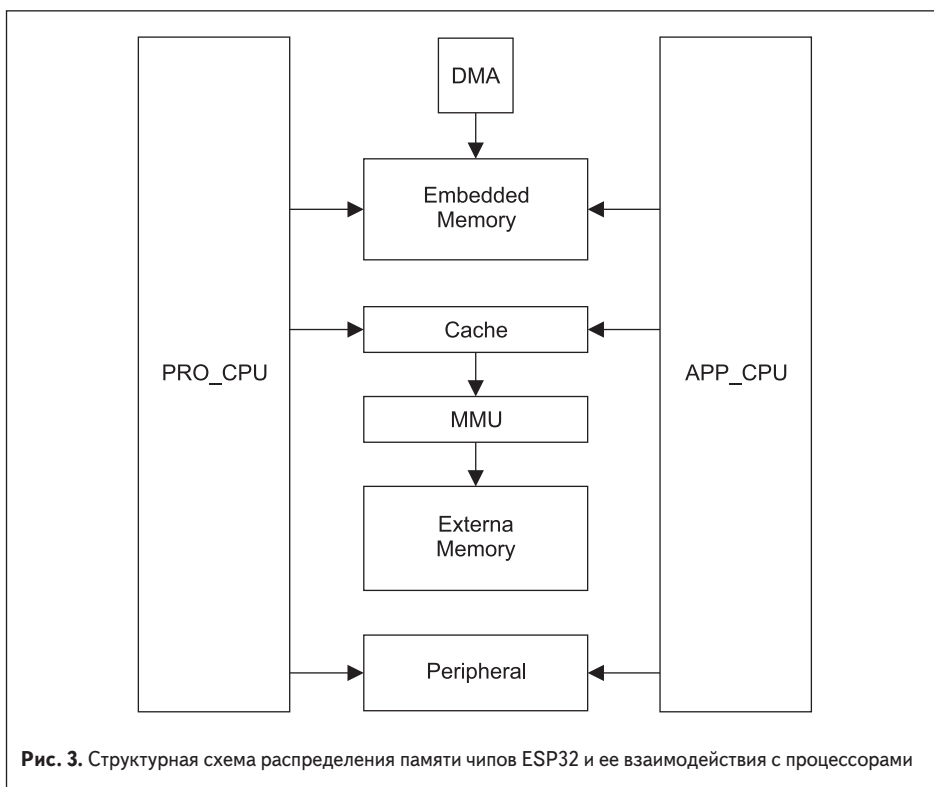


Рис. 3. Структурная схема распределения памяти чипов ESP32 и ее взаимодействия с процессорами

снижает до минимума несанкционированный доступ к Flash-памяти.

Блок часов реального времени (RTC, рис. 2) включает в себя: сопроцессор с ультранизким энергопотреблением (Ultra Low Power, ULP); память восстановления (Recovery memory), предназначенную для хранения загрузочных данных, параметров периферии и работы с центральными процессорами в режиме «глубокого сна»; блок управления электропитанием (PMU).

Сопроцессор ULP используется в режиме «глубокого сна» (deep sleep), когда отключены основные процессоры. Он может быть запущен либо внешним событием или таймером, либо комбинацией этих событий при сохранении минимальной мощности потребления. Сопроцессор ULP и Recovery memory остаются включенными во время deep sleep. Запущенный сопроцессор будет иметь доступ к периферийным устройствам, внутренним таймерам и встроенным датчикам. В зависимости от состояния этих периферийных устройств сопроцессор либо восстановит полную работоспособность чипа, либо оставит его в состоянии deep sleep.

На рис. 4 показаны эпюры последовательности операций работы ULP, включающей следующие этапы:

1. Программное обеспечение включает таймер ULP, используя бит RTC\_CNTL\_ULP\_CP\_SLP\_TIMER\_EN.
2. Таймер ULP заканчивается, и сопроцессор ULP запускает программу SENS\_PC\_INIT.
3. Программа ULP выполняет инструкцию HALT, сопроцессор останавливается, а таймер перезапускается.
4. Программа ULP выполняет инструкцию SLEEP и изменяет регистр периода таймера спящего режима.
5. Программа отключает таймер ULP, используя бит RTC\_CNTL\_ULP\_CP\_SLP\_TIMER\_EN.

Для электроснабжения чипа необходимы внешние раздельные шины питания цифровой и аналоговой части.

Схема внешнего электропитания чипа ESP32 показана на рис. 5.

Питание цифровой части реализуется по следующим цепям:

- VDD3P3\_RTC — питание для RTC и CPU;
- VDD3P3\_CPU — питание для CPU;
- VDD\_SDIO подключается к выходу внутреннего LDO, вход которого VDD3P3\_RTC (когда VDD\_SDIO подключен к той же плате PCB вместе с VDD3P3\_RTC, внутренний LDO отключается автоматически).

Выводы Pin19 и Pin37 служат контактами питания для RTC и CPU соответственно. Источник питания цифровой части должен работать в диапазоне 1,8–3,6 В. Внутренний LDO VDD\_SDIO можно использовать в качестве источника питания 1,8 В с максимальным током около 40 мА.

Выводы Pin1, Pin43 и Pin46 служат для питания низкоточной аналоговой части чипа. Выводы Pin3 и Pin4 используются для питания усилителей мощности.

Линия CHIP\_PU предназначена для перезагрузки чипа ESP32, который отключается,

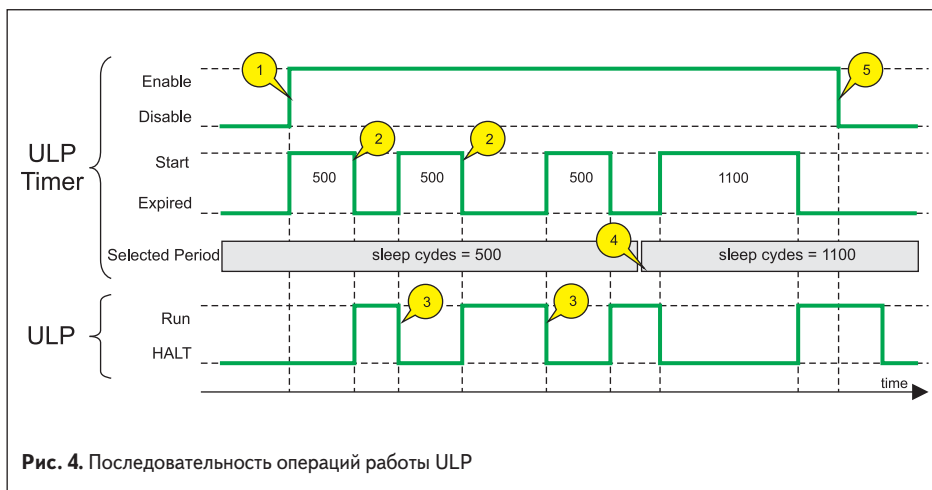


Рис. 4. Последовательность операций работы ULP

когда эта линия удерживается на низком уровне (ниже 0,6 В) в течение интервала не менее 200 мкс.

Следует особо подчеркнуть, что правильная организация электропитания чипа во многом обеспечивает его надежную работу. Поэтому фирма Espressif гарантирует заявленные в технической документации параметры исключительно при соблюдении рекомендаций,

приведенных в [2, 5, 7]. В частности, можно использовать схему электропитания модуля ESP-WROOM-32, приведенную в [8].

Узел управления (PMU) в блоке RTC (рис. 2) поддерживает пять режимов электропитания: active, modem sleep, light sleep, deep sleep, hibernation. Состояние основных блоков чипа ESP32 в различных режимах экономного электропитания приведено в таблице 3.

Таблица 3. Состояние основных блоков чипа ESP32 в различных режимах экономного электропитания

Блок	Режим энергосбережения				
	Active	Modem sleep	Light sleep	Deep sleep	Hibernation (работают только RTC timer и RTC GPIOs)
CPU	ВКЛ	ВКЛ	ПАУЗА	ВЫКЛ	ВЫКЛ
Wi-Fi/Bluetooth, RF-узел	ВКЛ	ВЫКЛ	ВЫКЛ	ВЫКЛ	ВЫКЛ
Память и периферия блока RTC	ВКЛ	ВКЛ	ВКЛ	ВКЛ	ВЫКЛ
Сопроцессор ULP	ВКЛ	ВКЛ	ВКЛ	ВКЛ/ВЫКЛ	ВЫКЛ

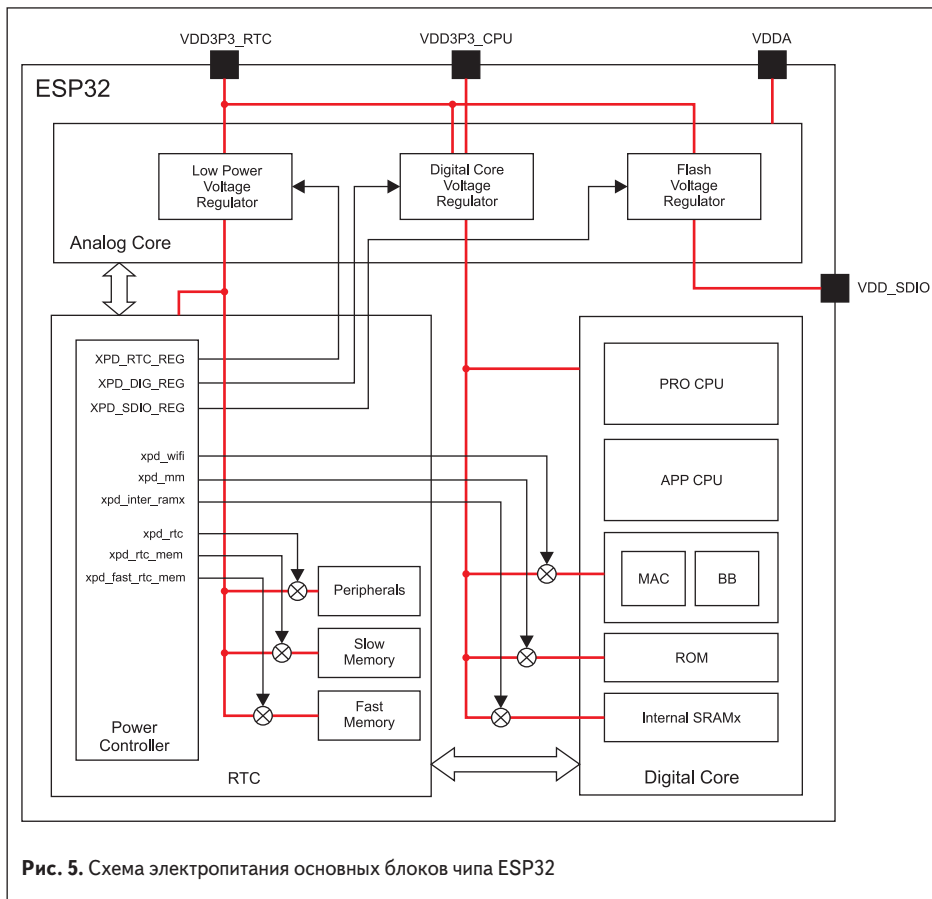


Рис. 5. Схема электропитания основных блоков чипа ESP32

Таблица 4. Примеры энергопотребления для некоторых режимов работы чипа ESP32

Режим энергосбережения	Описание	Потребление
Active	Tx: 802.11b, DSSS 1 Мбит/с, 19,5 дБм	240 мА
	Rx: 802.11b/g/n	100 мА
	Tx: BT/BLE, POUT = 0 дБм	130 мА
	Rx: BT/BLE	100 мА
Modem sleep	CPU включен	Максимальная скорость 240 МГц: 30–50 мА
		Нормальная скорость 80 МГц: 20–25 мА
		Низкая скорость 2 МГц: 2–4 мА
Light sleep		0,8 мА
Deep sleep	Работает только сопроцессор ULP	150 мкА
	Работает только контрольная периферия ULP	100 мкА
	Работают только таймер и память	10 мкА
Hibernation	Работает только таймер RTC	5 мкА

В таблице 4 приведены примеры энергопотребления для некоторых режимов работы чипа ESP32. Подробное описание потребления в нормальном и энергосберегающем режимах для приема и передачи Wi-Fi и Bluetooth на разных скоростях приведено в [2, 5].

В чипе ESP32 поддерживаются AT-команды. Программное обеспечение AT-команд чипа ESP32 разработано на основе платформы Espressif IoT Development — ESP-IDF.

Все AT-команды чипа ESP32 разбиты на пять функциональных групп: Basic AT Commands, Wi-Fi AT Commands, TCP/IP-Related AT Commands, AT Commands with Configuration Saved in the NVS Area. Каждая группа команд отвечает за определенный режим работы. Так, например, *AT+CWMODE* переводит чип в режим работы Wi-Fi. Команда *AT+GSLP* включает режим глубокого сна и т. д. Подробное описание всех AT-команд, а также примеры их использования приведены в [9]. Следует обратить внимание на то, что в этом документе отсутствуют AT-команды для Bluetooth. Для работы с каналом Bluetooth фирма Espressif разработала программу EspBlufi, которая функционирует в настоящее время только в среде Android. Подробнее об этом будет сказано в следующих разделах.

По умолчанию, в заводской конфигурации чипы ESP32 поставляются с прошивкой, которая не поддерживает AT-команды. Для их поддержки нужно загрузить дополнительное ПО. Система AT-команд Espressif Systems оформлена в виде



Рис. 6. Новый чип ESP32-PICO-D4

файла *libat\_core.a*, который включен в прошивку AT BIN. Подробная инструкция о том, где можно скачать ПО, поддерживающее AT-команды чипа, и как его установить, приведена в [9].

Первого сентября 2017 г. фирма Espressif анонсировала новый чип ESP32-PICO-D4 (рис. 6), содержащий в одном корпусе базовый чип ESP32, 4 Мбайт SPI Flash, кварцевый генератор и большинство развязывающих конденсаторов. Размеры чипа 7×7×0,94 мм. ESP32-PICO-D4 поддерживает все перечисленные выше функции чипа ESP32.

## Интерфейсы и периферия чипа ESP32

### GPIO

Пользовательские входы/выходы GPIO подключены к 34 контактным площадкам на корпусе чипа ESP32. Часть GPIO могут быть сконфигурированы как внешние интерфейсы с помощью регистров встроенных мультиплексоров IO\_MUX, RTC IO\_MUX и коммутатора сигналов процессора GPIO matrix, которые отвечают за маршрутизацию сигналов от выводов периферии до контактных площадок на корпусе чипа.

На рис. 7 показана схема формирования пользовательских входов/выходов с помощью регистров мультиплексоров IO\_MUX и RTC IO\_MUX. С помощью этих регистров встроенных в чип модулей можно реализовывать различные комбинации, объединяющие 162 периферийных входа и 176 выходных управляющих сигналов, а также комбинации быстрых периферийных контрольных сигналов.

Мультиплексор IO\_MUX содержит регистры для каждого конкретного ввода/вывода, которые определяют направление сигнала и функциональность IO. Контактные площадки на корпусе чипа могут быть соединены с соответствующими выводами процессора либо через коммутатор GPIO Matrix, либо напрямую, минуя коммутатор. Так, например, быстродействующие интерфейсы Ethernet, SDIO, SPI, JTAG, UART подключаются непосредственно к процессорам в обход GPIO Matrix.

В зависимости от назначения, по рассмотренной схеме можно реализовывать несколько видов GPIO: только цифровые, аналоговые, емкостные сенсорные. При этом аналоговые и емкостные сенсорные GPIO могут быть настроены как цифровые GPIO.

Большинство цифровых IO имеют двунаправленную, неинвертирующую схему с тремя устойчивыми состояниями, включая входной и выходной буферы. Эти GPIO можно использовать для реализации таких интерфейсов, как, например, SDIO, UART, SPI и др. При переключении в режим энергосбережения имеется возможность сохранения состояний GPIO.

Подробно процедура формирования GPIO чипа ESP32 описана в [5].

### UART

Универсальные асинхронные передатчики UART (3 шт.: UART0, UART1 и UART2) чипа ESP32 обеспечивают асинхронную связь по последовательному интерфейсу RS232 со скоростью до 5 Мбит/с. Кроме того, UART поддерживают протоколы

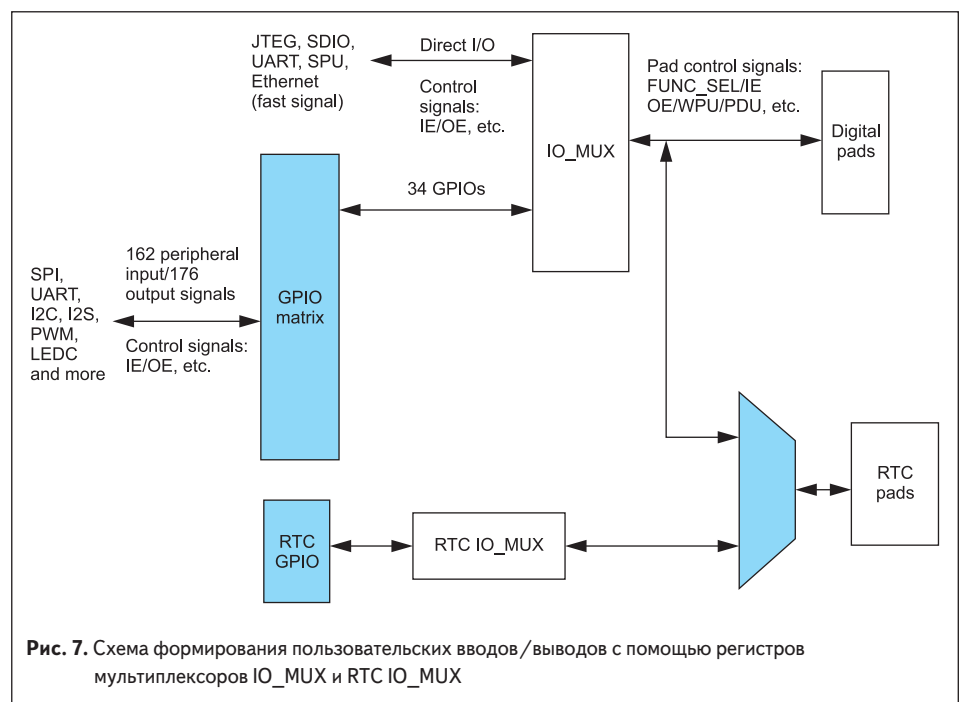


Рис. 7. Схема формирования пользовательских входов/выходов с помощью регистров мультиплексоров IO\_MUX и RTC IO\_MUX



IrDA (Infrared Data Exchange), а также параллельного интерфейса RS485. Встроенные UART обеспечивают аппаратное управление сигналами CTS и RTS и управление потоком программно обеспечения XON и XOFF. Связь с этими интерфейсами может быть реализована напрямую с помощью CPU или через контроллер DMA.

Скорость передачи данных задается программно и может быть определена с помощью функции самотестирования. Для буферной памяти трех UART (Tx/Rx-FIFO) отведено 1024×8 бит RAM. Размер данных может быть 5, 6, 7, 8 бит. Все три UART поддерживают бит четности. Стопковые биты: 1/1,5/2/3/4. Подробное описание UART чипа ESP32 приведено в [5].

### I<sup>2</sup>C

Два интерфейса I<sup>2</sup>C чипа ESP32, в зависимости от настроек, могут быть использованы как «ведущий» (Master) или как «ведомый» (Slave).

Основные технические характеристики I<sup>2</sup>C чипа ESP32:

- скорость передачи в Standard mode — 100 кбит/с;
- скорость передачи в Fast mode — 400 кбит/с;
- частота до 5 МГц (ограничена сверху за счет SDA);
- адресация 7 и 10 бит, а также Dual addressing mode;
- возможность управления через командный регистр.

### I<sup>2</sup>S

Два стандартных интерфейса I<sup>2</sup>S встроены в чип ESP32. Они могут быть использованы в качестве «ведущего» или «ведомого» в полудуплексном режиме и в режиме полного дуплекса. Интерфейсы I<sup>2</sup>S могут работать с разрешением 8/16/32/40/48 бит в выходных и входных каналах. В этих интерфейсах поддерживается тактовая частота (ВСК) в диапазоне от 10 кГц до 40 МГц. Оба интерфейса имеют контроллеры DMA. Они также поддерживают интерфейсы PDM и VT PCM.

### SPI

Последовательный периферийный интерфейс (Serial Peripheral Interface, SPI) чипа ESP32 состоит из четырех контроллеров (SPI0, SPI1, SPI2, SPI3), предназначенных

для работы с внешними устройствами, поддерживающими этот интерфейс по линиям D, Q, CS0-CS2, CLK, WP, HD. Контроллер SPI0 используется в качестве буфера для доступа к внешней памяти. Контроллер SPI1 может использоваться как «ведущий». Контроллеры SPI2 и SPI3 могут быть сконфигурированы как «ведущий» или «ведомый». При использовании в качестве «ведущего» каждый контроллер SPI может управлять несколькими CS-сигналами (CS0–CS2) для активации нескольких «ведомых» устройств. Контроллеры SPI1–SPI3 используют два канала DMA.

Как отмечалось выше, сигнальные линии интерфейса SPI могут быть реализованы с помощью GPIO через модуль IO\_MUX или матрицу GPIO-matrix.

Детальное описание интерфейсов SPI чипа ESP32 приведено в [5].

### Ethernet

Контроллер Ethernet в чипе ESP32 реализован в соответствии со стандартом IEEE-802.3-2008-compliant Media Access Controller. Для работы с интерфейсом Ethernet к чипу необходимо подключить внешнее устройство со встроенным PHY. Такое соединение возможно с помощью 17-сигнальной линии MI или девятисигнальной линии of nine signals of RMI.

Чип ESP32 поддерживает следующие основные параметры Ethernet MAC:

- скорость передачи 10 Мбит/с и 100 Мбит/с;
- прямая адресация (DMA) между SRAM и Ethernet MAC;
- полудуплексный (CSMA/CD) и полнодуплексные режимы работы;
- код CRC (32 бит);
- индивидуальная и групповая адресация;
- статусный код (32 бит) для каждого фрейма;
- встроенная буферная память FIFO (32 бит);
- точный протокол времени PTP в соответствии с IEEE 1588 2008;
- вывод тактовых импульсов 25 МГц/50 МГц.

### SDIO

Стандарт SDIO (Secure Digital Input/Output), который поддерживается чипом ESP32, позволяет использовать внешние карты памяти

семейства SD/MMC в соответствии со спецификацией V2.0. Внешняя память крайне важна для некоторых приложений, в которых могут быть использованы чипы ESP32. Поэтому остановимся на поддержке SDIO несколько подробнее.

Чип ESP32 оснащен встроенным интерфейсом SD-карт (SD device interface). Структурная схема работы чипа ESP32 с внешним SDIO хост-компьютером показана на рис. 8.

В этом варианте чип ESP32 используется в качестве «ведомого» устройства (Slave), подключенного к шине SDIO.

Интерфейс SDIO чипа ESP32 (SDIO Device Interface) обеспечивает эффективную связь с внешним хостом, предоставляя регистры интерфейса SDIO через устройство прямого доступа (DMA) и высокоскоростную шину передачи данных (Advanced High-performance Bus, AHB), не привлекая при этом внутренние процессоры. Обмен данными между «ведущим» и «ведомым» устройствами реализуется по стандартному протоколу SDIO V2.0. Поддержка SDIO в чипе ESP32 осуществляется также в соответствии с протоколом v2.0, который предполагает использование SPI/SDIO-совместимых устройств. Некоторые устройства SDIO, предназначенные для работы в режиме передачи байтов, требуют использования общих линий SPI для обработки данных. Модуль SPI ориентирован по байтам и поэтому поддерживает любой пакет в блоке байтов [10]. В чипе ESP32 контроллер «ведомого» устройства (SDIO/SPI slave controller) поддерживает SDIO SPI, однобитный и четырехбитный режимы обмена данными при тактовых частотах 0–50 МГц. Подробное описание работы SDIO приведено в [5].

### SD/SDIO/MMC

Встроенный хост-контроллер SD/SDIO/MMC поддерживает выходную тактовую частоту до 80 МГц и может работать в трех режимах: однобитном, четырехбитном и восьмибитном в соответствии со стандартом SDIO Card Specification Version 2.0. Контроллер карты памяти ESP32 обеспечивает аппаратный интерфейс между расширенной периферийной шиной (Advanced Peripheral Bus, APB) и внешним запоминающим устройством. Иными словами, хост-контроллер SD/SDIO/MMC управляет попеременной работой карт Card0 (1/4/8 бит)

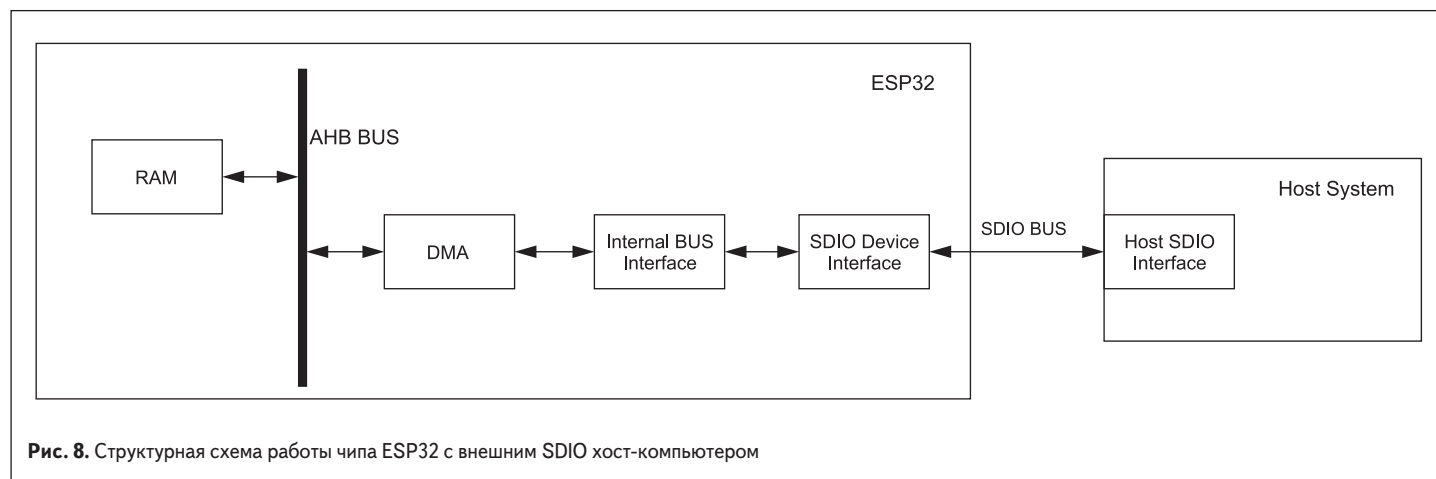


Рис. 8. Структурная схема работы чипа ESP32 с внешним SDIO хост-компьютером

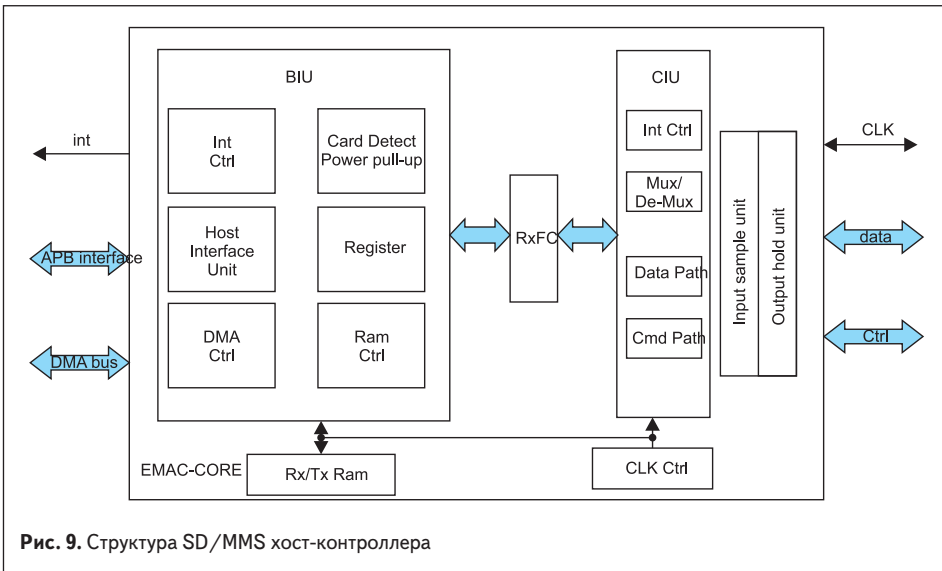


Рис. 9. Структура SD/MMC хост-контроллера

и Card1 (1 и 4 бит). На рис. 9 показана структура хост-контроллера SD/MMC.

Хост-контроллер SD/MMC состоит из двух основных функциональных блоков: интерфейса шины (Bus Interface Unit, BIU), который поддерживает APB, и интерфейса карты (Card Interface Unit, CIU), предназначенного для обработки протоколов интерфейса внешней карты памяти. BIU обеспечивает доступ к регистрам и данным FIFO через модуль интерфейса хоста (Host Interface Unit, HIU). Кроме того, он реализует доступ FIFO к данным через интерфейс DMA. Следует отметить, что интерфейс хоста может быть настроен как интерфейс APB. Модуль CIU обеспечивает адресацию команд и данных, предназначенных для карт SD, MMC, CE-ATA. Модуль CIU, кроме того, обеспечивает управление тактовой частотой. Для отправки и приема данных в контроллере предусмотрена RAM (рис. 8), состоящая из двух областей — прием и передача. Кроме того, процесс от-

правки и получения данных также может быть реализован через CPU и DMA.

Из других важных особенностей встроенного хост-контроллера SD/SDIO/MMC чипа ESP32 отметим следующие:

- поддержка SD Memory Card standard v3.0, 3.01;
- поддержка MMC v4.41, 4.5, 4.51;
- поддержка CE-ATA v1.1;
- поддержка режимов 1/4/8 бит (Card0).

### Модуль RMT

Модуль удаленного контроля RMT (Remote Control) изначально был спроектирован для отправки и приема сигналов инфракрасного дистанционного управления, которые используются при включении и выключении несущей частоты. Поэтому в ранних вариантах технической документации этот модуль назывался Infrared Remote Controller (IRC). Однако благодаря универсальности своей конструкции

модуль RMT может использоваться для генерации сигналов различных типов. В частности, может быть использована модуляция с помощью несущей частоты.

Передачик RMT считывает код необходимого сигнала, сохраненного в RAM, модифицирует его и передает в эфир. Приемник тестирует входной сигнал и демодулирует его. При этом в RAM сохраняются параметры сигнала и график его активности. Модуль RMT имеет восемь каналов и собственные управляющие регистры. Каждый канал имеет передатчик и приемник, которые могут функционировать попеременно. Работа каналов синхронизируется по тактовому сигналу шины APB либо с помощью REF\_TICK.

### Модуль MCPWM

Модуль широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для управления двигателем (Motor Control Pulse Width Modulator, MCPWM) предназначен для управления двигателем. Также этот модуль может быть использован для управления мощными выходными каскадами с переменной нагрузкой. Модуль MCPWM [3, 5] обеспечивает шесть выходных каскадов ШИМ, которые могут быть настроены для работы в нескольких топологиях. В качестве примера можно привести схему управления H-мостом для контроля направления и скорости вращения двигателя постоянного тока.

Структура модуля MCPWM показана на рис. 10.

В составе модуля MCPWM есть два основных блока: таймеры ШИМ (PWM timer) и операторы ШИМ (PWM operator). Таймер обеспечивает определенный тип синхронизации, который может свободно использоваться различными устройствами, в том числе и другими таймерами. Любой таймер имеет свой выделенный восьмибитный предварительный делитель частоты и 16-разрядный счетчик, который может работать в режиме прямого и обратного отсчета, а также в комбинированном режиме.

Всякий оператор может быть настроен так, чтобы использовать синхронизацию любых таймеров. На основе сигналов синхронизации операторы ШИМ вырабатывают сигналы управления необходимой формы. Каждый из операторов имеет все необходимые ресурсы для генерации пар сигналов, контролируемых один канал ШИМ. Оператор PWM имеет два выхода ШИМ: PWMxA и PWMxB, которые могут работать независимо, в симметричной и асимметричной конфигурации.

Периферийная сеть MCPWM также содержит специальный блок захвата (Capture submodule), который используется в системах, где принципиальную роль играет точное значение реального времени внешних событий. Чип ESP32 содержит два периферийных узла модуля MCPWM: MCPWM0 и MCPWM1. Их контрольные регистры расположены в блоках памяти 4 кбайт, начиная с адресов памяти 0x3FF5E000 и 0x3FF6C000 соответственно. Управление модулем MCPWM осуществляется одним из встроенных микропроцессоров чипа.

### Контроллер LED\_PWM

Контроллер LED\_PWM предназначен для управления системами питания светодиодных

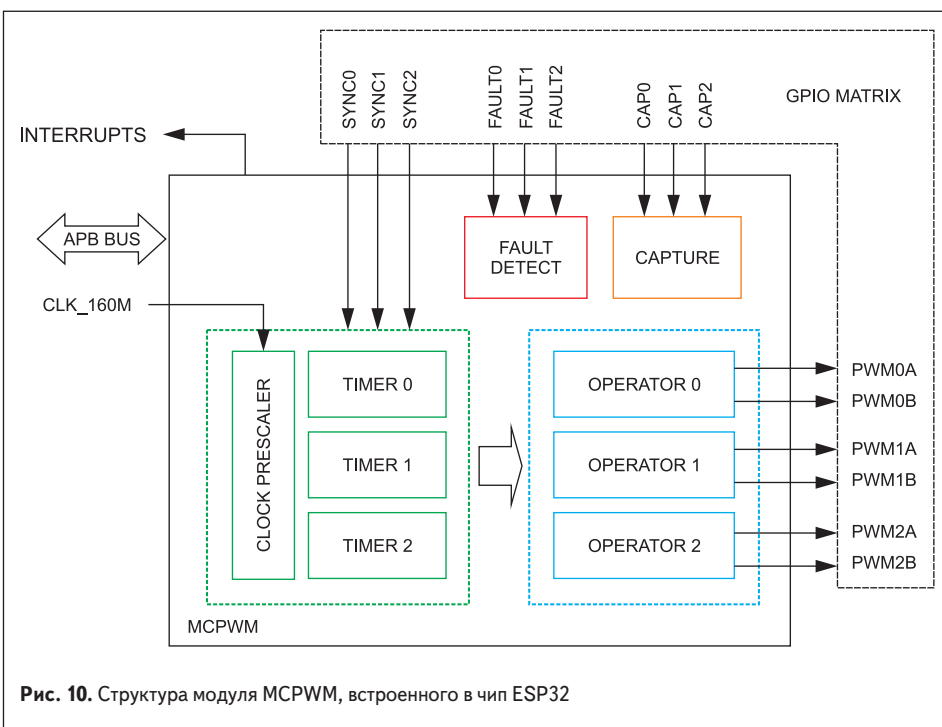


Рис. 10. Структура модуля MCPWM, встроенного в чип ESP32

матриц и табло [5]. Однако он может применяться также и в других системах с ШИМ. Он имеет 16 каналов, каждый из которых может генерировать сигналы для управления светодиодами устройств, и оснащен семью высокоскоростными и семью низкоскоростными генераторами ШИМ. Они управляются с помощью высокоскоростных и низкоскоростных таймеров. При этом высокоскоростные и низкоскоростные каналы могут контролироваться с помощью любого из этих таймеров.

Контроллер PWM также имеет возможность автоматически увеличивать или уменьшать рабочий цикл постепенно, позволяя избежать импульсных наводок, влияющих на работу процессоров. Все 16 каналов работают с тактовой частотой 80 МГц шины APB. Восемь каналов могут также использовать частоту 8 МГц кварцевого генератора. Любой канал контроллера имеет возможность управляться одним из четырех 20-битных таймеров. При этом процессор может передавать управление другим таймерам. Кроме того, каждый канал поддерживает пошаговую работу с плавным изменением мощности, что крайне полезно для систем питания светодиодных экранов.

**Счетчик импульсов**

Счетчик импульсов (Pulse Counter) предназначен для анализа времен нарастания и спада фронтов импульсных входных сигналов. Он имеет восемь независимых узлов, называемых PULSE\_CNT\_Un. Каждый узел счетчика импульсов имеет два идентичных по функциональности канала ch0 и ch1. Эти каналы оснащены двумя входами — рабочим, на который подаются анализируемые импульсы, и контрольным, на который подаются управляющие сигналы. Для каждого канала устанавливаются границы времен нарастания и спада импульсного сигнала. Все узлы счетчика имеют свой собственный регистр, объемом 16 бит, в который данные могут записываться как в режиме суммирования, так и в режиме вычитания. Таким образом, счетчик импульсов определяет количество импульсов с заданными временами нарастания и спада фронтов. При достижении граничного значения вырабатывается сигнал прерывания. Подробно работа этого модуля описана в [5].

**АЦП**

Аналого-цифровой преобразователь чипа ESP32 выполнен по схеме 12-разрядного АЦП последовательного приближения (SAR ADC). Такие преобразователи позволяют в течение одного периода тактового сигнала получить один двоичный разряд. АЦП обрабатывает аналоговые сигналы в 18 каналах, для которых имеются специальные выводы. Такие выводы могут быть использованы для реализации функций программируемого усилителя, предназначенного для работы с малыми аналоговыми сигналами от чувствительных сенсоров.

**ЦАП**

Два встроенных 8-разрядных ЦАП предназначены для преобразования двух независимых цифровых сигналов в соответствующие

**Таблица 5.** Характеристики канала Wi-Fi базового чипа ESP32

<b>Стандарт</b>	802.11 b/g/n/e/i
<b>Индекс модуляции и схемы кодирования (Modulation and Coding Scheme, MCS)</b>	802.11n, MCS — 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 при ширине каналов 20 МГц и 40 МГц (2,4 ГГц)
<b>Защитный интервал</b>	802.11n, 0,4 мкс
<b>Максимальная скорость передачи в стандарте 802.11 n (2,4 ГГц)</b>	150 Мбит/с
<b>Выходная мощность на порту антенны</b>	Регулируемая, максимум 20,5 дБм
<b>Качество и класс предоставляемых услуг передачи данных</b>	QoS в соответствии со стандартом 802.11e, Wi-Fi Multimedia (WMM, беспроводные мультимедийные расширения)
<b>Объединение пакетов данных</b>	AMPDU (Aggregated MAC Protocol Data Unit) — объединение кадров данных протокола MAC-уровня и пересылка их в одном фрейме
<b>Объединение сервисных сообщений</b>	AMSDU (Aggregated Mac Service Data Unit) — агрегация кадров сервисных сообщений в один кадр и передача его на уровень приложений в виде единого объединенного пакета
<b>Механизм объединения нескольких подтверждений в один кадр</b>	Block ACK (acknowledgments)
<b>Дублирование данных с разным кодированием по разным пространственным потокам</b>	STBC 2x1 (блочное пространственно-временное кодирование)
<b>Энергосбережение</b>	Режим UAPSD (Unplanned Automatic Power Save) — внеплановое автоматическое включение функции энергосбережения, программируемые режимы энергосбережения, выход в эфир точно по графику
<b>Автоматический мониторинг сети</b>	Полная информация о сети (название, мощность сигнала, наличие шифрования и т. д.)
<b>Безопасность</b>	В соответствии со стандартом 802.11i, алгоритм AES, протоколы WPA/WPA2/WPA2-Enterprise/Wi-Fi Protected Setup (WPS)
<b>Топология</b>	BSS Station mode (Basic Service Set)/SoftAP mode, Wi-Fi Direct (P2P), P2P Discovery, P2P Group Owner mode and P2P Power Management
<b>Открытый интерфейс выбора схемы работы с верхними уровнями</b>	TLS, PEAP, LEAP, SIM, AKA и др.
<b>Оптимизация выходной мощности и скорости передачи</b>	Адаптивный алгоритм автоматического регулирования с учетом коэффициента шума (SNR) и информации о потере пакетов
<b>Контроль потери пакетов</b>	Автоматическая повторная передача и ответ на MAC-адрес в случаях медленного хоста
<b>Антенный интерфейс</b>	Программный выбор антенны, разнесенные антенны

аналоговые напряжения. Эти сигналы можно использовать, например, в качестве опорного напряжения в схемах управления системой электропитания чипа.

**LNA**

Встроенный малошумящий предусилитель LNA используется для работы с аналоговыми датчиками (контакты SENSOR\_VP и SENSOR\_VN). Выход LNA соединен со входом АЦП. Коэффициент усиления регулируется внешними конденсаторами. Максимальное значение усиления составляет 60 дБ. На вход LNA можно подать, например, сигналы от встроенного в чип датчика Холла.

**Температурный датчик**

Встроенный температурный датчик рассчитан на диапазон -40...+125 °С. Следует иметь в виду, что размещенный внутри чипа температурный датчик подключается ко входу АЦП. Показания АЦП при этом могут меняться для разных моделей и партий чипов и не отражают адекватные значения температуры. Кроме того, температура кристалла чипа зависит от режима его работы. Поэтому для приложений, в которых требуются точные значения температуры, необходимо проводить предварительные дополнительные калибровки.

**Датчики касания**

Контактные выводы для тактовых сенсоров (GPIO4, GPIO0, GPIO2, MTDO, MTCK, MTD1, MTMS, GPIO27, 32K\_XN, 32K\_XP) отведены специально для емкостных датчиков касания. Эти выводы можно использовать с самыми различ-

ными емкостными датчиками прикосновения, которые становятся все более популярными в приложениях IoT.

**Канал Wi-Fi чипа ESP32**

Основные технические характеристики Wi-Fi чипа ESP32 приведены в таблице 5. Канал Wi-Fi реализован в соответствии со стандартами 802.11b/g/n/e/i. О стандартах 802.11b/g/n написано много и подробно. Поэтому нет необходимости в дополнительных комментариях к таблице 5. Отметим только, что 802.11e — это поправки к стандарту IEEE 802.11, которые определяют серию улучшений Quality of Service для приложений, работающих в WLAN. Данные поправки изменяют MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.

Стандарт регламентирует, в частности, устойчивость к задержкам таких приложений, как, например, Voice over Wireless IP и Streaming Multimedia.

В основе стандарта IEEE 802.11i, получившего название WPA2, лежит концепция надежно защищенной сети — Robust Security Network (RSN). Базовая идея заключается в использовании алгоритма AES (Advanced Encryption Standard), обеспечивающего более надежную защиту и поддерживающего ключи длиной 128, 192 и 256 бит.

**Канал Bluetooth чипа ESP32**

Чип ESP32 содержит Bluetooth link controller и радиочастотный блок Bluetooth baseband (рис. 2), которые разработаны в соответствии со стандартом Bluetooth v4.2. Чип ESP может работать как в режиме классического Bluetooth



Рис. 11. Внешний вид модуля ESP-WROOM-32

BR/EDR, так и в экономном режиме BLE. Основные технические характеристики канала приведены в таблице 6.

Подробное рассмотрение Bluetooth v4.2 выходит за рамки данной статьи. Детальную техническую информацию по этому стандарту можно найти на сайте SIG [12].

Необходимо подчеркнуть, что чип ESP32 в заводской конфигурации поддерживает Bluetooth v4.2. аппаратно. Для полноценной работы с ним необходимо дополнительное программное обеспечение, которое можно загрузить с помощью отладочного комплекта ESP-IDF [13]. Примеры программ для работы с Bluetooth (BLE) приведены на сайте [14]. Тексты программ для работы с Bluetooth APIs, GAP API, GATT client, GPIO driver и др. можно найти на сайте [15]. Там же можно скачать коды *esp-idf-v2.0-rc1*.

В достаточно подробной статье [16] приведена пошаговая инструкция о работе с каналом Bluetooth модуля ESP32. В качестве прикладного программного обеспечения, которое доступно на сайте [18], использован стек BlueKitchen's BTstack library [17]. Этот стек протоколов поддерживает как Bluetooth Classic, так и Bluetooth Low Energy. Библиотека BlueKitchen's BTstack

library поддерживает много различных платформ, в том числе ESP32, Arduino и другие [19].

Для работы с устройствами на базе Android 4.3 и выше фирма Espressif разработала программное обеспечение EspBlufi [20]. Это ПО дает возможность настройки сети Wi-Fi через канал Bluetooth. Используя протокол Bluetooth, пользователи могут легко обнаруживать соседние устройства через Bluetooth-маяки. Кроме того, пользователи могут передавать данные по Bluetooth на смартфон, даже если маршрутизатор не работает в данный момент. Позже телефон может передать эти данные по Интернету. Таким образом, телефон может подключаться к устройству Bluetooth и отправлять команды напрямую для управления устройством, если сеть Wi-Fi отключена. Программу EspBlufi можно загрузить на сайте [21].

Дополнительную информацию о работе Bluetooth-канала чипа ESP32 можно найти на сайте [3].

## Модули на базе чипа ESP32

### ESP-WROOM-32

На базе чипа ESP32 фирма Espressif выпускает полностью готовый к работе модуль ESP-WROOM-32, внешний вид которого показан на рис. 11. Напряжение питания модуля — 3,3 В, габариты 25,2×18 мм, диапазон рабочих температур -40...+85 °С. В корпусе модуля размещены: чип ESP32-D0WDQ6, флэш-память, PCB-антенна, конфигурирующие резисторы и конденсаторы, фильтры электропитания.

Технические характеристики модуля соответствуют параметрам базового чипа, приведенным в таблицах 2–6.

На задней стороне корпуса размещено 38 контактных площадок, подключенных к пользовательским вводам/выводам (GPIO 22 шт.), периферии и интерфейсам: SD-card, UART, SPI, SDIO, I<sup>2</sup>C, LED PWM, Motor PWM, I<sup>2</sup>S, IR. Подробное описание модуля приведено в [22].

### ESP32-WROVER

Модуль ESP32-WROVER разработан на базе чипа ESP32-D0WDQ6. Основное отличие заключается в том, что WROVER имеет дополнительную встроенную внешнюю память 4 Мбайт SPI Flash. Эта память может быть задействована для кодов CPU с поддержкой адресации 8, 16 и 32 бит. Также поддерживается отработка кодов. Кроме того, ESP32-WROVER имеет 4 Мбайт SPI Pseudo static RAM (PSRAM). Выпускаются два типа этих модулей. Модель ESP32-WROVER оснащена PCB-антенной. Модель ESP32-WROVER-I имеет IPEX-антенну. Имеются небольшие различия в конструкции корпуса. Габариты ESP32-WROVER — 31,4×18 мм. В остальном параметры ESP-WROOM-32 и ESP32-WROVER совпадают. Описание модуля приведено на сайте [23]. ■

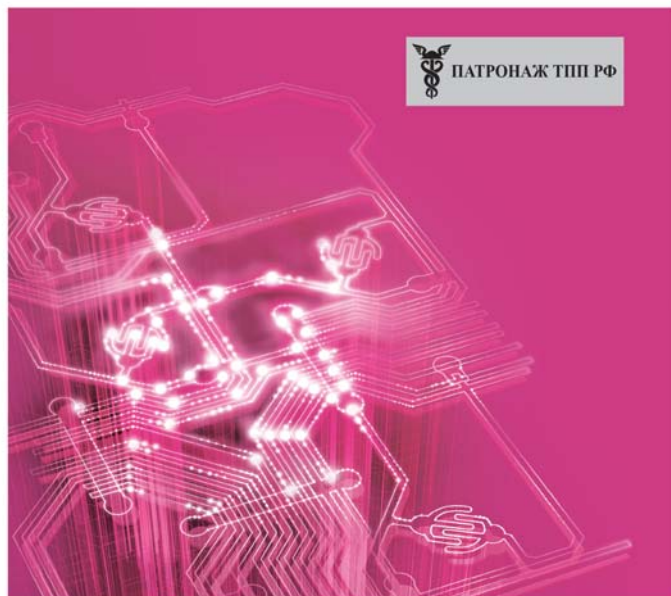
## Литература

1. <http://espressif.com/en/support/download/documents>
2. [http://espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](http://espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf)
3. <https://media.readthedocs.org/pdf/esp-idf-fork/latest/esp-idf-fork.pdf>
4. <http://espressif.com/en/products/software/esp-sdk/overview>
5. [http://espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_technical\\_reference\\_manual\\_en.pdf](http://espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf)
6. [http://espressif.com/en/media\\_overview/news/winbond%E2%80%99s-new-low-voltage-nor-flash-memories-designed-around-esp32](http://espressif.com/en/media_overview/news/winbond%E2%80%99s-new-low-voltage-nor-flash-memories-designed-around-esp32)
7. [http://espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_hardware\\_design\\_guidelines\\_en.pdf](http://espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_hardware_design_guidelines_en.pdf)
8. [http://espressif.com/sites/default/files/documentation/esp-wroom-32\\_datasheet\\_en.pdf](http://espressif.com/sites/default/files/documentation/esp-wroom-32_datasheet_en.pdf)
9. [http://espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_at\\_instruction\\_set\\_and\\_examples\\_en.pdf](http://espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_at_instruction_set_and_examples_en.pdf)
10. [www.sdcard.org/developers/overview/sdio\\_spec/Simplified\\_SDIO\\_Card\\_Spec.pdf](http://www.sdcard.org/developers/overview/sdio_spec/Simplified_SDIO_Card_Spec.pdf)
11. [http://espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-pico-d4\\_datasheet\\_en.pdf](http://espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-pico-d4_datasheet_en.pdf)
12. [www.bluetooth.com/specifications/bluetooth-core-specification](http://www.bluetooth.com/specifications/bluetooth-core-specification)
13. <http://esp-idf.readthedocs.io/en/latest/>
14. <https://github.com/espressif/esp-idf/tree/master/examples/bluetooth>
15. <https://github.com/espressif/esp-idf/releases/tag/v2.0-rc1>
16. <https://techtutorialsx.com/2017/07/08/esp32-bluetooth-using-the-btstack-library/>
17. <http://bluekitchen-gmbh.com/>
18. <https://github.com/bluekitchen/btstack>
19. <https://github.com/bluekitchen/btstack/tree/master/port>
20. [http://espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_bluetooth\\_networking\\_user\\_guide\\_en.pdf](http://espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_bluetooth_networking_user_guide_en.pdf)
21. <https://github.com/EspressifApp/EspBlufi/tree/master/releases>
22. [https://espressif.com/sites/default/files/documentation/esp-wroom-32\\_datasheet\\_en.pdf](https://espressif.com/sites/default/files/documentation/esp-wroom-32_datasheet_en.pdf)
23. [http://espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wrover\\_datasheet\\_en.pdf](http://espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wrover_datasheet_en.pdf)

Таблица 6. Основные технические характеристики канала Bluetooth чипа ESP32

Стандарт	Bluetooth v4.2 BR/EDR и BLE
Мощность передатчика	Bluetooth Class-1, Class-2, Class-3 (расширенный контроль выходной мощности до 24 дБ, возможность работы без внешнего усилителя мощности)
Модуляция	π/4 DQPSK и 8 DPSK
Приемник	NZIF (near-zero intermediate frequency), -97 дБ
Способ физического подключения	Синхронное соединение (SCO) и асинхронное подключение без установления соединения (ACL)
Шифрование	AES, симметричный алгоритм блочного шифрования (размер блока 128 бит, ключ 128/192/256 бит)
Подстройка частоты	Адаптивная перестройка частоты с расширенным спектром (Adaptive Frequency Hopping, AFH)
Стандартный протокол HCI (Host Controller Interface)	Поддержка интерфейсов SDIO/SPI/UART, High speed UART HCI, до 4 Мбит/с
Конфигурирование хоста	I <sup>2</sup> C
Контроль доступных сервисов	SDP (Service Discover Protocol)
Процедура управления связью	GAP (General Access Profile)
Обеспечение безопасности	SMP (Security Manager Protocol)
Протокол атрибутов	ATT (Attribute Protocol)
Протокол атрибутов профилей устройств	GATT (Generic Attribute Profile) с поддержкой всех базовых профилей
Поддержка компьютерной периферии	HID (Human Interface)
Последовательный порт	SPP (Serial Port Profile)
Автоматическая передача в эфир идентификатора устройства	BLE Beacon
Аудиоинтерфейсы	PCM/I <sup>2</sup> S
Аудиоопрофили	A2DP/AVRCP/SPP, HSP/HFP, RFCOMM
Кодеки	CVSD, SBC, PCM (A-law compression), PCM (μ-law compression)
Топология	Bluetooth Piconet, Scatternet

В РАМКАХ МЕЖДУНАРОДНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ФОРУМА «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ. АВТОМАТИЗАЦИЯ» 



**21 – 23 ноября 2017**

Санкт-Петербург, Петербургский СКК



## РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

XVII МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА

- Электронные компоненты
- Комплектующие
- Печатные платы
- Светотехника
- Материалы
- Конструктивы
- Технологии
- Промышленное оборудование и инструменты
- Контрольно-измерительные приборы и лабораторное оборудование
- Робототехника

Организатор выставки:

  radel2@farexpo.ru, www.farexpo.ru/radel тел.: +7 (812) 777-04-07, 718-35-37  
Место проведения: Санкт-Петербург, СКК, пр. Ю. Гагарина, 8, м. «Парк Победы»

реклама

 ESPRESSIF

# Wi-Fi + Bluetooth/BLE модуль ESP-WROOM-32

- Tensilica Xtensa Dual-Core 32-bit LX6
- Wi-Fi 802.11 b/g/n/e/i (802.11n до 150 Мбит/с)
- 5 режимов энергосбережения
- SPI, UART, I2S, I2C, SDIO, Ethernet
- Flash 4×16M



БЕСПЛАТНЫЕ ОБРАЗЦЫ



www.macrogroup.ru

«Макро Групп» – официальный дистрибьютор

Санкт-Петербург, ул. Свеаборгская, дом 12

тел.: (812) 370-60-70 e-mail: wireless@macrogroup.ru

реклама

# Программно-аппаратные решения российской компании «Тингеникс» для LPWAN

## Часть 1. Сети LoRaWAN

**Данный материал открывает цикл публикаций, посвященных продукции компании «Тингеникс» для LPWAN. В первой части рассматриваются общие принципы построения сетей LoRaWAN, приведен общий обзор продукции фирмы, соответствующей стандарту LoRa.**

**Виктор Алексеев**  
victor.alexeev@gmail.com

### Введение

В настоящее время одним из магистральных направлений «Интернета вещей» (IoT) является Low Power Wide Area Network (LPWAN) — глобальные беспроводные сети с устройствами малой мощности. Наиболее интенсивно сегодня развиваются два направления — сети нелицензионного диапазона LoRaWAN и сети лицензируемого диапазона стандарта 3GPP Rel. 13.

Учитывая основные тенденции развития рынка IoT, в 2016 г. была создана российская фирма «Тингеникс», разрабатывающая и поставляющая решения и продукты для этого сегмента, в состав которой вошли специалисты с большим опытом работы в крупнейших российских и западных компаниях [1]. Основное направление деятельности фирмы заключается в разработке и производстве программного обеспечения и аппаратных средств, которые позволяют использовать IoT для решения самых разнообразных задач в таких областях, как производство, транспорт, ЖКХ, сельское хозяйство и т. д. В данной статье мы остановимся только на общих вопросах и обзоре продукции фирмы «Тингеникс» для сетей LoRaWAN.

Дешевые, экономичные мобильные устройства LPWAN, работающие в нелицензируемом диапазоне частот, можно разбить на два основных класса:

- широкополосные — UWB Ultra Wide Band (например, LoRa — один канал занимает полосу в эфире шириной 125 или 250 кГц);
- узкополосные — UNB Ultra Narrow Band (например, Sigfox, «СТРИЖ Телемати-

ка» — один канал занимает полосу в эфире шириной 100 Гц).

Далее мы рассмотрим только устройства UWB Ultra Wide Band.

### Модуляция LoRa

Для бурно развивающихся приложений беспроводной связи, таких, например, как IoT, системы учета расхода воды, газа, электричества, точное земледелие и другие аналогичные услуги, необходимы мобильные устройства, отличающиеся простотой, небольшой ценой и минимальным энергопотреблением. Одной из наиболее удачных разработок, учитывающих эти требования, является технология LoRa (Long Range), предложенная и запатентованная американской фирмой Semtech Corporation [1].

Технология модуляции LoRa является проприетарной, запатентованной Semtech. LoRa определяет метод модуляции в разрешенном нелицензируемом диапазоне частот ISM, который привлекает разработчиков прежде всего тем, что нет необходимости получать лицензии на пользование эфиром. В основном LoRa реализуется на частотах 863–870 (868, реже на 433) МГц в Европе, в том числе и в РФ [2]. В США принят диапазон 902–928 (915) МГц, а в Азии — 779–787 МГц. В РФ свободное использование, не требующее регистрации, разрешено для неспециализированных устройств малого радиуса действия, имеющих эквивалентную изотропно-излучаемую мощность (ЭИИМ) не более –17 дБВт в диапазонах 433,075–434,79 МГц. В диапазонах 864–865 и 868,7–869,2 МГц безлицензионное использование разрешено для неспециализированных

устройств малого радиуса действия с мощностью до 25 мВт [3, 4].

В зависимости от мощности сигнала и расстояния, сети на базе технологии LoRa поддерживают скорости от 30 бит/с до 50 кбит/с в режиме ADR (Adaptive Data Rate). Устройства могут работать на расстояниях до 20 км при минимальном энергопотреблении, обеспечивающем несколько лет автономной работы на одном аккумуляторе типа AA. Максимальная длина пакета LoRa составляет 256 байт. С технической точки зрения, технология LoRa предпочтительнее в том случае, когда необходима надежная симметричная связь в обоих направлениях — UL («вверх») и DL («вниз»), что выгодно отличает ее от систем UNB.

В технологии LoRa объединены две известные методики — расширение спектра и спектральная модуляция.

Метод расширения спектра использует более широкую полосу частот по сравнению с минимальным диапазоном частот, который требуется для передачи данного информационного пакета. В LoRa расширение спектра реализовано с применением линейной частотной модуляции Chirp Spread Spectrum (CSS). На физическом уровне PHY устройства с поддержкой CSS регламентируются стандартом IEEE 802.15.4 для сетей Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPAN) [2]. Другой метод, используемый в технологии LoRa, называется спектральной модуляцией (Spread Spectrum Modulation, SSM). В этом методе применяется множество расширяющих сигналов одинаковой амплитуды, разнесенных по частоте. При этом каждый из компонентных сигналов кодируется с помощью псевдослучайной последовательности или специальной таблицы преобразования. Иными словами, в технологии LoRa данные кодируются широкополосными импульсами с частотой, изменяющейся в некотором интервале времени [4]. Благодаря методу SSM технология LoRa очень устойчива к воздействию коротких импульсных помех. Пример реального сигнала LoRa показан на рис. 1 [2].

В технологии LoRa поддерживается прямая коррекция ошибок (Forward Error Correction, FEC). Комбинация методов CSS, SSM и FEC позволяет LoRa выделять полезный сигнал на уровне сильных помех за счет исключения каналов, в которых обнаружены узкополосные шумы. Кроме того, LoRa очень устойчива по от-

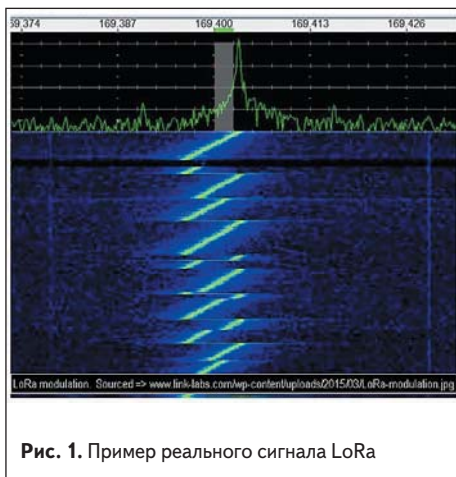


Рис. 1. Пример реального сигнала LoRa

ношению к интерференциям как внутри, так и за пределами рабочего диапазона, что дает возможность свести к минимуму искажения, вызванные эффектом отражений в условиях городской застройки.

Технология LoRa использует всю ширину полосы пропускания канала для передачи сигнала и поддерживает чувствительность приемника  $-148$  дБм, что позволяет работать на уровне 19,5 дБ ниже уровня шумов с очень низкими полезными сигналами.

## Сети LoRaWAN

Совокупность метода модуляции LoRa и открытого стека протоколов верхних уровней поддерживается открытым некоммерческим объединением LoRa Alliance. В состав этой организации входят такие известные мировые вендоры, как, например, IBM, ST, Semtech, Cisco, ZTE, Gemalto, Microchip, Renesas, Orange и многие другие ведущие производители электронного оборудования, а также операторы сотовой связи. На начало 2017 г. LoRa Alliance насчитывал более 420 прямых и ассоциированных членов из Европы, Америки, Азии и Африки, Китая (Тайвань). Участники альянса разрабатывали и непрерывно совершенствуют открытый протокол LoRaWAN для сетей с поддержкой технологии LoRa.

Протокол LoRaWAN определяет доступ к среде на канальном уровне MAC и описывает общую структуру сети мобильных устройств IoT с поддержкой технологии LoRa.

В принципе, технология LoRa может быть реализована несколькими способами на базе комбинаций различных механизмов доступа к среде и методов управления работой приложений. Такой подход используется при разработке специализированных микросхем с модуляцией LoRa и открытой средой программирования.

В стандартном варианте сеть LoRaWAN состоит из сетевого сервера, сервера приложений, шлюзов и конечных мобильных устройств (рис. 2) [3]. Рассмотрим все эти составляющие

по отдельности, уделив особое внимание конечным устройствам.

### Сетевой сервер

Сетевой сервер (Network Server, NS) — это главное управляющее устройство, которое координирует работу всей сети LoRaWAN, включая инфраструктуру и конечные устройства.

NS thingenix, соответствующий стандарту LoRaWAN 1.0.2, доступен в качестве облачного сервиса и предоставляет дополнительные возможности по управлению конфигурациями и ПО оконечных устройств. Его уникальной функцией является встроенная система геолокации устройств, подключенных к сети, с использованием данных о времени получения пакета и уровне сигнала от нескольких шлюзов.

Все интерфейсы NS thingenix доступны в виде открытых API для интеграции со внешними системами. Сетевой сервер устанавливается на любые серверы под управлением ОС Linux и использует доступные компоненты с открытым исходным кодом. NS thingenix обеспечивает поддержку классов A и C.

### Сервер приложений

Сервер приложений (Application Server, AS) представляет собой в общем случае просто приложение, которое работает с данными оконечных узлов и взаимодействует с ними через NS. Именно таким образом реализуется общее управление сетью и декодирование сообщений.

Входящий в комплект программного обеспечения NS thingenix встроенный сервер приложений обеспечивает, при необходимости, декодирование данных, получаемых от устройств, и их передачу в информационные системы с использованием REST, WebSocket или MQTT. На рис. 3 показано рабочее окно Network Server NS Thingenix [1].

### Шлюзы

Шлюзы (Concentrator/Gateway, CG) функционально являются базовыми станциями сети LoRa, обеспечивающими радиобмен

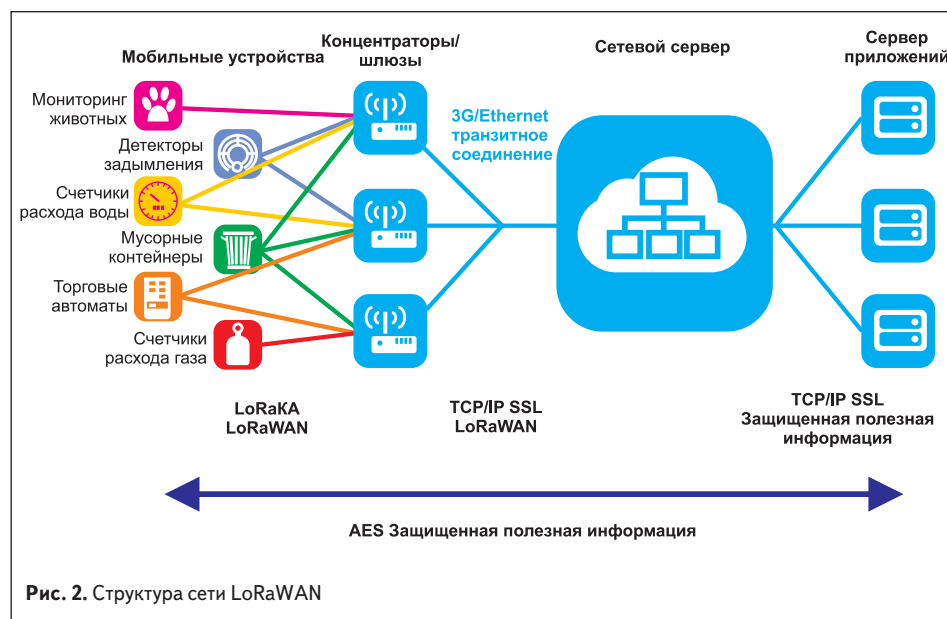


Рис. 2. Структура сети LoRaWAN

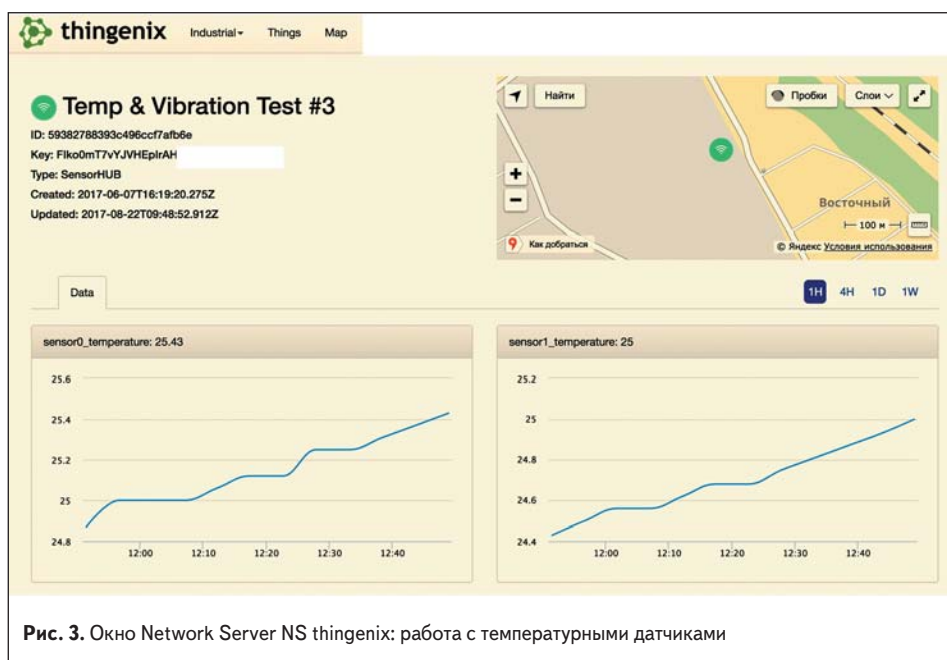


Рис. 3. Окно Network Server NS thingenix: работа с температурными датчиками

с оконечными устройствами. В процессе работы шлюзы принимают из эфира радиопакеты LoRa, которые они в состоянии обработать, и перенаправляют их на сетевой сервер. По командам NS они передают необходимые радиопакеты по заданному расписанию. В силу, как правило, невысоких требований к полосе пропускания, для подключения шлюза к Интернету могут быть также использованы существующие сети 3G/LTE.

Шлюз производства «Тингеникс» CG thingenix работает под управлением высокопроизводительного процессора ARM. В качестве основы структуры блок-схемы CG thingenix использован комплект специализированных микросхем Semtech SX1301/SX1257. Операционная система ОС Linux принята в качестве среды управления.

Корпус шлюза, обеспечивающий защиту от влаги и пыли в соответствии со стандартом IP67, позволяет размещать устройства на открытом воздухе. Встроенные датчики температуры и влажности дают возможность постоянного контроля условий эксплуатации прибора.

Конструкция шлюза позволяет осуществлять монтаж на стену или на мачту. В комплектацию входит всенаправленная антенна с коэффициентом усиления 9 дБи (дБ относительно изотропного излучателя) и внешняя антенна GPS. Дополнительно в конструкцию шлюза может быть установлен модуль 3G/LTE для подключения через мобильные сети связи.

Основные технические характеристики шлюза CG thingenix:

- чувствительность до  $-138$  дБ;
- мощность передатчика до  $+20$  дБ;
- всенаправленная антенна 9 дБи;
- встроенный GPS-приемник;
- питание PoE IEEE 802.3af;
- герметичный разъем RJ45;
- уровень защиты от влажности IP67;
- возможность удаленного управления и мониторинга;

- диапазон рабочих температур  $-40...+60$  °С.

### Конечные мобильные и стационарные устройства

Конечные мобильные и стационарные устройства (End Nodes) представляют собой различного рода интеллектуальные и пассивные исполнительные механизмы и сенсоры, контролируемые сетью LoRaWAN.

В отличие от технологий UNB (Sigfox, «СТРИЖ»), сети LoRaWAN обеспечивают надежную двустороннюю связь между конечными и управляющими устройствами. Конечное устройство, являющееся инициатором начала связи, отправляет серверу стартовый пакет и переходит в режим ожидания ответа. В свою очередь сервер в случае необходимости может передавать команды управления конечному устройству.

В сетях LoRaWAN регламентируются три класса конечных мобильных устройств:

- Двухнаправленные конечные устройства класса А (Bi-directional end-devices, Class A, all) — это наиболее энергоэффективные датчики или актуаторы с батарейным

питанием и неограниченным временем ожидания выхода в эфир, принимающие данные только после запроса серверу.

- Двухнаправленные конечные устройства класса В (Bi-directional end-devices, Class B, beacon) — устройства с батарейным питанием, принимающие и передающие данные в окна, заданных по расписанию.
- Двухнаправленные конечные устройства класса С (Class C, continuous) — устройства с внешним стационарным питанием, которые всегда находятся в режиме приема в промежутках между своими передачами, а также способные поддерживать возможность групповой рассылки (multicast).

В настоящее время «Тингеникс» выпускает следующие типы оконечных устройств LoRaWAN:

- многоцелевой сенсорный концентратор Sensor HUB LoRaWAN thingenix с поддержкой более 20 различных сенсоров;
- шлюз для подключения к сетям LoRaWAN устройств с интерфейсом CAN;
- шлюз для подключения к сетям LoRaWAN устройств с интерфейсом RS-485;
- универсальный встраиваемый радиомодуль для подключения внешних интеллектуальных электрических счетчиков и иных устройств к сети LoRaWAN;
- малогабаритный счетчик импульсов со встроенным портом RS232 и сухими контактами.

### Многоцелевой сенсорный концентратор Sensor HUB

Sensor HUB (рис. 4) предназначен для построения систем сбора показателей различных датчиков, таких, например, как датчики концентрации различных газов, температуры и влажности, вибрации, шума, освещенности, температуры, влажности и влагоемкости почвы, давления жидкостей и т. д. Возможно подключение до четырех датчиков в любой комбинации. При этом все датчики платформы могут подключаться в режиме Plug & Play без какой-либо дополнительной конфигурации или перезагрузки устройства. Питание устройства может осуществляться как от сети 220 В, так и от встроенного аккумулятора или с использованием солнечных батарей. Сенсорная платформа Sensor HUB соответствует спецификации LoRaWAN класс А и поддерживает подключение к сети в режиме OTAA или ABP. При этом обеспечивается удаленное изменение параметров конфигурации, таких, например, как частота передачи показаний, передача пакетов с подтверждением или без, и др.

Корпус прибора соответствует классу защиты от влаги IP67. Диапазон рабочих температур  $-40...+85$  °С.

### Интеллектуальные датчики LoRaWAN thingenix

Интеллектуальные датчики LoRaWAN thingenix — это согласованные с универсальной сенсорной платформой Sensor HUB промышленные датчики для определения давления и температуры, датчики содержания влаги в почве, а также измеритель-



Рис. 4. Внешний вид многоцелевого сенсорного концентратора Sensor HUB



ные устройства для контроля загрязнения воздуха.

В настоящее время доступны следующие типы датчиков:

- промышленный 3D-вибродатчик с подержкой виброспектрографии;
- промышленный датчик для измерения температуры различных поверхностей и жидкостей;
- датчик влажности почвы;
- датчик содержания мелкодисперсных частиц в воздухе PM2.5 (2,5 мкм) и PM10 (10 мкм);
- датчики определения содержания в воздухе токсичных газов:
  - CO (монооксид углерода) 0–500 ч/млн;
  - CO<sub>2</sub> (диоксид углерода) 0–5000 ч/млн;
  - SO<sub>2</sub> (диоксид серы) 0–20 ч/млн;
  - NO<sub>2</sub> (диоксид азота) 0–20 ч/млн;
  - NO (монооксид азота) 0–250 ч/млн;
  - NH<sub>3</sub> (аммиак) 0–100 ч/млн.

Промышленный 3D-вибродатчик (рис. 5) обеспечивает трехмерный контроль толчков, колебаний и ударов в диапазоне 0–16г с частотой до 1000 Гц. Датчик подключается к сети LoRaWAN через концентратор Sensor HUB. Он размещен в герметичном ударопрочном корпусе со встроенным неодимовым магнитным креплением.

Промышленный датчик для измерения температуры различных поверхностей и жидкостей (рис. 6) предназначен для работы в диапазоне температур –55...+125 °С.

Датчик влагоемкости почвы (рис. 7) предназначен для определения влагоемкости почвы в диапазоне 0–200 кПа. Эти датчики могут быть использованы в сельском хозяйстве для систем точного земледелия.

Эти датчики не требуют конфигурирования при подключении, поскольку их калибровка проводится непосредственно на производстве.

Следует отметить, что все датчики газов распознаются и конфигурируются платформой Sensor HUB автоматически. При этом никаких дополнительных действий пользователя не требуется. Датчики можно подключать и отключать без выключения питания или перезагрузки платформы Sensor HUB.

Кроме перечисленных выше, поддерживаются и другие датчики — такие, например, как:

- промышленный для измерения давления жидкостей;
- ультразвуковой расстояния/уровня;
- освещенности;
- направления и скорости ветра;
- температуры и влажности атмосферного воздуха;
- атмосферного давления.

«Тингеникс» также осуществляет интеграцию сторонних датчиков с платформой Sensor HUB. Дополнительная информация о продукции фирмы будет опубликована в следующих номерах журнала.

### Шлюз RS-485 LoRaWAN

Шлюз RS-485 LoRaWAN (рис. 8) предназначен для сбора информации с устройств, подключенных к шине RS-485, с использованием различных протоколов и передачи собранной

информации через сеть LoRaWAN. Шлюз поддерживает протоколы ModBus, а также специальные протоколы электросчетчиков «Меркурий» и «Энергомера». Питание осуществляется от сети переменного тока, а также от шины RS-485.

Прибор имеет цифровой вход (сухие контакты), предназначенный для подключения внешнего датчика, который можно использовать, например, для контроля несанкционированного доступа. Для управления можно использовать режим удаленного конфигурирования.

Шлюз выполнен в конструкции для монтажа на стандартную DIN-рейку. Внешний разъем для подключения антенны SMA позволяет установить антенну непосредственно на устройство или подсоединить через удлинительный кабель.

Встроенный резервный источник дает возможность контролировать потерю основного электропитания.

### Шлюз CAN LoRaWAN

Шлюз CAN LoRaWAN позволяет производить сбор информации с устройств, подключенных к шине CAN, с использованием различных протоколов и осуществлять передачу собранной информации через сеть LoRaWAN. В качестве одного из примеров типовых применений адаптера CAN можно привести сбор и передачу показаний от нескольких счетчиков электроэнергии. В базовой конфигурации шлюз поддерживает протоколы электросчетчиков «Меркурий». Кроме того, существует возможность поддержки других нестандартных протоколов.

Питание шлюза осуществляется от сети 220 В. Возможно питание устройств, подключенных к шине CAN напряжением 5 В.

В остальном функциональные характеристики этого устройства совпадают с отмеченными выше для шлюза RS-485.

### Счетчик импульсов PC-LoRaWAN thingenix

Счетчик импульсов PC-LoRaWAN thingenix — это конечное устройство для сетей LoRaWAN, позволяющее собирать показания с любых счетчиков с импульсным выходом и передавать эту информацию по сети LoRaWAN. Кроме того, это устройство может транслировать на центральный сервер текущее состояние дискретных датчиков (сухой контакт). Этот универсальный адаптер поддерживает подключение к сети LoRaWAN в режиме OTAA или ABP. В каждом пакете передается текущее показание счетчиков или состояние датчиков, а также уровня заряда элементов питания и температуры внутри корпуса.

Отличительной особенностью счетчика импульсов является крайне низкое энергопотребление. Срок работы от одного литиевого элемента питания ER14505M может составлять до пяти лет в зависимости от частоты передачи показаний датчика.

В набор стандартных опций входит удаленное изменение параметров конфигурации (частота передачи показаний, передача пакетов с подтверждением или без, задержки при об-



Рис. 5. Промышленный 3D-вибродатчик для платформы Senso rHUB



Рис. 6. Промышленный температурный датчик для работы в сетях LoRaWAN



Рис. 7. Датчик влагоемкости почвы



Рис. 8. Внешний вид шлюза RS-485 LoRaWAN thingenix

работке импульсов, режим работы счетчик/датчик). Этот счетчик импульсов соответствует спецификации LoRaWAN 1.0.2 и поддерживает функции ADR.

### Универсальный радиомодуль

Универсальный встраиваемый радиомодуль для подключения внешних интеллектуальных электрических счетчиков к сети LoRaWAN предназначен для работы с электросчетчиками, выпускаемыми ведущими российскими производителями. Он относится к двунаправленным конечным устройствам LoRaWAN класса С и может работать как с однофазными (4 тарифа), так и с трехфазными (8 тарифов) счетчиками электрической энергии. Модуль встраивается, например, в счетчики производства завода СПб-ЗИП, которые соответствуют требованиям ГОСТ 31818.11-2012 и ГОСТ 31819.21-2012. После предварительной квалификации модуль можно использовать со счетчиками и других производителей.

### Заключение

К отличительным особенностям сетей LoRaWAN можно отнести гибко перестраиваемые значения скоростей передачи данных и выходной мощности устройств, частотное разделение каналов и возможность демодулирования сигналов в одном частотном канале на разных скоростях.

Основным преимуществом LoRa является простота реализации на физическом уровне РНУ мобильного устройства сложного модулированного сигнала, который может надежно транслироваться на большие расстояния при наличии больших помех.

Для организации сетей LoRaWAN необходимо специальное оборудование в виде шлюзов, играющих роль, сходную с ролью базовых станций в сетях 2G/4G.

В условиях городской застройки один шлюз покрывает область с радиусом около 3 км. На открытой местности в зоне прямой видимости радиус действия LoRaWAN может достигать 15–20 км. Один такой шлюз может обслуживать несколько десятков тысяч конечных устройств — в зависимости от количества сообщений в единицу времени.

Концепция LoRa оптимальным образом сочетает в себе такие свойства, как лицензионный диапазон, открытость стандарта, а также доступность оборудования и конечных устройств.

В заключение статьи целесообразно обратить внимание на следующие отличительные черты, характеризующие «Тингеникс». Модульность и открытость программных и аппаратных решений позволяет использовать продукцию компании как в виде законченного, полностью готового к использованию продукта, так и в качестве отдельных элементов, позволяющих пользователю создавать свои собственные системы с минимальными затратами

и в минимальные сроки. Приборы «Тингеникс» могут быть использованы как для построения сетей операторского класса, так и для корпоративных сетей. Последнее в ряде случаев является более привлекательным для крупных производственных компаний. Особенно следует подчеркнуть, что относительная простота развертывания и экономичная цена комплектующих позволяет быстро создавать сети LoRa и организовывать передачу данных в тех местах, где отсутствует инфраструктура мобильных операторов связи, — таких, например, как удаленные площадки, карьеры открытой разработки, сельскохозяйственные угодья, вахтенные станции, месторождения газа, нефти и полезных ископаемых и т. д. Важно то, что все эти площадки могут управляться централизованно из облачного сервиса.

Для пользователей, которые не знакомы с особенностями технологий LPWAN, фирма «Тингеникс» предлагает полностью законченные решения, которые будут сопровождать квалифицированные специалисты, имеющие большой опыт проектирования и создания таких сетей. ■

### Литература

1. [www.thingenix.com/](http://www.thingenix.com/)
2. <https://cdn.instructables.com/F9U/TTJX/18YBOW01/F9UTTJX18YBOW01.MEDIUM.jpg>
3. [www.atim.com/wp-content/media/img/fr/techno/lorawan/loran\\_network.png](http://www.atim.com/wp-content/media/img/fr/techno/lorawan/loran_network.png)

**thingenix**  
КОРПОРАТИВНЫЕ  
IoT СЕТИ

**LoRa**<sup>®</sup>

**3GPP**  
A GLOBAL INITIATIVE

<http://www.thingenix.com>  
[info@thingenix.com](mailto:info@thingenix.com)  
+7 495 150 3748

### НОВОСТИ

#### Тестер ARF8124AA сетей стандарта LoRaWAN от Adeunis RF для частот 902–928 МГц



Компания Adeunis RF представила устройство тестирования ARF8124AA сетей стандарта LoRaWAN на частотах 902–928 МГц, которое позволяет осуществлять оперативную проверку параметров работы сети.

Компактное устройство LoRaWAN Field Test Device предназначено для контроля сетей, использующих протокол LoRaWAN V1.0. Тестер способен передавать, принимать, мгновенно просматривать радиопакеты

и может быть применен для проверки сетей беспроводных датчиков, оборудования интеллектуальных зданий, измерительных устройств, систем безопасности и межмашинного взаимодействия.

На ЖКИ-экране отображается вся операционная информация (GPS-координаты, температура, уровень заряда батареи) и данные о работе сети (состояние канала к хосту, к устройствам, используемый коэффициент расширения, коэффициент ошибок пакетов и т. п.). Интегрированный модуль GPS оптимизирует операции геолокации. Встроенный аккумулятор позволяет работать тестеру в автономном режиме до 10 ч.

Основные особенности тестера ARF8124AA:

- вес 150 г;
- дальность связи: до 25 км;
- диапазон рабочих температур: –20...+75 °С;
- потребляемая мощность: до 100 мВт;
- протокол сети: LoRaWAN V1.0;
- класс устройства сети: А и С;
- интегрированный высокоточный модуль GPS;
- интегрированная батарея и возможность подзарядки устройства;
- веб-приложение.

[www.icquest.ru](http://www.icquest.ru)

# Перспективы технологий LTE для IoT

## и их реализация в модулях Telit

Согласно данным авторитетных исследовательских центров, в ближайшие годы технология LTE будет развиваться наиболее быстрыми темпами и станет, вероятно, основным вариантом беспроводной передачи данных «Интернета вещей» (Internet of Things, IoT) через сети сотовой связи. Следуя этим тенденциям, компания Telit в настоящее время развивает линейку модулей LTE пониженных категорий в двух форматах — xE866 и xE910.

**Алексей Рудневский**  
rudnevsky.a@atoma.spb.ru

История развития сотовой связи насчитывает на сегодня четыре поколения, называемых условно 1G–4G. Первое поколение базировалось на аналоговых принципах и практически не использовалось для передачи данных и межмашинного обмена (M2M). Начиная же с сетей второго поколения (включающего стандарты GSM/GPRS и CDMA) передача данных стала использоваться все активнее год от года. На рис. 1 показана динамика количества подключений к мобильным сетям

второго, третьего и четвертого поколений (вне зависимости от типа подключения, данные GSMA [1]) и на этом фоне количество подключений именно M2M/IoT-устройств по всем технологиям суммарно (данные ABI Research [2]). Из данного графика можно сделать несколько выводов.

Эра сетей второго поколения постепенно идет к закату. В США и Австралии эти сети уже активно сворачиваются, в других странах развитие GSM/GPRS (а именно GSM в итоге стал доминирующим стандартом второго поколения) практически прекращается. Вместе с тем европейские компании не планируют закрывать сети GSM как минимум до 2025 г. Поскольку общее число подключений падает, частоты GSM будут подвергаться рефармингу в 3G/4G. С другой стороны, количество подключений M2M в сетях GSM/GPRS будет падать (и то незначительно) только в США (табл. 1 [2]). Во всех остальных регионах динамика числа подключений M2M в ближайшие годы ожидается положительная, то есть налицо тенденция замещения части «живых» потребителей устройствами IoT. Это можно объяснить как хорошим покрытием существующих сетей, так и сильным падением цен на чипсеты и модули GSM/GPRS.

Сети третьего поколения на североамериканском континенте пока не сворачиваются, но развитие их прекращено. Это отражается и на количестве подключений M2M (табл. 2 [2]). В США и Канаде среднегодовой прирост подключений ожидается близким к нулю, в то время как в других странах и в мире в целом этот прирост будет находиться на уровне 30–40%. Причиной такого роста, по-видимому, являются большие вложения в инфраструктуру 3G, которые были сделаны как производителями оборудования, так и операторами сетей сотовой связи. В более отдаленной перспективе (в середине 2020-х годов) рост прекратится в связи с бурным развитием сетей LTE.

Предыдущий тезис подтверждает данные из табл. 3 [2], где показано количество

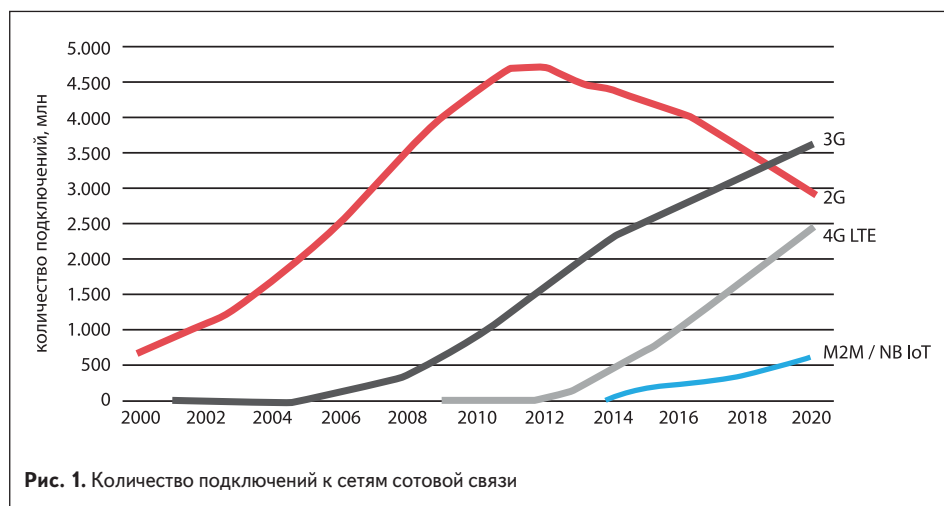


Рис. 1. Количество подключений к сетям сотовой связи

Таблица 1. Динамика подключений M2M в сетях GSM/GPRS [млн]

Регион	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Средний прирост за 2016–2021 гг.
Северная Америка	14,07	14,82	14,62	15,17	14,86	13,43	11,69	10,19	-1%
США	12,67	13,28	13,08	13,57	13,23	11,93	10,41	9,07	-1%
Канада	1,40	1,59	1,54	1,60	1,62	1,50	1,29	1,12	1%
Европа	49,48	55,80	62,82	72,04	82,90	94,03	106,11	120,48	14%
Азиатско-Тихоокеанский регион	30,85	39,93	49,92	60,52	71,74	82,26	94,51	111,53	22%
Латинская Америка	18,03	19,58	20,29	21,24	22,03	22,61	23,35	24,68	5%
Ближний Восток и Африка	6,58	7,14	7,64	8,20	8,88	9,76	10,88	12,39	8%
Всего	119,00	137,32	155,29	177,16	200,41	222,09	246,55	279,27	13%

подключений IoT в сетях 4G. Здесь мы видим однозначный существенный рост во всех регионах мира, причем темпы этого роста таковы, что в 2021 г. количество M2M-подключений в LTE-сетях превысит суммарное количество подключений в сетях предыдущего поколения. Исходя из этого на среднесрочную перспективу альтернативы LTE для беспроводной передачи данных IoT через сети сотовой связи нет.

Развитие IoT ставит перед разработчиками модулей беспроводной передачи данных весьма сложные и противоречивые задачи:

- минимизация энергопотребления, что должно позволить устройствам работать от одной батареи до нескольких лет;
- максимально эффективное использование частотного спектра для обеспечения стремительного роста подключений IoT;
- большая плотность размещения устройств IoT (до 1 млн на 1 км<sup>2</sup>);
- широкая зона покрытия, возможность передачи информации изнутри помещений;
- возможность использования инфраструктуры существующих сетей сотовой связи при минимуме их модернизации;
- низкая стоимость модулей передачи данных, сравнимая с ценой современных модулей GSM/GPRS.

Вместе с тем перед конечными устройствами IoT не ставится задача скоростной передачи данных (скорость 100–200 кбит/с, как правило, достаточна), а также нет жестких требований к скорости реакции на события — в большинстве случаев передача данных в течение десятков секунд после события вполне приемлема. Кроме того, значительная часть устройств IoT размещается стационарно либо имеет ограниченную мобильность.

Исходя из этих, а также ряда других требований, консорциум 3GPP стандартизовал три основные технологии с лицензированным использованием спектра:

- LTE категории M1 (eMTC) — эволюционное развитие LTE, оптимизированное под IoT. Первая версия MTC появилась в 3GPP rel. 12 и получила свое развитие в rel. 13. В 14 релизе планируется поддержка позиционирования, групповое вещание, улучшение мобильности, увеличение скорости передачи данных, а также расширение циклов энергосбережения (C-DRX и I-DRX).
- NB IoT (Narrow Band IoT) — технология узкополосного (шириной 180 кГц) радиointерфейса. Стандартизация начата в rel. 13 3GPP и продолжается по сей день. В планах развития — позиционирование, групповое вещание, снижение энергопотребления и излучаемой мощности, сокращение задержки распространения информации и расширение циклов энергосбережения.
- EC-GSM представляет собой эволюцию сетей GSM с прицелом на использование в IoT. Технология была стандартизована в rel. 13 3GPP, но до сих пор не получила серьезной поддержки производителей как сетевого оборудования, так и оконечных устройств. Причинами, по-видимому, являются менее эффективное использование частотного спектра, наименьшая скорость передачи данных, а также ограниченный

частотный ресурс сетей GSM. В дальнейшем наработки по EC-GSM будут использованы для развития NB IoT.

В таблице 4 приведены сравнительные характеристики технологий передачи данных для IoT в лицензированных диапазонах, основанные на 3GPP rel. 13 [3].

Из рассмотрения таблицы 4 видно, что преимуществами LTE Cat M1 являются более высокая скорость передачи данных, а также мобильность, что позволит использовать устройства на базе eMTC для мониторинга движущихся объектов. Относительными недостатками являются меньшая зона покрытия (по сравнению с NB IoT) и достаточно широкий частотный диапазон (1,08 МГц), что требует выделения таким устройствам отдельных ресурсных блоков. NB IoT же имеет лучшее

покрытие и существенно меньшую полосу, позволяющую использовать защитные интервалы и тем самым никак не влияя на емкость LTE-сети при работе с повышенными категориями. Кроме того, некоторые производители оборудования анонсировали, что модернизация сетей LTE для работы с NB IoT потребует лишь обновления программного обеспечения, что существенно менее затратно для операторов. Минусом же NB IoT, в свою очередь, является ограниченная мобильность

Промежуточные итоги «борьбы» LTE Cat M1 и NB IoT показаны на рис. 2 [4]. Как видим, большинство операторов связи в мире пока остановились на NB IoT, хотя ряд операторов рассматривают и возможность использования обеих технологий. Применительно к России, операторы «большой тройки» тестируют NB IoT,

Таблица 2. Динамика подключений M2M в сетях WCDMA [млн]

Регион	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Средний прирост за 2016–2021 гг.
Северная Америка	15,12	24,05	30,14	34,93	36,86	34,27	32,27	30,91	1%
США	13,89	22,18	27,85	32,32	34,11	31,62	29,69	28,45	0%
Канада	1,24	1,87	2,29	2,61	2,76	2,65	2,59	2,46	1%
Европа	6,46	9,41	13,62	19,74	27,94	37,90	50,40	65,80	37%
Азиатско-Тихоокеанский регион	5,41	8,48	12,75	19,23	28,36	40,75	57,36	82,53	45%
Латинская Америка	1,72	2,28	2,92	3,56	4,49	5,69	8,31	9,62	27%
Ближний Восток и Африка	0,74	1,17	1,55	1,83	2,41	3,17	4,44	5,56	29%
Всего	29,46	45,39	60,98	79,30	100,07	121,78	152,80	194,41	26%

Таблица 3. Динамика подключений M2M в сетях LTE [млн]

Регион	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Средний прирост за 2016–2021 гг.
Северная Америка	4,84	16,72	35,16	59,69	94,58	141,74	210,97	347,38	58%
США	4,54	16,31	34,12	57,67	91,15	135,52	199,70	325,47	57%
Канада	0,30	0,41	1,04	2,02	3,43	6,42	11,27	21,91	84%
Европа	0,14	0,29	0,97	2,00	4,96	12,35	29,36	71,47	137%
Азиатско-Тихоокеанский регион	0,70	1,67	4,54	9,49	17,72	31,57	58,31	115,38	91%
Латинская Америка	-	-	-	0,01	0,15	0,62	1,96	6,84	-
Ближний Восток и Африка	-	-	-	0,01	0,06	0,14	0,27	0,44	-
Всего	5,68	18,68	40,67	71,21	117,47	186,42	300,87	541,51	68%

Таблица 4. Сравнение технологий передачи данных IoT

Характеристики	LTE Cat M1 (eMTC)	NB IoT	EC-GSM
Сценарий развертывания	В полосе лицензируемых частот LTE (in-band)	Три варианта (in-band LTE, guard-band LTE, standalone)	Только на частотах GSM (standalone)
Покрытие*, дБм	155,7	164	164
Радиус действия, км	До 11	До 15	До 15
Ширина полосы	1,08 МГц	180 кГц	200 кГц на канал, типичная полоса 2,4 МГц
Виды доступа и модуляции при передаче вверх	SC-FDMA-доступ, модуляция 16QAM	FDMA-доступ с GMSK-модуляцией и SC-FDMA-доступ с одностотной несущей	TDMA/FDMA, модуляция GMSK или 8PSK
Виды доступа и модуляции при передаче вниз	OFDMA-доступ с разносом поднесущих 15 кГц, модуляция 16QAM	OFDMA-доступ с разносом поднесущих 15 кГц	TDMA/FDMA, модуляция GMSK или 8PSK
Скорость передачи данных (макс.)	1 Мбит/с	200 кбит/с	70 кбит/с
Режим работы	Дуплекс, полудуплекс	Полудуплекс	Полудуплекс
Мобильность объекта	Допускается	Ограничена	Ограничена
Режимы энергосбережения	PSM, I-DRX, C-DRX	PSM, I-DRX, C-DRX	PSM, I-DRX
Излучаемая мощность, дБм	23 и 20	23	33 и 23
Необходимость модернизации сети	Требуется	Для ряда производителей требуется только обновление ПО	Требуется

\* Минимальные потери при затухании (Minimal Coupling Loss, MCL)

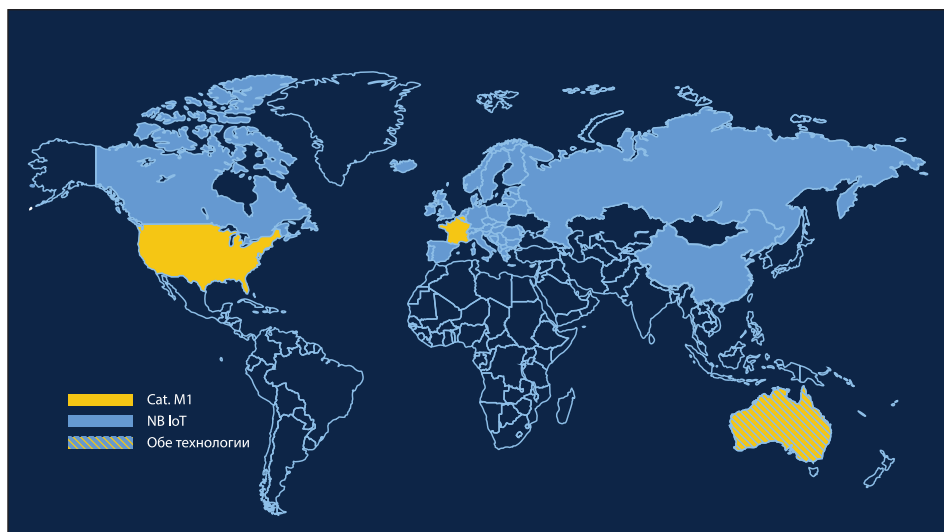


Рис. 2. Распространение сетей NB IoT и eMTC в мире

и запуски первых коммерческих сетей ожидаются в 2018 г.

Компания Telit, как ведущий производитель модулей беспроводной передачи данных для IoT, чутко отслеживает все тенденции рынка и предлагает своим потребителям наиболее актуальные на текущий момент времени решения. Следуя собственным традициям «один форм-фактор — множество технологий», Telit приняла решение развивать линейку модулей LTE пониженных категорий в двух форматах — xE866 и xE910.

xE866 — самая малогабаритная линейка модулей передачи данных Telit [5]. Модули разных технологий имеют фиксированную ширину 15 мм, а длина может варьироваться от 19 до 25 мм, причем модуль меньшего размера может быть легко установлен на то же место, где использовался модуль большего

размера. Для IoT компания выпустила модули NB IoT NE866 (рис. 3) для европейского рынка и eMTC ME866 для США.

xE910 — самая широкая линейка Telit. В ней представлены модули практически всех современных технологий сотовой связи, от GSM и CDMA до LTE как скоростных, так и пониженных категорий [6]. Для M2M/IoT-приложений также есть модули NB IoT (NE910) и eMTC (ME910, рис. 4). Габариты модулей этой серии несколько больше — 28×28 мм, но при этом и функционал более широкий. В частности, имеются модификации с поддержкой GSM/GPRS, GPS/ГЛОНАСС, возможность написания собственных приложений AppZone C [8], а также есть двухстандартный модуль eMTC/NB IoT. Последний может быть особенно интересен, поскольку технологией eMTC заинтересовались как некоторые ев-

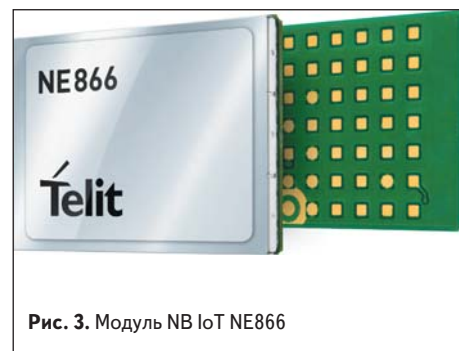


Рис. 3. Модуль NB IoT NE866

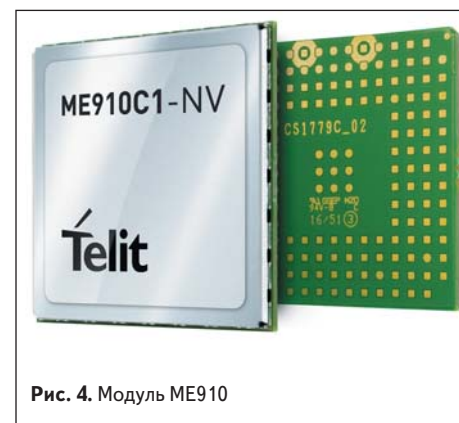


Рис. 4. Модуль ME910

ропейские, так и отечественные операторы. В рамках Mobile World Congress в Барселоне Telit продемонстрировала успешную работу модуля ME910C1 в режиме eMTC в испанской сети Telefonica в диапазоне B20 [7].

В таблице 5 приведено сравнение основных характеристик модулей NB IoT и eMTC.

Таким образом, модули передачи данных для IoT не только полностью удовлетворяют обязательным требованиям 3GPP rel. 13, но и предлагают новые функциональные возможности, что еще раз подтверждает статус Telit как инновационной компании и лидера рынка IoT. Использование решений Telit позволит всегда быть на пике технологий, что весьма важно при нынешней динамике их развития. ■

## Литература

1. [www.iotthingsmilan.com/wp-content/uploads/2017/05/Mursia.pdf](http://www.iotthingsmilan.com/wp-content/uploads/2017/05/Mursia.pdf)
2. [www.abiresearch.com/market-research/product/1022977-cellular-m2m-connectivity-services/](http://www.abiresearch.com/market-research/product/1022977-cellular-m2m-connectivity-services/)
3. Тихвинский В. О., Бочечка Г. С. Перспективы внедрения технологии узкополосной передачи данных NB IoT в сетях LTE // Электросвязь. 2016. № 8.
4. [http://images.tmcnet.com/expo/iot-evolution/presentations/florida17/TTR-01-1030\\_Tech\\_Track\\_BEDNASZ.pdf](http://images.tmcnet.com/expo/iot-evolution/presentations/florida17/TTR-01-1030_Tech_Track_BEDNASZ.pdf)
5. Рудневский А. Новая концепция унификации Telit: «гнездовая» система в семействе xE866 // Беспроводные технологии. 2016. № 2.
6. Рудневский А. Telit xE910: один дизайн — множество применений // Беспроводные технологии. 2013. № 2.
7. [www.telit.com/press-media/press-releases/press-details/item/telit-to-demonstrate-live-cat-m1-network-applications-at-mobile-world-congress/](http://www.telit.com/press-media/press-releases/press-details/item/telit-to-demonstrate-live-cat-m1-network-applications-at-mobile-world-congress/)

Таблица 5. Характеристики модулей IoT компании Telit

Параметр	NE866	ME866	NE910	ME910
Технология	NB IoT	eMTC	NB IoT	eMTC
Габариты, мм	15×19	15×25	28×28	28×28
Чипсет	Neul/HiSilicon	Altair	MDM9206	MDM9206
Диапазоны	B8/B20	B4/B13 B2/B4/B12	B8/B20	B2/B4/B12/B13 (Cat M1)
				B3/B8/B20 (Cat M1/NB IoT)
				B3/B28 (Cat M1/NB IoT)
GPS/ГЛОНАСС	-	-	Опционально	Опционально
GSM/GPRS	-	-	-	В разработке
Встроенный SIM-чип	+	-	-	-
VoLTE	-	-	-	+
AppZone	-	-	В разработке	В разработке
UART	+	+	+	+
USB	-	-	+	+
TCP V4/V6	Только V4	Только V4	V4/V6	V4/V6
TCP/UDP	Только UDP	TCP/UDP	TCP/UDP	TCP/UDP
Энергопотребление в различных режимах				
PSM	7 мкА	н/д	н/д	7 мкА
eDRX	1 мА	н/д	н/д	0,9 мА
Передача (0 dBm)	90 мА	н/д	н/д	130 мА
Передача (23 dBm)	195 мА	н/д	н/д	190 мА
Прием	100 мА	н/д	н/д	100 мА

# Руководство по инициализации подключения к Wi-Fi для устройств из мира IoT

**Wi-Fi — наиболее широко распространенная на сегодня технология беспроводного подключения к сети. Став стандартной функцией всех переносных компьютеров, смартфонов и планшетов, Wi-Fi завоевывает бытовые приборы, термостаты и многие другие устройства автоматизации жилищ и зданий, заполняющие бурно развивающийся «Интернет вещей» (IoT). Простая и надежная инициализация подключения к сети устройств IoT, которые не имеют клавиатуры и дисплея в качестве пользовательского интерфейса, представляет собой достаточно сложную задачу. В статье рассматриваются основные имеющиеся на рынке способы инициализации подключения к Wi-Fi, даны рекомендации по правильному выбору способа подключения устройств.**

**Джил Рейтер (Gil Reiter)**

## Что такое инициализация подключения к Wi-Fi?

Процесс подключения нового устройства Wi-Fi (станции) к сети Wi-Fi — это и есть инициализация. Данный процесс предполагает загрузку в станцию имени сети (часто его называют SSID — идентификатор набора служб) и ее учетных данных безопасности. Стандарт безопасности Wi-Fi проводит различие между персональной безопасностью, используемой, в основном, в домах и на небольших предприятиях, и корпоративной безопасностью, политики которой применяются в больших офисах и кампусах. В случае корпоративной безопасности инициализация станции обычно предполагает установку сертификатов, используемых для проверки целостности станции и сети путем взаимодействия с сервером безопасности, находящимся под управлением ИТ-отдела. С другой стороны, персональную безопасность Wi-Fi должны обеспечивать сами пользователи у себя дома, и это предполагает просто ввод заданного пароля. Чтобы надежно обеспечить безопасность, пароль может иметь длину до 64 символов.

В статье мы ограничимся персональной безопасностью сети Wi-Fi и задачей простой загрузки пользователем имени сети и пароля в Wi-Fi-станцию IoT.

## Задача инициализации беспроводного подключения в устройствах IoT

Технология Wi-Fi была создана для того, чтобы переносные устройства, такие как

ноутбуки, а позже и более продвинутые мобильные устройства, такие как сотовые телефоны и планшеты, могли подключаться к Интернету без проводов. Такие персональные девайсы по определению имеют дисплей и клавиатуру в качестве интерфейса пользователя. Например, обычная процедура подключения сотового телефона к Wi-Fi осуществляется через страницу настроек этого устройства. Телефон выполняет поиск сетей Wi-Fi и предоставляет пользователю список доступных. После того как сеть выбрана, пользователю предлагается ввести пароль. Если пароль введен правильно, инициализация подключения считается успешной и часто указывается значком Wi-Fi на панели состояния.

Если же говорить об устройствах IoT, трудность заключается в том, что многие из них не имеют дисплея и клавиатуры, а зачастую у них вообще нет никакого пользовательского интерфейса. Таким «безголовым» устройствам нужны другие способы получения имени сети и пароля от пользователя. Альтернативный способ подключения должен быть простым и надежным. В большинстве случаев он предполагает использование ПК, телефона или планшета в качестве расширенного интерфейса пользователя для IoT-устройства, который позволяет ввести информацию о сети с помощью дисплея и клавиатуры ПК, телефона или планшета.

Далее мы приведем краткий обзор широко распространенных на рынке способов инициализации подключения. Затем рассмотрим ключевые аспекты выбора правильных спосо-

бов инициализации и дадим рекомендации разработчику системы.

## Безопасная настройка Wi-Fi

Безопасная настройка беспроводной сети (Wi-Fi Protected Setup, или WPS) — единственный промышленный стандарт, существующий сегодня для подключения к сети «безголовых» устройств, т. е. устройств, как уже было сказано, не имеющих пользовательского интерфейса. Он был введен объединением крупнейших производителей компьютерной техники и беспроводных устройств Wi-Fi (Wi-Fi Alliance) в 2006 г. в качестве простого и безопасного способа инициализации подключения, не требующего знания имени сети и ввода длинных паролей. Этот стандарт устанавливает два обязательных варианта для точек доступа (ТД), поддерживающих WPS: с использованием персонального идентификационного номера (Personal Identification Number, PIN) или подключение нажатием кнопки (Push-Button-Connect, PBC).

В первом случае восьмизначный PIN печатается на стикере (рис. 1), на ТД либо на подключаемом устройстве. Пользователь должен прочесть этот PIN на устройстве, не имеющем клавиатуры, и набрать его на клавиатуре подключаемого устройства. Очевидный недостаток этого метода инициализации заключается в том, что он не работает, если отсутствует пользовательский интерфейс (как уже было сказано, нужна клавиатура, чтобы ввести PIN).

В случае PBC пользователь нажимает кнопку как на ТД, так и на подключаемом устройстве. Как только кнопка на ТД будет нажата, устройство, поддерживающее WPS, сможет свободно подключиться к сети в течение 2 мин. Недостаток этого способа, помимо отсутствия защиты в течение двухминутного периода, заключается в том, что пользователь должен иметь физический доступ к ТД. Если ТД находится в труднодоступном месте, этот способ может оказаться неудобным.

При использовании как PIN, так и PBC, ТД и подключаемое устройство обмениваются серией сообщений для установления временного защищенного соединения, которое используется для передачи SSID и пароля из ТД в подключаемое устройство.

Основная проблема стандарта WPS была вскрыта в 2011 г. Стефаном Фибекем (Stefan Viehböck) [1], который обнаружил, что в случае использования PIN можно получить сетевой пароль менее чем за четыре часа путем простого перебора. Поскольку использование PIN обязательно для получения сертификации WPS, все новые ТД, выпускаемые на рынок начиная с 2007 г., поддерживали этот способ по умолчанию. Более того, во многих ТД не была предусмотрена возможность отключения функций WPS.

Сразу же после того как была обнаружена эта прореха в защите, большинство поставщиков ТД рекомендовали отключить поддержку WPS, и, хотя большинство из них выпустили обновления своих изделий, предотвращающие взлом, стандарт WPS приобрел плохую репутацию в отрасли и некоторые страны до сих пор не используют его.



Рис. 1. Пример для варианта инициализации с использованием PIN: PIN WPS напечатан на точке доступа D-Link (слева), а кнопка подключения WPS находится на точке доступа Cisco (справа)

## Режим точки доступа

Режим точки доступа (AP) — наиболее широко применяемый сегодня способ подключения устройств, не имеющих пользовательского интерфейса. В режиме AP неподключенное (неинициализированное) устройство сначала запускается как ТД с SSID, который задан производителем оборудования. Прежде чем впервые попытаться подключиться к домашней сети, неинициализированное устройство создает свою собственную сеть, позволяя ПК или смартфону подключиться к ней напрямую, чтобы выполнить его начальное конфигурирование.

В этом режиме неинициализированное устройство включает в себя также встроенный веб-сервер. После того как пользователь подключит свой смартфон к ТД неинициализированного устройства, он открывает

веб-браузер смартфона и входит на веб-сайт устройства, используя заданный локальный URL или IP-адрес.

На встроенном веб-сайте пользователь выбирает (или вводит) имя домашней сети и пароль. Устройство сохраняет сетевые реквизиты в энергонезависимой памяти, а затем переходит из режима AP в режим станции, чтобы подключиться к домашней сети с использованием сохраненных сетевых реквизитов.

На рис. 2 показан снимок экрана iPad, на который выведена вкладка настройки микроконтроллера CC3200 семейства SimpleLink с интегрированным модулем Wi-Fi корпорации Texas Instruments (TI) с реализованного в микросхеме веб-сайта. Эта вкладка настройки дает пользователю возможность ввести SSID и ключ безопасности для нескольких профилей сети.

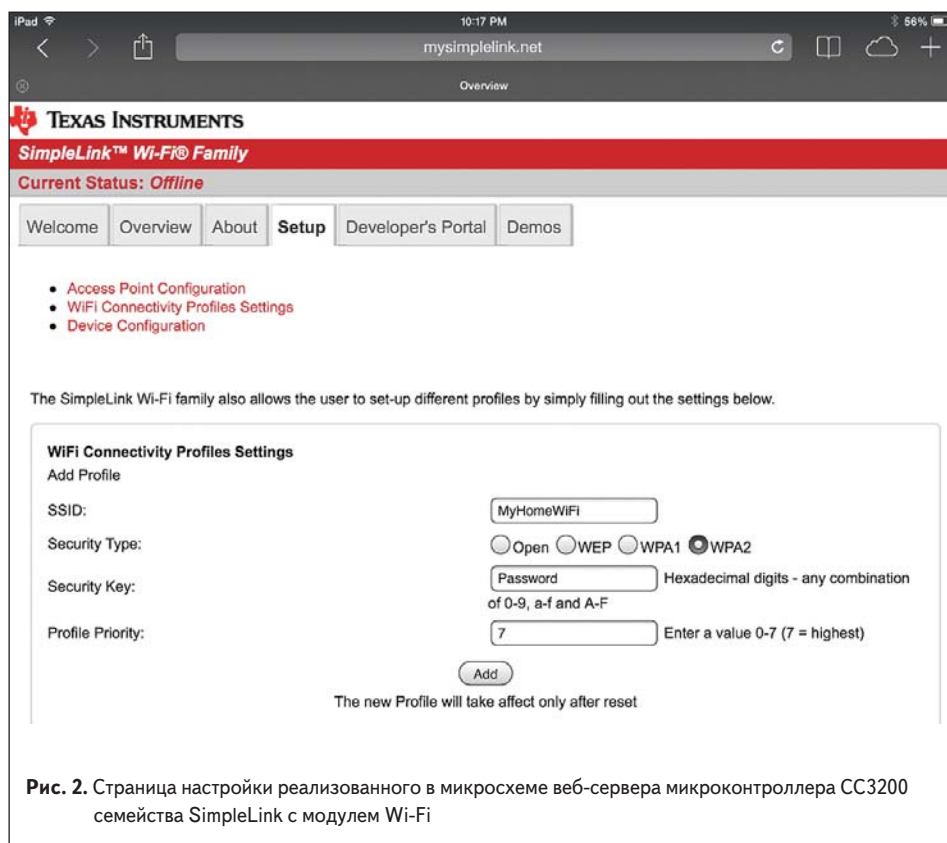


Рис. 2. Страница настройки реализованного в микросхеме веб-сервера микроконтроллера CC3200 семейства SimpleLink с модулем Wi-Fi

После того как конфигурирование будет завершено, микроконтроллер CC3200 (или CC3100) автоматически подключится к одной из доступных сетей на основании задаваемых пользователем приоритетов [2].

Основное преимущество подключения в режиме ТД заключается в том, что в нем используются стандартные возможности, которые имеются во многих смартфонах, планшетах и ПК. Еще одно преимущество — поставщики могут добавлять дополнительные параметры к встроенному веб-сайту для конфигурирования других функций устройства одновременно с регистрацией в сети Wi-Fi.

Для повышения безопасности на устройстве может использоваться кнопка для активации режима ТД, а для ее конфигурирования может использоваться заранее заданный пароль.

Недостаток режима AP заключается в том, что при подключении к конфигурационной сети AP неинициализированного устройства телефон отключается от домашней сети. Это может вызвать перерывы в передаче данных и привести к появлению сообщений об ошибках. На ПК, если активны Wi-Fi- и Ethernet-соединение, браузер может отдать приоритет Ethernet-соединению и не подключиться к неинициализированному устройству по Wi-Fi. Пользователь должен отключить Ethernet-соединение, прежде чем использовать инициализацию Wi-Fi в режиме AP (ТД).

Появившиеся недавно смартфоны проверяют, действительно ли сеть Wi-Fi подключена к Интернету. Если интернет-соединение прерывается (как это бывает, когда телефон соединяется с ТД неинициализированного устройства), эти смартфоны отключаются от сети Wi-Fi, а затем принудительно устанавливают соединение сотовой системы передачи данных. Заблокировать такое поведение телефона можно, но для этого требуются расширенные настройки

на странице конфигурации устройства, что усложняет пользование устройством для потребителя.

### Функция конфигурирования беспроводных устройств Apple

Функция конфигурации беспроводных устройств (Wireless Access Controller, WAC) — это лицензированная технология Apple MFi, предназначенная для принадлежностей MFi, которые подключаются к iPod, iPhone и iPad. Принадлежности MFi, поддерживающие WAC, можно легко сконфигурировать с помощью iPod, iPhone и iPad, при этом от пользователя не требуется вводить имя сети и пароль. Подробная информация о функции WAC доступна обладателям лицензий на разработку и изготовление устройств Apple MFi.

### Технология SmartConfig

Технология SmartConfig — это фирменный способ инициализации подключения от корпорации TI, предназначенный для устройств без пользовательского интерфейса. Он был предложен еще в 2012 г. и предполагает использование мобильного приложения для передачи сетевых реквизитов из смартфона или планшета в неподключенное Wi-Fi-устройство корпорации. Когда SmartConfig включается в неподключенном устройстве, оно входит в специальный режим сканирования, ожидая получения информации о сети, которая передается телефонным приложением. Телефон должен быть подключен к сети Wi-Fi, чтобы он мог передавать сигнал SmartConfig по беспроводным каналам. Обычно это та же домашняя сеть, к которой новое устройство собирается подключиться.

Имя сети Wi-Fi (SSID), к которой подключен телефон, автоматически появляется в телефонном приложении. После этого пользователь вводит пароль сети и нажимает

кнопку «Пуск», чтобы начать процесс. Также есть вариант добавления имени устройства, которое передается телефоном вместе с информацией о сети и программируется в памяти устройства Wi-Fi.

Для повышения безопасности SmartConfig имеет возможность шифровать передаваемые между устройством и телефоном данные с помощью предварительно выданного ключа. Предварительно выданный ключ обычно печатается на этикетке коробки устройства и может быть отсканирован телефонным приложением до запуска процесса SmartConfig.

После того как устройство SimpleLink (см. рис. 2) получит сетевые реквизиты, оно автоматически подключается к сети и отправляет сообщение об обнаружении сервисов обратно на телефон. Телефонное приложение, получив это сообщение, извещает пользователя о том, что новое устройство успешно подключилось к сети.

На рис. 3 показаны снимки с экрана приложения SmartConfig. На экране слева показано, как пользователь вводит пароль и имя устройства. На экране справа мы видим уведомление, полученное после успешного подключения устройства.

TI предлагает библиотеку SmartConfig для операционных систем iOS и Android, а также демонстрационное приложение в App Store и в Google Play. Исходный код приложения можно загрузить с веб-сайта [2].

Ключевые преимущества SmartConfig — простота использования и возможность беспрепятственной интеграции в телефонное приложение устройства. Кроме того, если несколько устройств Wi-Fi одновременно находятся в режиме SmartConfig, одно телефонное приложение может обеспечить подключение их всех одновременно.

Однако следует отметить и некоторые немаловажные минусы. Помимо того что SmartConfig работает только в устройствах TI, основной недостаток этой технологии заключается в том, что телефон должен подключаться к сети, используя ту полосу частот и ту скорость передачи данных, которые поддерживаются неподключенным устройством. Например, если неподключенное устройство поддерживает диапазон 2,4 ГГц, а телефон использует для связи с двухдиапазонной сетью диапазон 5 ГГц, SmartConfig не будет работать просто потому, что неподключенное устройство не принимает сигналы в диапазоне 5 ГГц. Некоторые новые маршрутизаторы и телефоны для увеличения пропускной способности используют собственные скорости передачи данных, поэтому и здесь SmartConfig не справится с задачей. Но поскольку подавляющее большинство маршрутизаторов работает в диапазоне 2,4 ГГц и использует стандартные скорости передачи данных Wi-Fi, технология SmartConfig в большинстве ситуаций работает.

### Внеполосное подключение

Способы подключения, о которых шла речь выше, можно назвать «внутриполосным» подключением, потому что в них используется радиосвязь Wi-Fi для передачи информации

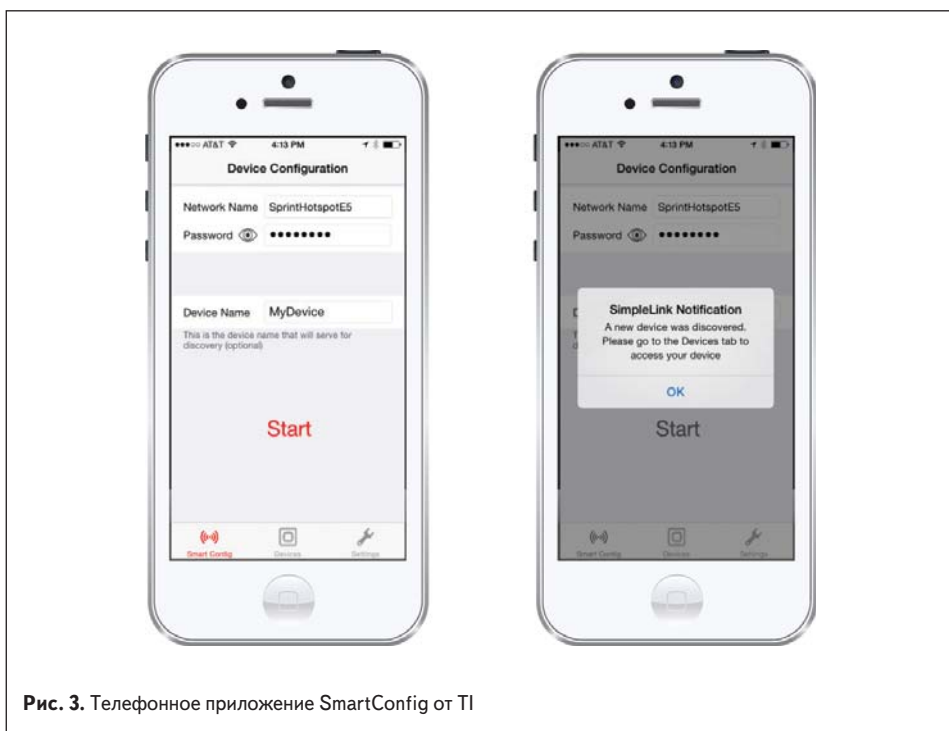


Рис. 3. Телефонное приложение SmartConfig от TI



о сети в неподключенное устройство. Его преимущество состоит в том, что не требуется дополнительных интерфейсов или элементов системы для осуществления подключения, а используются средства радиосвязи Wi-Fi, встроенные в устройство.

Внеполосные способы подключения используют для передачи информации о сети в подключаемое устройство среду, отличную от Wi-Fi. Внеполосное подключение может быть проводным, например с помощью интерфейса USB, или беспроводным, например с помощью технологии радиосвязи ближнего радиуса действия (NFC) или Bluetooth. Добавление в устройство возможности внеполосного первичного подключения повышает его надежность и универсальность, но увеличивает стоимость решения.

## Аспекты проектирования

Рассмотрим аспекты, которые разработчику обязательно следует учитывать при выборе способа(ов) инициализации подключения, и дадим рекомендации по выбору наиболее подходящего для различных систем. Мы сосредоточимся на внутриполосных способах подключения, поскольку они вызывают большинство вопросов и трудностей.

### Простота использования

Простота использования — важная характеристика потребительских товаров. Многие простые IoT-устройства рассчитаны на обычных домашних пользователей, которые не обладают глубоким пониманием процесса подключения и иногда имеют ограниченные навыки работы на компьютере либо не имеют их вообще. Так как подключение — это первое, что пользователи делают, когда открывают коробку с устройством, оно может сформировать их общее мнение о нем.

Говоря о простоте использования, мы рассматриваем такие тривиальные вещи, как количество операций, которые должен выполнить пользователь, чтобы подключить устройство. Важно, сможет ли пользователь воспользоваться средствами, с которыми он уже знаком, или ему придется приобретать новые навыки, чтобы решить эту задачу.

WPS, WAC и технология SmartConfig — самые простые в использовании способы. Хотя WPS не требует никаких знаний и средств, для него требуется физический доступ к маршрутизатору Wi-Fi, чтобы нажать кнопку WPS. Поскольку большинство пользователей смартфонов знают, как загружать и использовать телефонные приложения, технология SmartConfig предлагает пользователю знакомый интерфейс, но требует, чтобы он ввел пароль сети.

### Безопасность

С точки зрения безопасности с подключением к Wi-Fi связаны следующие два главных риска: во-первых, любитель подслушивать может получить пароль и воспользоваться им для подключения к домашней сети, а во-вторых, злоумышленник может использовать окно подключения устройства, чтобы взять его под

контроль. В большинстве случаев первый риск вызывает наибольшие опасения.

Можно обоснованно утверждать, что угрозы безопасности при подключении к Wi-Fi IoT-устройств ограничены при всех способах подключения, рассмотренных в этой статье, если эти способы используются правильно, поскольку подключение осуществляется только один раз за весь срок службы устройства или очень редко. Кроме того, во время подключения пароль сети передается в течение короткого времени в момент, контролируемый пользователем. Злоумышленник должен точно знать, когда произойдет подключение, и у него будет очень мало времени на то, чтобы провести атаку. Более того, злоумышленник должен находиться в радиусе действия сети Wi-Fi в тот момент, когда осуществляется подключение. Тем не менее значение безопасности никогда не следует недооценивать, и во многих случаях это имеет решающее значение.

Режим AP, WAC и технология SmartConfig имеют встроенную защиту. В случае режима AP и технологии SmartConfig разработчик должен выбрать использование защиты (то есть в режиме AP ТД должна быть сконфигурирована для применения защиты, а в SmartConfig шифрование должно быть выбрано явным образом). В WAC защита подключения используется всегда.

В случае способа подключения с помощью кнопки WPS риск с точки зрения безопасности заключается в том, что, когда ТД находится в режиме WPS, любое устройство Wi-Fi, находящееся поблизости, может использовать WPS для подключения к этой сети Wi-Fi.

### Надежность и универсальность

Надежность и универсальность тесно связаны с простотой использования, поскольку существует вероятность того, что подключение не будет работать или потребует каких-либо действий по устранению проблем. Но это заслуживает отдельного разговора, так как каждому из способов подключения присущи собственные уникальные ограничения.

Очевидное ограничение WPS заключается в том, что не все ТД его поддерживают. Во многих ТД, которые не поддерживают WPS, эта поддержка отключена по умолчанию из-за бреши в защите способа подключения с использованием PIN, которая обсуждалась выше. Если поддержка WPS отключена, пользователю потребуется войти на веб-портал ТД, чтобы включить функцию WPS. Для многих пользователей это слишком сложно.

Технология SmartConfig имеет некоторые присущие ей ограничения, которые были рассмотрены выше и могут не позволить ей выполнить подключение к некоторым ТД, использующим диапазон 5 ГГц или свои собственные скорости передачи данных.

Режим AP, вероятно, является наиболее надежным и универсальным способом подключения к Wi-Fi. Подключение в режиме AP будет работать в большинстве случаев, за исключением некоторых новых моделей телефонов, которые отключают сеть Wi-Fi, не подключенную к Интернету (как указа-

но выше, такой режим можно отключить). Вероятно, в этом заключается причина того, что большинство устройств и систем IoT на сегодня используют именно этот способ подключения.

В тех случаях, когда надежность не является самым важным аспектом, следует рассмотреть способ внеполосного подключения, например с помощью USB.

### Унификация

WPS и WAC выполняют единственную функцию — подключение к Wi-Fi, а режим AP и технологию SmartConfig вполне можно интегрировать в систему управления устройства и уподобить другим его функциям. Технологию SmartConfig можно интегрировать в телефонное приложение устройства, чтобы обеспечить его единообразное восприятие пользователем, позволяющее реализовать несколько вариантов конфигурирования с помощью одного и того же пользовательского интерфейса. Режим AP дает аналогичные преимущества при использовании веб-браузера для взаимодействия с несколькими функциями устройства из одной позиции.

## Подключение с помощью микроконтроллеров CC3100 и CC3200 семейства SimpleLink с модулем Wi-Fi

Платформы CC3100 и CC3200 семейства SimpleLink с модулем Wi-Fi обеспечивают потребителям наибольшую гибкость с точки зрения способов подключения, так как поддерживают все рассмотренные выше внутриполосные способы. Благодаря своим новым интерфейсам прикладного программирования SimpleLink и возможностям автономного модуля управления Wi-Fi, микроконтроллеры CC3100 и CC3200 делают подключение простой задачей для разработчика устройств. Приложение может включить использование любого способа подключения с помощью простых вызовов интерфейса прикладного программирования, а корпорация TI предлагает типовое программное обеспечение для SmartConfig, режима AP и WPS. Имя сети Wi-Fi и пароль автоматически и надежно записываются во flash-память последовательного доступа и используются встроенным модулем управления Wi-Fi для подключения к сети безо всякого участия пользователя и без кода приложения.

Встроенный в микросхему веб-сервер микроконтроллеров CC3100 и CC3200 делает проектирование подключения точки доступа чрезвычайно простым. Разработчик может включить заранее заданные элементы конфигурации в HTML-страницы, которые хранятся во flash-памяти последовательного доступа и автоматически загружаются веб-сервером. Чтобы еще больше упростить работу, микроконтроллеры CC3100 и CC3200 имеют в своем составе реализованный в микросхеме веб-сайт для подключения, который выполняет работу по подключению точки доступа без кода пользователя и вообще без каких-либо усилий с его стороны.

## Заключение

Мы рассмотрели основные способы инициализации подключения к Wi-Fi для устройств, не имеющих собственного пользовательского интерфейса, и рассмотрели их достоинства и связанные с ними трудности. Поскольку ясно, что ни один из способов подключения не является идеальным, на практике правильным подходом была бы поддержка в устройстве нескольких вариантов подключения.

В случае профессиональных или промышленных устройств может быть достаточно режима AP, так как он обеспечивает наилучшую надежность и универсальность. Во многих IoT-устройствах на сегодня режим

AP выбран в качестве единственного способа их подключения.

В случае аксессуаров MFi, которые подключаются к iPod, iPhone и iPad, естественным вариантом выбора является WAC. Для поддержки подключения с использованием других телефонов, планшетов или ПК в аксессуар следует добавить дополнительный способ подключения.

Если важна простота использования, подходят WPS или технология SmartConfig, потому что они обеспечивают наибольшее удобство для пользователя. Технология SmartConfig является естественным выбором, если нужно организовать подключение как работу с телефонным приложением. Если использование телефонного

приложения не является обязательным, правильным вариантом выбора будет WPS.

WPS или SmartConfig смогут охватить большинство вариантов установки устройств, но, поскольку они не будут работать в 100% всех случаев, рекомендуется добавить в устройство режим AP в качестве варианта «режима для продвинутых пользователей». Пользователям можно дать указание использовать режим AP, если им не удастся подключиться с помощью WPS или SmartConfig. ■

## Литература

1. [https://sviehb.files.wordpress.com/2011/12/viehboeck\\_wps.pdf](https://sviehb.files.wordpress.com/2011/12/viehboeck_wps.pdf)
2. [www.ti.com](http://www.ti.com)

## НОВОСТИ

### Обновленная продуктовая линейка IoT-шлюзов TechBase



Компания TechBase представляет обновленную продуктовую линейку промышленных компьютеров (IoT-шлюзов), ModBus-шлюзов и конвертеров. Устройства, предназначенные для промышленной автоматизации, теперь выполняются на более мощном современном про-

цессоре: ARM11 700 МГц/Cortex-A53 4 1,2 ГГц. А промышленный компьютер NPE X500 доступен в двух версиях процессора: ARM11 700 МГц, 512 Мбайт Ram или Quad-core Cortex A53 1,2 ГГц, 1024 Мбайт Ram.

IoT-шлюзы TechBase предназначены для легкой интеграции сети M-Bus, Modbus RTU и TCP/MQTT/SNMP. Устройства Modbus RTU типа slave могут служить дополнением к существующей сети Modbus TCP, а Modbus TCP slaves используются в сети RTU. IoT-шлюзы также поддерживают соединение ZigBee.

Промышленные компьютеры TechBase работают на базе ОС Linux и имеют модульную архитектуру, благодаря чему заказчик может сам сформировать собственный промышленный компьютер в необходимом наборе модулей расширения: 3G/LTE, GPS, LTE Advanced, Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee, LoRa.

Типовые сферы применения:

- Мониторинг и контроль в промышленных системах автоматизации.
- Телеметрия. Использование функции дистанционного считывания данных особенно важно в различных отраслях, таких как энергетика, газовая промышленность, водоснабжение и канализация, где внедрение новых методов считывания параметров обеспечивает

оптимизацию всего процесса распределения и способов работы.

- Интеллектуальная энергетическая сеть (SMART GRID), основанная на информационной и телекоммуникационной технологии сбора данных и процесса управления. Использование данного решения обеспечивает легкую двухстороннюю связь между получателями энергии.
- Интеллектуальный учет — применение интеллектуальных счетчиков в различных типах сетей (например, электричество, газ, вода, тепло и канализация). Интеллектуальные счетчики обеспечивают двухстороннюю дистанционную передачу данных: от поставщика энергии до прибора измерения и от прибора измерения к поставщику.
- Регистрация данных. Промышленные компьютеры NPE могут эксплуатироваться как многофункциональные регистраторы данных благодаря большому количеству входов/выходов и поддержке многих проводных и беспроводных стандартов связи.

Заводы компании TechBase находятся в Польше, поэтому все оборудование отличается высоким качеством и располагает всеми необходимыми сертификатами.

[www.euromobile.ru](http://www.euromobile.ru)

### Keysight Technologies ускорит внедрение технологий «Интернета вещей» с помощью LTE IoT-модемов Qualcomm Technologies



Компания Keysight Technologies, Inc. объявила о том, что планирует содействовать ускорению

внедрения технологий «Интернета вещей» (IoT). Функции IoT должны помочь в обеспечении совместимости миллиардов устройств с новыми приложениями, такими как «умные дома», подключенные автомобили, здравоохранение и «умные города», промышленные приложения, включая энергосистемы, сельское хозяйство и транспорт.

Решение Keysight-Anite для проверки соответствия требованиям SAS предоставляет возможность производителям устройств, поддерживающих Cat. M1, определять, насколько они отвечают плану испытаний Cat. M1 североамериканских телекоммуникационных операторов. Телекоммуникационные операторы утвердили план испытаний на основе успешного выполнения тестов с помощью лучшего решения для приемодаточных испытаний SAS и устройств, оборудованных модемом MDM9206 LTE компании

Qualcomm Technologies. Cat. M1 представляет собой IoT-ориентированную разновидность LTE, использующую полосу 1,4 МГц для передачи данных со скоростью 300–400 кбит/с.

Компания Keysight предлагает разработчикам возможность оптимизации устройств IoT по таким важнейшим показателям, как потребляемая мощность, ВЧ-характеристики и совместимость, имитируя реальные условия работы в лаборатории с помощью Keysight UXM. Это первое в мире решение для тестирования беспроводного оборудования, которое реализует подключение к устройствам стандарта NB-IoT, представляющего собой стандартизированную беспроводную технологию малой мощности с большой зоной покрытия, созданную для поддержки широкой номенклатуры новых устройств и услуг IoT.

[www.keysight.com](http://www.keysight.com)



# ДИПОЛЬ



## Цифровые мультиметры Keysight Technologies серии Truevolt

Отображение результатов измерений в различных видах.

- Цветной графический дисплей с возможностью отображения аналоговой шкалы, гистограммы, тренда, математических функций и статистики
- Входы/выходы: интерфейсы USB, LAN/LXI (опция), GPIB (опция)
- Утилита подключения цифрового мультиметра позволяет одним щелчком мыши осуществлять управление прибором, захват и отображение данных при подключении мультиметра к ПК или мобильному устройству

Полная уверенность в результатах измерений благодаря технологии Truevolt

- 11 измерительных функций, включая измерение силы постоянного и переменного тока, постоянного и переменного напряжения, сопротивления по 2- и 4-проводной схеме, частоты, периода, температуры, а также прозвон цепи и проверку диодов
- Основная относительная погрешность измерения постоянного напряжения 0,0035%, переменного напряжения 0,06%
- Максимальное входное напряжение 1000 В, максимальный входной ток 10 А

Переход к новому поколению цифровых мультиметров с полной поддержкой

- Единственное в отрасли решение, обеспечивающее 100%-ую замену мультиметра Keysight 34401A и полную совместимость по командам SCPI
- Возможности по использованию в измерительных системах: скорость измерений до 1000 отсчетов в секунду, память 10 000 отсчетов

## Инновационные решения для электронной промышленности

Санкт-Петербург / Москва / Нижний Новгород / Екатеринбург  
[www.dipaul.ru](http://www.dipaul.ru) / [info@dipaul.ru](mailto:info@dipaul.ru) / тел. (812) 702-12-66



# Построение корпоративной сети LoRaWAN

с использованием открытого программного обеспечения

**В статье описывается настройка корпоративной сети LoRaWAN и приводятся примеры использования открытого программного обеспечения, необходимого для функционирования клиентских устройств, шлюзов, сервера и служб, использующих сеть для решения прикладных задач. Рекомендуются бюджетные аппаратные средства, не требующие значительных капитальных вложений на этапе пуска и тестовой эксплуатации. Данная информация может быть полезной для инженеров — разработчиков систем связи, внедряющих новые перспективные технологии в области телеметрии, телеуправления и сигнализации.**

**Сергей Гаевский**  
info@nuvoton.com.ua

Беспроводные технологии связи сегодня являются основой для построения современных систем автоматизации технологических процессов и бытовой инфраструктуры. Необходимость постоянного обмена данными между управляющими и исполнительными звеньями определяет высокие требования к радиоканалу, а загруженность эфира накладывает определенные ограничения на параметры радиоустройств. Реализация надежных систем связи повышенного радиуса действия и низкой мощности, соответствующих требованиям региональных законодательств в области регулирования использования частотного спектра для работы без лицензии, является приоритетом для разработчиков.

Технология построения радиосетей LoRaWAN в безлицензионных ISM-диапазонах с использованием устройств мощностью до 14 дБ обеспечивает простое решение прикладных задач по сбору информации и телеуправлению, являясь достойной альтернативой использованию GSM-устройств и значительно превосходя последние в плане экономии энергопотребления. В [1, 2] рассказано о принципах модуляции LoRa и о возможности построения радиоканала «точка–точка» с использованием радиомодулей на базе чипсетов SX12xx, представленных на рынке компанией Semtech. Подобное решение является наиболее бюджетным по используемым компонентам, но, как правило, требует значительных усилий программиста по реализации оптимального протокола радиообмена, соответствующего заданным техническим условиям. Радиочипсеты являются лишь симплексными радиопередатчиками, поэтому бремя управления сетью полностью ложится на прикладную задачу, значительно повышая требования

к программному обеспечению. Пользователь должен позаботиться о планировании сеансов передачи клиентских устройств, предотвращать возникающие коллизии, обрабатывать подтверждения доставки данных и обеспечивать повторные передачи при потерях пакетов. Кроме того, необходимо грамотно реализовать шифрование и аутентификацию, блокируя возможные действия злоумышленников по вмешательству в работу инфраструктуры, обслуживаемой радиосетью.

Производитель LoRa-радиомодулей компания Semtech совместно с корпорацией IBM разработала сетевой стек LoRaWAN, предоставляющий «из коробки» функции, необходимые для эффективного управления пулом клиентских радиоустройств, и обеспечивающий надежную защиту радиокommunikаций.

Архитектура сети LoRaWAN представляет «звезду звезд» с центральным сервером, несколькими шлюзами и множеством клиентских устройств, обменивающихся данными с сервером через ближайшие доступные шлюзы (рис. 1).

Идентификация клиентских устройств в сети осуществляется по уникальному восьмибайтному идентификатору устройства (*devuid*) и назначаемому пользователем четырехбайтному имени (*devaddr*), которое отображается на сервере. Также указывается назначение устройства: восьмибайтный идентификатор службы, с которой данное устройство будет работать (*appid*), и 16-байтный ключ аутентификации в данной службе (*appkey*). Регистрация в сети (JOIN) может выполняться двумя способами: с помощью процедуры OTAA (over-the-air activation) или процедуры ABP (activation by Personalization). OTAA требует наличия соот-

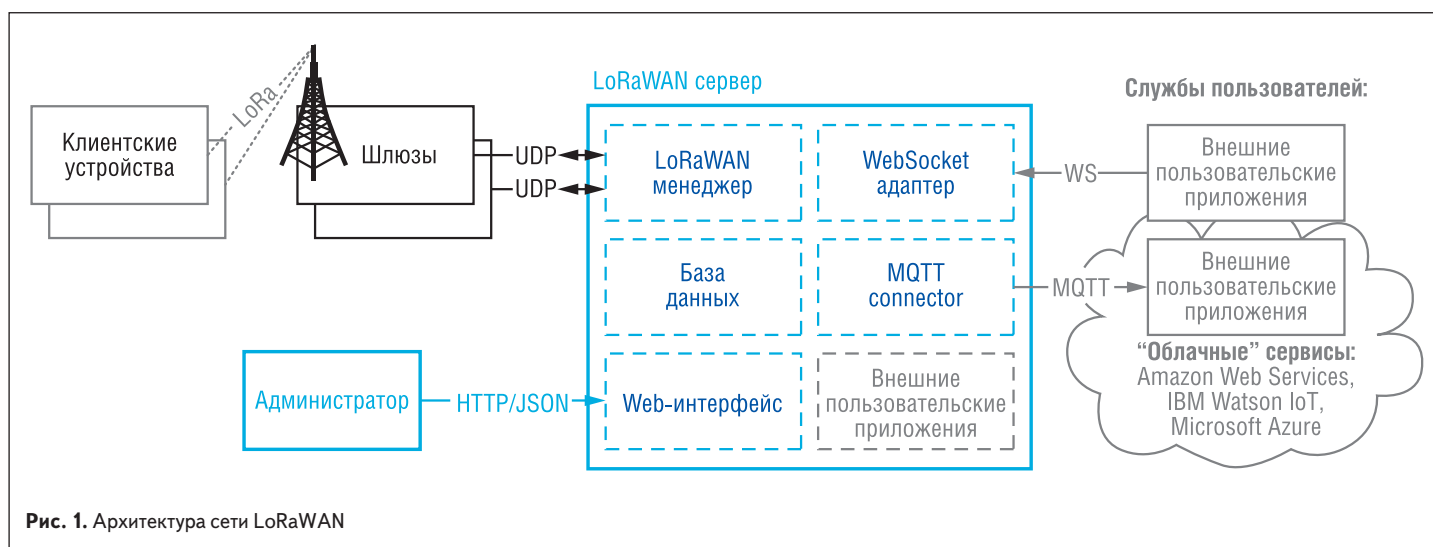


Рис. 1. Архитектура сети LoRaWAN

ветствующих параметров `devaddr`, `appkey` и `appkey` в самом устройстве и на сервере. Сессионные ключи шифрования данных (для сетевого уровня — `nwkskey`, для уровня приложения — `appskey`) будут сгенерированы автоматически при первичной регистрации в сети. Процедура ABP требует указать `devaddr` и непосредственно `nwkskey` и `appskey` в клиентском устройстве и в настройках сервера, тем самым исключается процедура получения сеансовых ключей через эфир: клиентское устройство будет готово к работе в своей сети сразу после первичного включения.

После регистрации в сети клиентское устройство может функционировать в одном из трех классов:

- Устройства класса А большую часть времени находятся в режиме сна, периодически просыпаются, отправляют данные, незначительное время ожидают подтверждения от сервера, затем снова «засыпают» до следующего сеанса в соответствии со своим расписанием. Такой режим работы, обеспечивая максимальное энергосбережение, имеет и недостаток: в период между коротким обменом данными устройства недоступны для сервера, и последнему приходится ждать очередного сеанса связи.
- Устройства класса С подавляющее большинство времени находятся в режиме приема, за исключением коротких сеансов передачи данных. Такие устройства потребляют значительно больше энергии, но они в любой момент доступны для сервера.
- Устройства класса В предоставляют разумную альтернативу: большую часть времени они находятся в режиме сна, но, тем не менее, между отправками данных регулярно «просыпаются» и некоторое время слушают эфир. Эти временные интервалы строго синхронизированы с сервером. Таким образом, передача данных на устройство класса В осуществляется намного быстрее, чем на устройство класса А, потому что не надо дожидаться очередного сеанса передачи данных. К сожалению, на сегодня практически нет свободного серверного программного обеспечения с поддержкой устройств класса В.

Более подробное описание работы сети LoRaWAN можно найти в спецификации и региональных требованиях, предоставляемых международной сертифицирующей организацией LoRa Alliance по запросу. Эти документы также можно найти и в свободном доступе [3, 4]. LoRa Alliance является единственной сертифицирующей организацией LoRa-устройств и подтверждает их соответствие действующей LoRaWAN-спецификации. Более подробно процедура сертификации описана в регламентирующем документе [5]. LoRa Alliance также определяет присвоение клиентскому устройству уникального идентификатора `devaddr` из пула, выделенного для каждого производителя — члена организации. Следует заметить, что наличие у LoRaWAN-модуля сертификата LoRa Alliance не освобождает от дополнительной сертификации как самого модуля, так и изделия, содержащего этот модуль, в стране использования в соответствии с региональными требованиями к радиопередающим устройствам.

Преимущество сертифицированных устройств — это возможность работы в публичной глобальной сети LoRaWAN, развертываемой при участии LoRa Alliance во многих странах мира. Альтернативой является построение корпоративных локальных LoRaWAN-сетей с использованием клиентских устройств, выполненных на базе радиомодулей физического уровня LoRa, управляемых микроконтроллером с пользовательским программным обеспечением, включающим LoRaWAN-стек. Как для клиентских устройств, так и для серверов доступно свободное программное обеспечение, позволяющее создавать собственные решения, использующие технологию LoRaWAN.

Рассмотрим основные элементы, составляющие инфраструктуру сети LoRaWAN.

Наиболее многочисленными являются клиентские устройства, в идеале — максимально дешевые и с малым энергопотреблением. Самый простой путь — использование готовых модулей, имеющих UART-командный интерфейс для настройки, управления и обмена данными. Примерами являются RN2483 от Microchip и UM801LP от Manthink. Такие модули сертифицированы LoRa Alliance

и могут работать в публичных сетях, в том числе предоставляющих бесплатный сервис в тестовом режиме.

Если планируется развертывание собственной корпоративной сети в регионах, где публичные сервисы пока недоступны, то наиболее оптимальным решением будет использование открытого LoRaWAN-стека и реализация транспортного уровня в единственном микроконтроллере, обеспечивающем функционирование клиентского устройства в целом. Известны две свободные реализации LoRaWAN-стека: версия от производителя чипсетов, компании Semtech [6], и альтернативная — от компании IBM [7]. На наш взгляд, более оптимальным является стек от IBM. Он поддерживает клиентские устройства класса В, его код более компактен и менее требователен к ресурсам контроллера. К сожалению, в мае 2017 г. компания IBM объявила о прекращении поддержки данного продукта (на сегодня остается доступной версия 1.6), но авторы заявили о готовности неофициально поддерживать разработку в открытом сообществе.

Скомпилированный код LMic v1.6 занимает около 20 кбайт и требует около 2 кбайт оперативной памяти. Исходная версия стека содержит демонстрационные проекты, выполненные в средах разработки Keil и IAR для микроконтроллера STM32L156C6 (Cortex F3 на 32 МГц, 32 кбайт ПЗУ, 10 кбайт ОЗУ). Код выполнен на С, использует только целочисленную арифметику, требует два цифровых выхода, три входа (с возможностью генерации прерываний) и таймер. Нам удалось успешно портировать стек в бюджетный микроконтроллер M058SEAN от компании Nuvoton (Cortex M0 на 50 МГц, 32 кбайт ПЗУ, 4 кбайт ОЗУ). Процесс портирования довольно простой и заключается в реализации в файле `hal.c` стандартных функций доступа к указанной выше периферии конкретного микроконтроллера.

Наиболее дорогостоящими элементами LoRaWAN-сети являются шлюзы. Основная задача шлюза — принять данные от клиентских устройств и передать их на сервер, используя интернет-подключение, а также ретранслировать данные, отправляемые сервером, в эфир. Функционально шлюз представляет

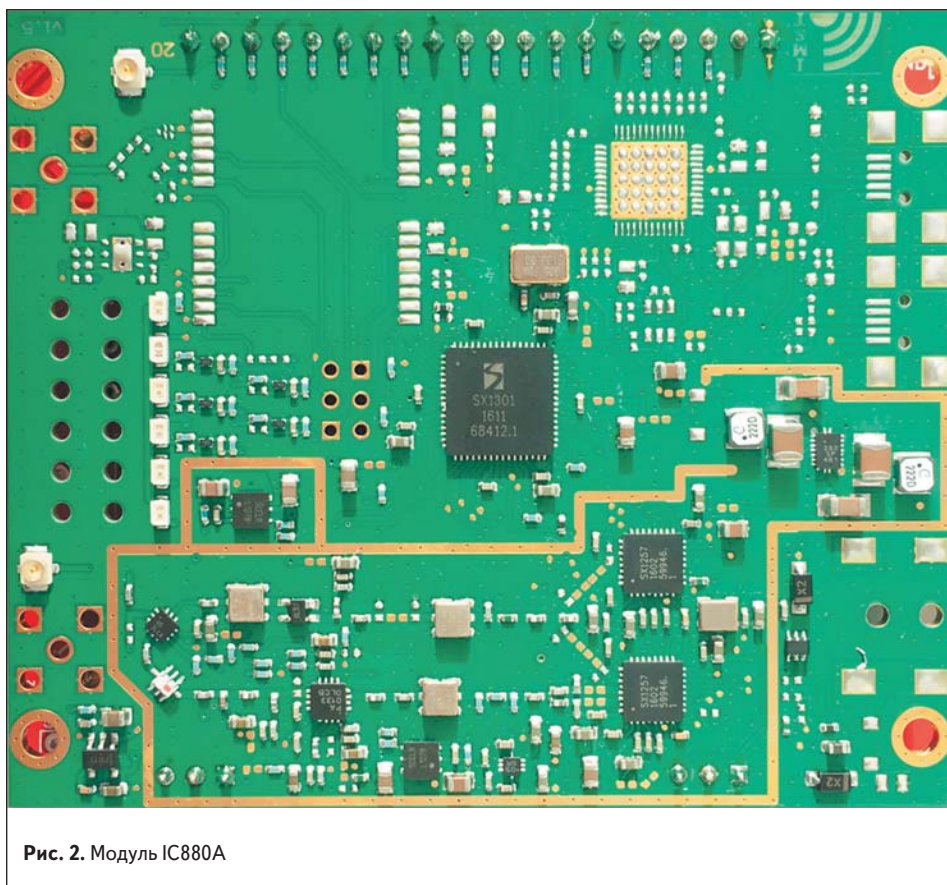


Рис. 2. Модуль IC880A

собой многоканальный приемопередатчик. Радиоканал обычно выполняется на двух чипсетах SX1257, а обработка производится сигнальным процессором SX1301. Подобный шлюз способен одновременно обрабатывать до восьми LoRa-пакетов в своем рабочем диапазоне частот. Более мощные модели содержат больше приемопередатчиков и процессоров, что позволяет расширить рабочий диапазон и увеличить производительность шлюза. Как показала практика, надежное функционирование корпоративной сети вполне могут обеспечить даже простые шлюзы с одним процессором на борту. Масштабировать сеть лучше путем увеличения количества шлюзов, равномерно распределяя их по охватываемой площади, чем за счет увеличения производительности единственного шлюза.

Представленные сегодня на рынке шлюзы являются, в основном, дорогими профессиональными устройствами, как правило, в IP67-исполнении, предназначенными для непосредственного монтажа на радиомачтах или крышах зданий с целью максимального покрытия региона. Можно выделить модели Wirnet Station от Kerlink и GDOx02 от Manthink — высокопроизводительные внешние шлюзы, предварительно настроенные для быстрого развертывания корпоративной LoRaWAN-сети.

Сравнительно высокая стоимость таких шлюзов сориентировала рынок на поиск альтернативных решений, в качестве которых были представлены модули, реализующие лишь радиоканал шлюза и требующие внешнее устройство управления (обычно компактный одноплатный Linux-компьютер), обеспечиваю-

щее функционирование радиоканала и коммуникацию с сервером через Интернет. Линейка подобных шлюзов сегодня представлена моделями IC880A от IMST и RHF0M31 от RisingHF. Интегрированный радиоканал с цифровым сигнальным процессором собран на небольшой плате и управляется через стандартный SPI. Тестировался модуль IC880A (рис. 2) совместно с бюджетным одноплатным компьютером Orange Pi PC от компании Xunlong. Физическое подключение осуществлялось по четырехпроводному SPI и линии сброса (табл. 1). Обе платы питались от общего источника 5 В/2 А, ток потребления IC880A достигал 250 мА, а Orange Pi PC — 1000 мА на пиках нагрузки.

Для удобства тестирования в одноплатном компьютере использовалась операционная система (ОС) Debian\_xfce\_desktop, предоставляющая графический интерфейс через HDMI-видео. Образ ОС [8] был записан на бюджетную microSD-карту Kingston 4GB Class 4 (SDC4/4GBSP) с реальной скоростью записи около 10 Мбайт/с. После логина (*root*

**Таблица 1.** Подключение радиомодуля LoRa-шлюза IC880A к одноплатному компьютеру Orange Pi PC

Сигнал	Номер вывода IC880A	Номер вывода Orange Pi PC
Reset (I07)	13	29
SCLK	14	23
MISO	15	21
MOSI	16	19
NSS	17	24
+5B	21	4
GND	22	6

с паролем *orangepc*) выполнялись стандартные процедуры установки размера раздела файловой системы (в соответствии с используемой SD-картой) и обновления информации о пакетах, содержащихся в репозиториях Debian:

```
/usr/local/bin/fs_resize
apt-get update
```

Для управления физической линией сброса IC880A удобно использовать стандартную библиотеку доступа к интерфейсу ввода/вывода компьютера — WiringOP, устанавливаемую с github:

```
git clone https://github.com/
zhaolei/WiringOP.git -b h3
cd WiringOP
chmod +x ./build
./build
cd..
```

Для управления радиоканалом IC880A использовался драйвер от производителя платы, также доступный на github:

```
git clone https://github.com/Lorantet/
lora_gateway
cd lora_gateway
make
cd..
```

И, наконец, для обеспечения обмена с LoRaWAN-сервером использовалось приложение *packet\_forwarder*:

```
git clone https://github.com/Lorantet/
packet_forwarder
cd packet_forwarder
make
cd..
```

Для запуска данного приложения был создан скрипт *start\_pfd.sh*, содержащий команды:

```
sleep 10
gpio mode 7 out
gpio write 7 1
sleep 0.5
gpio write 7 0
sleep 0.5
cd /root/packet_forwarder/lora_
pkt_fwd/
./lora_pkt_fwd
exit 0
```

Пауза в начале скрипта необходима для корректной работы в режиме автозапуска: так как Orange Pi PC не имеет аппаратных часов реального времени, то после старта компьютера перед запуском шлюза необходимо подождать обновления времени через Интернет средствами NTP. В дальнейшем автозапуск программного обеспечения шлюза обеспечивался путем создания по образцу стандартного скрипта LoRa в папке *init.d* и при необходимости управлялся командами:

```
update-rc.d lora defaults
update-rc.d -f lora remove
```

После установки программного обеспечения необходимо в файле `/root/packet_forwarder/lora_pkt_fwd/global_conf.json` в параметре `server_address` указать IP-адрес или доменное имя LoRaWAN-сервера, с которым будет работать шлюз. Также, в случае возможного использования нескольких шлюзов, необходимо назначить каждому из них уникальный MAC-адрес в файле `/root/packet_forwarder/lora_pkt_fwd/local_conf.json`. После выполнения указанных операций шлюз будет полностью готов к работе в составе корпоративной сети.

«Сердцем» LoRaWAN-сети является сервер, поддерживающий соединение с одним или несколькими шлюзами и управляющий пулом клиентских устройств, обеспечивая прием данных и помещая их в пользовательский интерфейс. Для тестирования мы использовали сервер с открытым кодом, поддерживающий неограниченное количество шлюзов и клиентских устройств, предоставляя данные клиенту или его приложению через веб-интерфейс, WebSocket или MQTT-протоколы [9]. Код сервера кроссплатформный и выполнен на языке Erlang (требует версию OTP 19 или выше). При тестировании сервер был запущен на компьютере Intel Pentium G3220 на 3 ГГц, 4 Гбайт ОЗУ под управлением 32-битной Windows 7. Для установки Erlang использовался инсталлятор Erlang OTP 20.0 Windows 32-bit Binary File [10]. Сам сервер был загружен в виде архива `lorawan-server-0.4.8.tar.gz` и с помощью WinRAR распакован в рабочую папку. Запуск сервера выполнялся непосредственно из папки `bin` скриптом `lorawan-server.bat`.

Для получения пакетов от шлюзов сервер использует UDP-порт 1680. Веб-интерфейс, предназначенный для настройки и контроля, доступен через TCP-порт 8080 (по умолчанию открыт доступ для пользователя `admin` с паролем `admin`). Настройка сервера заключается в добавлении шлюзов и клиентских устройств.

Для добавления шлюзов в веб-интерфейсе необходимо использовать меню **Infrastructure** → **Gateways** → **Create** и заполнить поля, отмеченные звездочкой: MAC (должен соответствовать MAC-адресу, заданному при настройке данного

шлюза), NetID (произвольный код сети, общий для всех шлюзов), TX Chain (обязательно «0»), Location (указать расположение данного шлюза на карте).

Для добавления клиентских устройств используется меню **Devices** → **Create** (для устройств, регистрирующихся в сети по процедуре OTAA) или **Nodes** → **Create** (для устройств, регистрирующихся по процедуре ABP, см. выше). Устройства, однажды успешно зарегистрировавшиеся по процедуре OTAA, будут автоматически добавлены в раздел **Nodes**.

Для обеспечения процедуры регистрации OTAA в меню **Devices** → **Create** для каждого добавляемого клиентского устройства необходимо указать его `Region=EU 863-870MHz` и `Application=WebSocket` (интерфейс, по которому данные с этого устройства будут доступны пользовательскому приложению). Параметры `devuid`, `appuid` и `appkey` должны соответствовать таковым в добавляемом клиентском устройстве.

Для обеспечения процедуры ABP в меню **Nodes** → **Create** необходимо также указать `Region=EU 863-870MHz` и `Application=WebSocket`. Параметры `devaddr`, `nwkskey` и `appskey` должны соответствовать таковым в добавляемом клиентском устройстве.

После настройки последние данные, полученные от активных клиентских устройств, можно увидеть в меню **Received Frames**. Для получения клиентским приложением принятых данных через интерфейс WebSocket при добавлении устройств можно указать необязательный параметр `Group=ABC` и подключаться к серверу по ссылке `ws://server:8080/ws/groups/ABC/json`. Данные, принятые от участников группы ABC, будут передаваться подключившемуся клиентскому приложению в виде json-пакетов, содержащих, кроме самих данных, дополнительную информацию о клиентском устройстве (уровень ошибок, текущие параметры модуляции, используемый шлюз и т. п.).

В итоге нами была развернута тестовая бюджетная корпоративная сеть LoRaWAN, состоящая из малопотребляющих клиентских устройств, периодически отсылающих данные

телеметрии, шлюза и сервера, управляющего сетью и предоставляющего полученные данные клиентскому приложению. Нами использовалось свободное программное обеспечение, адаптированное под конкретную пользовательскую задачу. Оборудование, необходимое для развертывания подобной сети, всегда доступно для заказа в нашей компании, а квалифицированные инженеры готовы поделиться своим опытом и оказать техническую поддержку в выборе, установке и адаптации программного обеспечения для решения вашей прикладной задачи. ■

## Литература

1. Е. Рахно, С. Гаевский. Сети LoRaWAN — особенности украинского рынка // CHIP NEWS Украина. Инженерная микроэлектроника. 2016. № 10.
2. С. Гаевский. Чипсеты SX127x с радиоканалом LoRa: архитектура, управление и применение в системах связи // CHIP NEWS Украина. Инженерная микроэлектроника. 2017. № 3.
3. LoRaWAN Specification V1.0.2. LoRa Alliance, 2016. [http://wiki.lahoud.fr/lib/exe/fetch.php?media=lorawan102-20161012\\_1398\\_1.pdf](http://wiki.lahoud.fr/lib/exe/fetch.php?media=lorawan102-20161012_1398_1.pdf)
4. LoRaWAN 1.0.2 Regional Parameters. LoRa Alliance, 2017. [www.thethingsnetwork.org/forum/uploads/default/original/2X/d/dca7977549092f2c594a601caa739e1bacbee59.pdf](http://www.thethingsnetwork.org/forum/uploads/default/original/2X/d/dca7977549092f2c594a601caa739e1bacbee59.pdf)
5. Certification Policies and Procedures. LoRa Alliance, 2015. [www.ipaaustralia.gov.au/sites/g/files/net856/f/certification\\_rules/1764592\\_170502\\_initial\\_rules.pdf](http://www.ipaaustralia.gov.au/sites/g/files/net856/f/certification_rules/1764592_170502_initial_rules.pdf)
6. LoRaWAN endpoint stack implementation and example projects. Semtech, 2017. <https://github.com/Lora-net/LoRaMacnode>
7. IBM-LMIC: LoRaWAN MAC on embedded systems. IBM, Zurich, 2017. <https://github.com/mcci-catena/ibm-lmic>
8. Orange Pi One: Debian XFCE 2016-12-12. <http://piboard.io/topic/6/операционные-системы-для-orange-pi>
9. Compact server for private LoRa networks. <https://github.com/gotthardp/lorawan-server>
10. Erlang OTP 20.0 Windows 32-bit Binary File. [www.erlang.org/downloads](http://www.erlang.org/downloads)

## НОВОСТИ

### Ведущие разработчики и IT-специалисты поделятся опытом на IV выставке-конференции «Интернет вещей»



IV выставка-конференция «Интернет вещей» состоится в Москве, в ВЦ «Сокольники», павильон 7а. В этом году она изменит свой формат: вместо одного дня мероприятие продлится два — с 31 октября по 1 ноября. Это означает, что выступит больше спикеров и прозвучит больше интересных докладов. «Интернет вещей» ежегодно собирает инженеров, разработчиков, предпринимателей, инвесторов, имеющих возможность обменяться опытом и обсудить актуальные проблемы IoT-индустрии. На прошлогоднем мероприятии с докладами выступали специалисты из Google, Cisco, Huawei, Tibbo, Rightech и других зарубежных и отечественных компаний. Основа ивента — конференция, разделенная на два тематических блока.

Первый посвящен обсуждению современного «железа» и аппаратного обеспечения. Спикеры проанализируют достоинства и недостатки существующих технических решений, объяснят, как и для чего их лучше использовать. Доклады на данную тему состоятся 31 октября.

1 ноября прозвучат доклады из второго тематического блока, нацеленного на обзор современных разработок сегмента Industrial IoT и LifeStyle IoT, в частности планируется рассмотреть интересные кейсы внедрения технологий «умный автомобиль», «умный город», «умные фабрики» и т. д. К списку обсуждаемых тем могут быть добавлены и другие, поэтому все обновления своевременно появляются на официальном сайте выставки-конференции «Интернет вещей».

<https://iotconf.ru>

# Технологии беспроводной зарядки.

## Часть 1. Теоретические основы и способы аппаратной реализации

**Беспроводная зарядка (БЗ)** — технология передачи энергии для работы или пополнения автономного энергозапаса устройства, без использования проводов. Недавний прогресс в области разработки БЗ привел к появлению коммерческих продуктов, которые позволили использовать альтернативный путь пополнения заряда для устройств, работающих от аккумуляторов. Однако внедрение систем БЗ привело к появлению сложных вопросов, касающихся их взаимодействия с существующими системами беспроводной связи, а также взаимодействию с традиционными (проводными) системами зарядки и управления энергопитанием. Авторы статьи предприняли попытку представить комплексный обзор систем БЗ, включающий фундаментальные основы данной технологии, международные стандарты и использование в системах беспроводной связи. В первой части рассматриваются основные технологии БЗ, а именно — индуктивная связь, магнитно-резонансная связь и радиочастотное /микроволновое излучение, от фундаментальных принципов до конкретного применения.

Сяо Лу (Xiao Lu)  
Пинг Ванг (Ping Wang)  
Дусит Ниято (Dusit Niyato)  
Донг Ин Ким (Dong In Kim)  
Чжу Хан (Zhu Han)  
Перевод: Алексей Гречишников

### Введение

Беспроводная зарядка (БЗ), также известная как передача энергии без проводов, — это технология, обеспечивающая передачу электромагнитной энергии по воздуху от источника к приемнику без использования проводных соединений. Она применима для самых разнообразных устройств, от маломощной электрической зубной щетки до электромобилей, и обладает несомненным преимуществом в удобстве использования. Сегодня данная технология, ранее бывшая чистой теорией, находит все более широкое применение, воплощаясь в коммерческих продуктах. Особенно успешно ее внедрение идет на рынке портативных устройств — мобильных телефонов, планшетов и т. п. В 2014 г. лидеры рынка мобильной техники, такие как Samsung, Apple и Huawei, заявили о выпуске нового поколения устройств со встроенной поддержкой БЗ. Согласно прогнозам IMS Research, количество устройств, обладающих возможностью БЗ, к 2016 г. достигнет 4,5 млн. Другая компания, Pike Research, предсказывает увеличение числа такого рода устройств до 15 млн к 2020 г.

По сравнению с традиционным (проводным) способом зарядки БЗ обладает рядом преимуществ:

1. Удобство для пользователей, которые будут избавлены от множества зарядных кабелей для различных устройств. Если производители придут к «общему знаменателю», использование одинаковых зарядных устройств для продукции различных брендов позволит избавиться от путаницы проводов.

2. Уменьшение размера устройств путем использования менее емких аккумуляторов или даже, возможно, полного отказа от них.
3. Повышение защищенности устройств (например, пыле- и влагопроницаемость) при полном отказе от использования проводов как для зарядки, так и для передачи данных.
4. Расширение возможности применения устройств, особенно в тех случаях, когда использование проводов или замена батарей являются крайне нежелательными или даже неприменимыми — например в имплантатах.
5. Возможность обеспечить «зарядку по требованию», что позволит избежать перезарядки аккумуляторов и уменьшить расходы на электричество.

Однако использование БЗ, как правило, имеет более высокую стоимость реализации по сравнению с традиционным способом: вместо зарядного шнура требуется установить беспроводное зарядное устройство, а в мобильный гаджет должен быть встроен приемник передаваемой энергии. Кроме того, устройства БЗ характеризуются повышенным тепловыделением при работе, что требует использования более качественных материалов.

Разработка технологий БЗ идет по двум основным направлениям. В первом случае используется энергия электромагнитного излучения радиочастотного или даже микроволнового диапазона. По соображениям безопасности такой способ может быть использован только для маломощных устройств. Так,



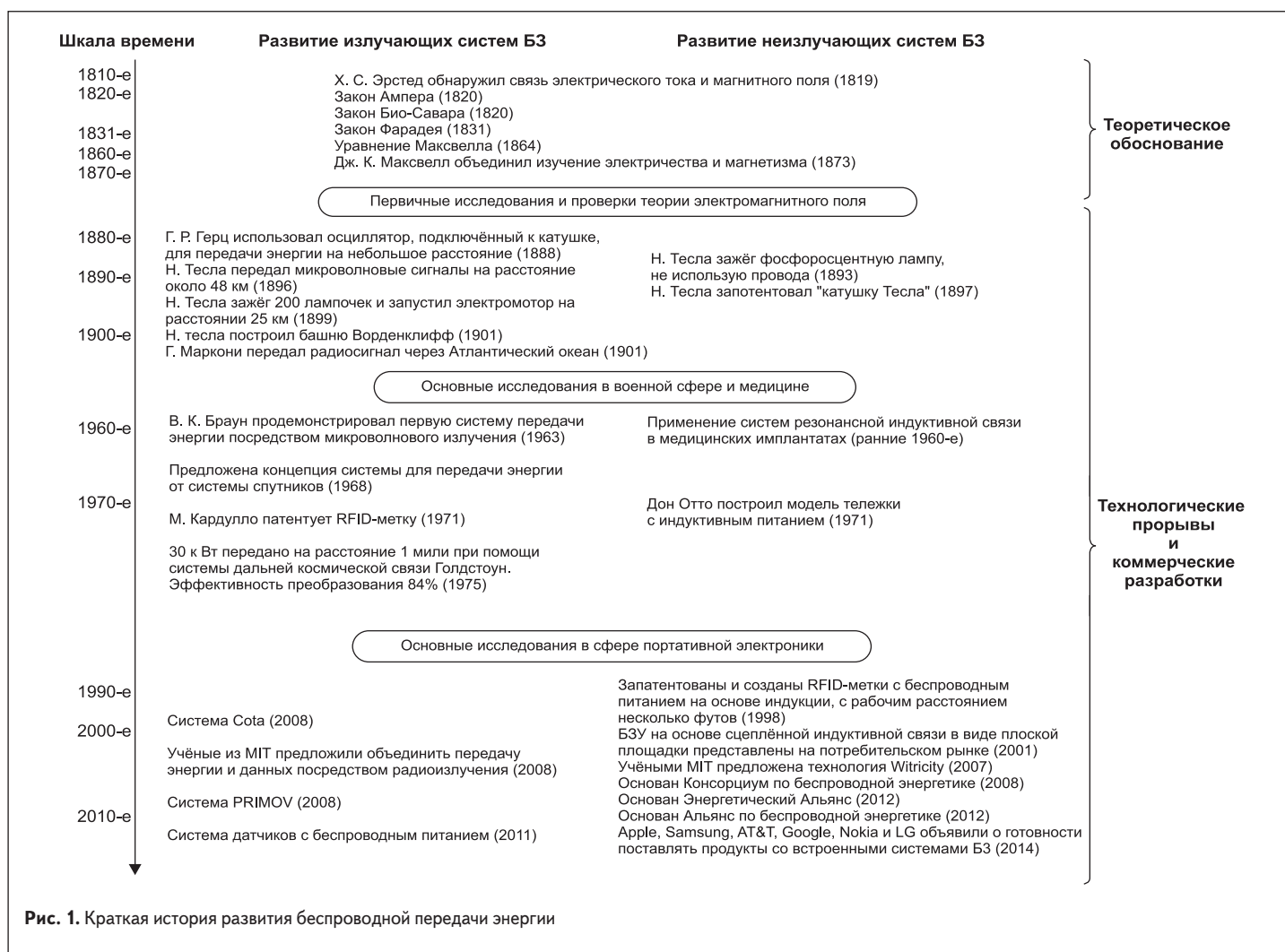


Рис. 1. Краткая история развития беспроводной передачи энергии

например, всенаправленное радиочастотное излучение подходит только для приложений с узлами датчиков, потребляющих мощность до 10 мВт.

Альтернативный путь — использование для передачи энергии магнитного поля, генерируемого катушкой-излучателем и улавливаемого катушкой-приемником. Поскольку затухание магнитного поля гораздо сильнее, чем электрического, данный способ применим только для зарядки на небольшом расстоянии. Но данный способ зарядки безопасен, что позволяет широко использовать его для самых разнообразных устройств — от зубных щеток до автомобилей.

Настоящее исследование фокусируется на стратегиях беспроводной зарядки в сетях связи с возможностью беспроводного получения энергии, также называемых беспроводными сетями связи (WPCN).

### История и коммерциализация

На рис. 1 показана краткая история и основные этапы развития технологии БЗ.

#### Теоретические основы

Изучение электромагнетизма началось в 1819 г., когда Х. С. Эрстед (H. C. Oersted) обнаружил связь электрического тока и магнитного поля. Вскоре были открыты законы Ампера, Био-Савара и Фарадея, описывающие основные свойства электромагнитного

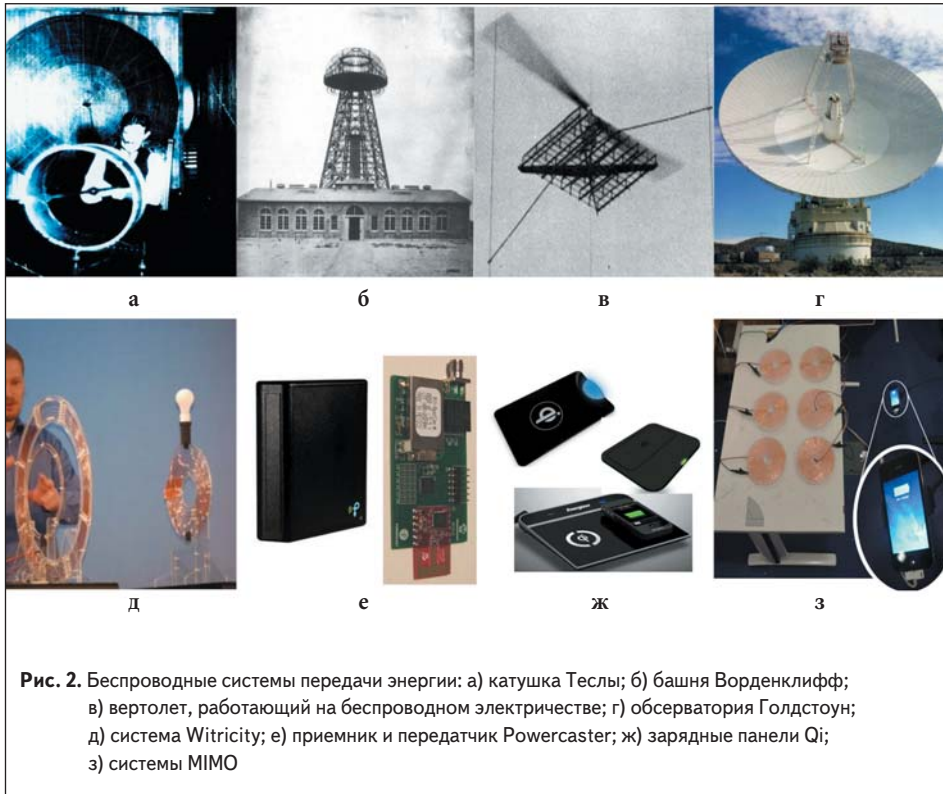
поля. Затем, в 1864 г., последовало открытие уравнений, характеризующих процесс возникновения и взаимодействия электрического и магнитного полей. Позднее, в 1873 г., публикация книги Дж. К. Максвелла (J. C. Maxwell) «Трактат об электричестве и магнетизме» объединила изучение электричества и магнетизма, связав их в электромагнитном поле — среде, в которой происходит распространение электрических и магнитных воздействий. Этот исторический прогресс установил современную теоретическую основу электромагнетизма.

#### Технические прорывы и исследовательские проекты

История стала свидетелем серии важных технических прорывов, объединенных двумя основными направлениями исследований в области электрического и магнитного поля. В 1888 г. Х. Р. Герц (H. R. Hertz) для передачи электричества через крошечный зазор использовал осциллятор, соединенный с индукционными катушками. Это впервые экспериментально подтвердило существование электромагнитного излучения. Никола Тесла, создатель электрооборудования, работающего на переменном токе, провел первые эксперименты по беспроводной передаче энергии на основе микроволнового излучения. Он сосредоточил усилия на изучении возможности передачи беспроводной энергии на большие

расстояния, и в 1896 г. ему удалось передать сигналы на расстояние около 48 км при помощи микроволнового излучения. Еще один крупный прорыв был достигнут в 1899 г.: электроэнергия высокой частоты с напряжением 10 МВ была передана на расстояние около 40 км (25 миль), что позволило зажечь 200 ламп накаливания и запустить электродвигатель. Однако технология, которую применял Тесла, не получила развития, поскольку использование таких высоких напряжений могло бы привести к катастрофическим последствиям для людей и электрооборудования в окрестностях. Примерно в тот же период он представил свою знаменитую катушку — «катушку Теслы» (рис. 2а). В 1901 г. он построил башню Ворденклифф (Wardenclyffe Tower) для передачи электрической энергии без проводов через ионосферу (рис. 2б). Однако из-за ограничения технологии (например, низкой эффективности системы из-за необходимости генерации электрического поля гигантских размеров) идея также не получила дальнейшего развития и не имела коммерческого успеха.

Позднее, в 1920–1930-х годах, были изобретены магнетроны для преобразования электричества в микроволны, что сделало возможной передачу энергии на большие расстояния без использования проводов. Однако способ эффективно конвертировать микроволновое излучение



обратно в электричество не был найден, и развитие технологий БЗ приостановилось.

Так продолжалось до 1964 г., когда В. К. Браун (W. C. Brown), считающийся главным инженером практической беспроводной зарядки, изобрел устройство, названное «ректенна», которое предназначалось для преобразования микроволн в электричество. Браун доказал практичность передачи микроволновой энергии, продемонстрировав модель вертолета, получающего всю необходимую ему энергию от микроволнового луча (рис. 2в). Это послужило стартом для исследований возможности конструирования самолетов, работающих от микроволнового излучения, которые проводились в 1980–1990-х годах в Японии и Канаде. В 1975 г. Браун передал 30 кВт на расстояние 1 мили с эффективностью преобразования 84%, используя комплекс дальней космической связи обсерватории Голдстоун (Goldstone Deep Space Communications Complex, рис. 2г).

Спутник солнечной энергии (SPS), концепция которого была предложена в 1968 г., — это еще один пример возможного использования СВЧ для передачи энергии на большие расстояния.

В основе идеи лежит размещение большого SPS на геостационарной орбите Земли для сбора энергии Солнца и ее передачи на Землю посредством электромагнитного излучения. Широкие исследования по передаче энергии с помощью микроволн проводились НАСА в течение 1970–1980-х годов.

В этот же период времени шел постепенный прогресс технологии БЗ с помощью магнитного поля. Крупных прорывов на этом направлении не было, хотя стоит отметить, что устройства с индуктивной связью уже в 1960-х годах широко использовались в маломощных медицинских устройствах.

#### Коммерциализация

Недавний всплеск интереса к исследованиям в области БЗ в первую очередь был вызван стремительным ростом рынка портативных электронных устройств. Коммерческие продукты, использующие БЗ, стали появляться в 1990-х годах. Это касалось как устройств «ближнего действия» (индуктивных), так и дальнего (микроволновых) — прогресс шел в обоих направлениях. В 2007 г. коллективом

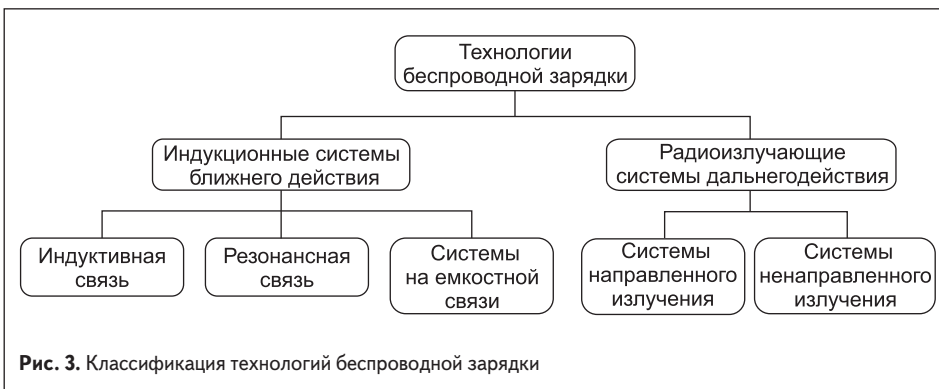
из Массачусетского технологического института (Massachusetts Institute of Technology, MIT) была разработана технология Witricity (рис. 2д). В ходе экспериментов было показано, что БЗ среднего радиуса действия может быть не только практична, но и эффективна. На коммерческом рынке появились первые устройства БЗ — такие как Cota system, PRIMOVE и беспроводная перезаряжаемая система Powercast (рис. 2е).

Совсем недавно для разработки международных стандартов БЗ были созданы различные консорциумы, например Консорциум беспроводной энергии (Wireless Power Consortium, WPC), Alliance Power Matters Alliance (PMA) и Alliance for Wireless Power (A4WP). В настоящее время эти стандарты были приняты и воплощены во многих электронных продуктах, доступных на рынке, таких как смартфоны и БЗ, показанные на рис. 2ж. Конец 2014 г. ознаменовался впечатляющим технологическим прорывом — появлением Magnetic MIMO (MagMIMO). Устройства, использующие данную технологию (рис. 2з), формируют поле беспроводной зарядки при помощи многоантенных излучателей магнитных волн. Эта технология стала основой для исследований в области формирования излучателей магнитного поля.

## Беспроводные технологии зарядки

Как показано на рис. 3, технологии БЗ делятся на неизлучающие, работа которых основана на эффекте магнитной индукции, и излучающие, которые используют энергию электромагнитных волн. Неизлучающие устройства используют такие методы передачи энергии, как индуктивная связь, магнитно-резонансная связь и емкостная связь. Излучающие технологии, в свою очередь, могут использовать направленную передачу энергии или же ненаправленную. При емкостной связи величина передаваемой энергии зависит от доступной площади устройства. Однако для портативного электронного устройства это является неприемлемым, поскольку габариты таких устройств не позволяют обеспечить достаточную мощность для зарядки. Если же говорить о направленных излучателях электромагнитной энергии, то ограничение заключается в том, что зарядное устройство должно знать точное местоположение приемника энергии, который к тому же должен находиться в пределах прямой видимости. Из-за очевидного ограничения вышеупомянутых двух методов БЗ обычно реализуется с помощью других трех методов, а именно: магнитной индуктивной связи, магнитно-резонансной связи и непрямого радиочастотного излучения.

Магнитная индукция и магнитно-резонансная связь работают на небольшом расстоянии, где генерируемое электромагнитное поле доминирует в области, близкой к передатчику или рассеивающему устройству. Мощность магнитного поля обратно пропорциональна третьей степени расстояния от источника до приемника. В то же время микроволновое излучение работает на гораздо большем расстоянии. Мощность микроволнового излучения уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния



от излучателя. Более того, для данного метода поглощение излучения не оказывает влияния на передатчик, поскольку передающая и принимающая антенны не связаны. Напротив, при использовании индуктивных методов приемник и передатчик оказывают взаимное влияние друг на друга.

**Индуктивная связь**

Индуктивная связь основана на явлении электромагнитной индукции (рис. 4а). Индуктивная передача мощности (IPT) происходит, когда первичная катушка передатчика энергии генерирует изменяющееся магнитное поле, которое проходит через вторичную катушку приемника энергии. Переменное магнитное поле индуцирует напряжение/ток во вторичной катушке приемника. Этот эффект можно использовать для зарядки беспроводного устройства или аккумулятора. Рабочая частота индуктивной связи обычно находится в диапазоне нескольких килогерц. Для повышения эффективности зарядки вторичная катушка должна быть настроена на рабочую частоту. Добротность такой системы обычно имеет низкие значения (например, ниже 10), поскольку передаваемая мощность быстро снижается при повышении добротности. Из-за отсутствия компенсации добротности эффективное зарядное расстояние таких систем обычно не превышает 20 см. Радиочастотная идентификация на основе индуктивной связи (RFID) использует технологию увеличения расстояния зарядки до десятков сантиметров за счет снижения эффективности (1–2%). Полученная приемником мощность измеряется микроваттами. Несмотря на ограниченное расстояние передачи, эффективная мощность зарядки может быть очень высокой (например, киловатты в устройствах для зарядки электромобиля).

К преимуществам устройств на магнитной индуктивной связи также относятся простота внедрения, удобная работа, высокая эффективность на близком расстоянии (как правило, меньшем, чем диаметр катушки) и гарантированная безопасность. Поэтому данный метод применим и популярен для мобильных устройств. Используя упомянутую выше технологию MagMIMO, можно заряжать беспроводное устройство на расстоянии до 30 см. Утверждается, что MagMIMO может обнаруживать телефон и инициировать его зарядку даже если он находится не в прямой видимости зарядного устройства, например в кармане.

**Магнитно-резонансная связь**

Магнитно-резонансная связь (рис. 4б) основана на взаимодействии с затухающей волной, которая генерирует и передает электрическую энергию между двумя резонансными катушками через изменяющиеся или осциллирующие магнитные поля. Поскольку две резонансные катушки, работающие на той же резонансной частоте, сильно связаны, может быть достигнута высокая эффективность передачи энергии, при этом утечки для нерезонансных внешних препятствий будут небольшими. Например, в апреле 2015 г. был продемонстрирован совре-

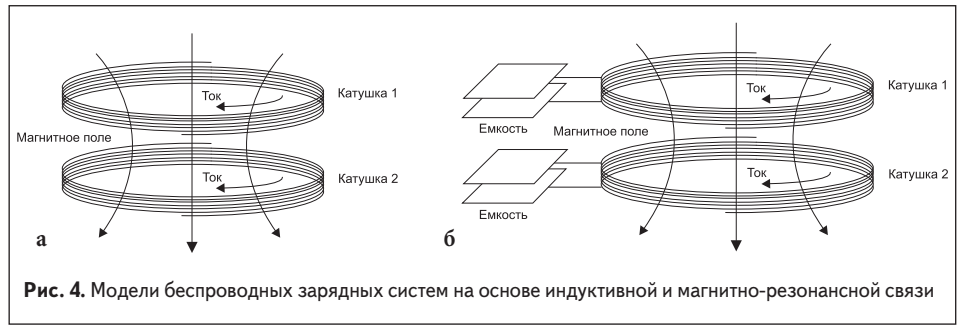


Рис. 4. Модели беспроводных зарядных систем на основе индуктивной и магнитно-резонансной связи

менный прототип, показавший максимальную эффективность передачи мощности в 92,6% на расстоянии 0,3 см. Благодаря использованию эффекта резонанса преимуществом магнитно-резонансной связи является игнорирование влияния внешней среды и отсутствие требования прямой видимости передающего и принимающего устройств. Продемонстрированные ранее магнитосвязанные резонаторы показали способность передавать энергию на большие расстояния, чем устройства индуктивной связи той же мощности, и с более высокой эффективностью, чем при помощи радиочастотного (RF) излучения. Кроме того, магнитно-резонансная связь может быть использована для передачи энергии на несколько устройств при помощи одного передатчика, благодаря чему данный метод позволяет заряжать несколько устройств одновременно.

Устройства, использующие резонансную связь, работают в диапазоне мегагерцевых частот и имеют высокую добротность. Это особенно важно для увеличения расстояния до зарядки, поскольку высокая добротность сглаживает негативное влияние увеличенного расстояния между устройствами и, следовательно, повышает эффективность БЗ. Таким образом, становится возможным увеличение расстояния передачи мощности вплоть до 1 м. Как уже упоминалось, в 2007 г. ученые из MIT предложили Witricity — высокоэффективную технологию беспроводной передачи энергии на средних дистанциях, основанную на сильно связанном магнитном резонансе. Сообщалось, что с помощью данной технологии можно заставить работать лампу мощностью 60 Вт на расстоянии более чем 2 м при эффективности энергопередачи около 40%. Эффективность увеличилась до 90%, когда расстояние передачи составило 1 м. Однако недостатком данной технологии является то, что размер приемника Witricity трудно уменьшить, поскольку требуется наличие распределенной емкостной катушки.

Это представляет собой серьезную проблему в реализации технологии Witricity в портативных устройствах. Резонансная магнитная связь может одновременно заряжать несколько устройств, для чего требуется настройка связанных резонаторов с несколькими приемными катушками, что даже улучшает общую эффективность системы. Однако взаимная связь приемных катушек может привести к помехам, и следовательно, необходима правильная настройка приемных устройств.

**Радиочастотное излучение**

В данном случае в качестве среды для переноса энергии используется RF-излучение микроволнового диапазона. Радиоволны СВЧ распространяются в пространстве со скоростью света в прямом направлении. Типичная частота микроволнового излучения составляет от 300 МГц до 300 ГГц. При передаче энергии могут использоваться также инфракрасные и рентгеновские лучи. Однако из-за проблемы безопасности такие системы широко не используются. На рис. 5 показана архитектура СВЧ-системы передачи энергии. Она начинается с преобразования переменного тока (AC) в постоянный (DC), который, в свою очередь, преобразуется в радиоизлучение при помощи магнетрона, входящего в состав передатчика. После распространения по воздуху микроволновое излучение захватывается ретленной приемника, после чего происходит обратное преобразование радиоизлучения в электричество.

Эффективность преобразования RF–DC в значительной степени зависит от поглощенной плотности мощности на приемной антенне, от точности согласования импеданса между антенной и множителем напряжения и энергоэффективности преобразователя напряжения, который конвертирует принятое RF-излучение в постоянный ток. Например, в одном из продемонстрированных в мае 2015 г.

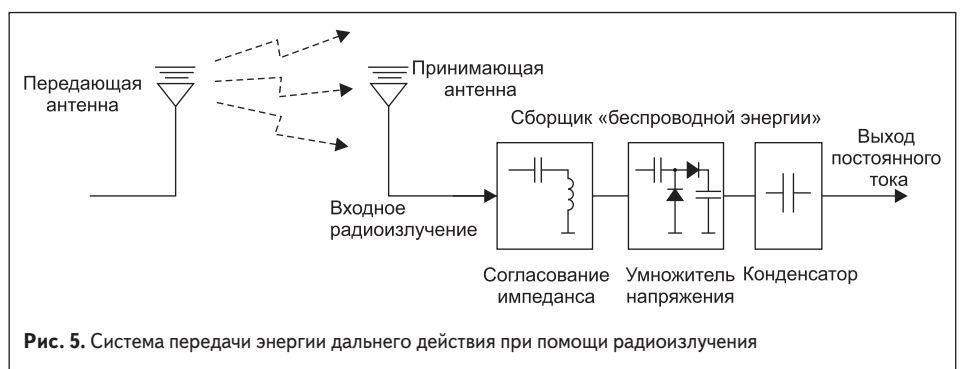


Рис. 5. Система передачи энергии дальнего действия при помощи радиоизлучения

устройств эффективность преобразования RF–DC достигала 62 и 84% при суммарной входной мощности 10 и 5,8 дБм соответственно.

RF-излучение может быть изотропным или направленным. Изотропное более подходит для широкоэшелательных приложений. При передаче «точка–точка» направленное излучение может повысить эффективность передачи энергии. Для формирования направленного излучения используется массив фокусирующих антенн или антенны на основе апертурных решеток. Четкость формирования луча энергии улучшается с увеличением количества передающих антенн. Использование большого числа антенн увеличенного размера также способствует улучшению качества передачи энергии. На коммерческом рынке уже присутствуют устройства для БЗ на основе RF-излучения — например, передатчик Powercaster и приемник Powerharvester, которые допускают изотропную передачу мощности 1 или 3 Вт (рис. 2e).

Помимо более высокой дальности передачи, микроволновое излучение имеет еще одно преимущество — совместимость с существующей системой связи. Посредством RF-излучения возможно одновременно передавать и энергию, и информацию. Амплитуда и фаза СВЧ используются для модуляции информации, а ее излучение и колебания — для переноса энергии. Концепция использования одновременной передачи информации и энергии получила название SWIPT (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer). Для внедрения SWIPT были разработаны усовершенствованные интеллектуальные антенны, используемые на стороне приемника, которые обеспечивают хороший компромисс между производительностью и сложностью системы. Другой подход к внедрению подобных систем, имеющий определенные экономические преимущества, предусматривает развертывание выделенных силовых маяков, действующих совместно с существующей системой связи. Однако из-за медицинских ограничений для RF-излучения мощность передатчиков должна быть регламентирована в соответствии с нормативами, такими, например, как установленные Федеральной комиссией по связи США (FCC), и максимально допустимыми уровнями воздействия, указанными в стандарте IEEE C95.1-2005. Это приводит к увеличению плотности сети

передающих станций, имеющих пониженную мощность излучения.

В таблице 1 приводятся сравнительные характеристики разных типов БЗ, их преимущества, недостатки, эффективное расстояние зарядки и сферы применения.

## Применение систем БЗ

Для лучшего понимания всего разнообразия и многообещающего применения БЗ расскажем об уже существующих приложениях и практическом применении систем БЗ ближнего и дальнего радиуса действия.

### Зарядка ближнего действия

Зарядные приложения для ближнего поля могут быть реализованы на основе индуктивной и резонансной связи. Из-за простоты и низкой стоимости реализации в большинстве существующих решений в основном применяется индуктивная связь. Как упоминалось выше, технология IPT (Inductive Power Transfer — передача энергии посредством катушек индуктивности) способна обеспечить передачу большой мощности (киловатт и выше) и широко используется в промышленной автоматизации. Основные области применения включают роботизированные манипуляторы, автоматизированные подводные аппараты, индукционные генераторы и асинхронные двигатели. Мощные системы IPT также применяются для обеспечения энергией общественного транспорта, например монорельсовых составов, пассажирского транспорта, электроподвижного состава на железнодорожном транспорте (в частности, на высокоскоростных поездах). Передаваемая при этом мощность колеблется от киловатта до сотен киловатт. Например, система онлайн-питания электроподвижного состава реализует выходную мощность 100 кВт с 80%-й энергоэффективностью при воздушном зазоре 26 см.

Еще одно широко распространенное применение зарядных устройств большой мощности — это питание аккумуляторных батарей на транспортных средствах на электроприводе (Electric Vehicle, EV), в том числе на гибридных электрических транспортных средствах (Plug-in Hybrid Electric Vehicles, PHEV). Индуктивная связь начала применяться для зарядки EV с 1990-х годов. Были разработаны индуктивные зарядные устройства как для

однаправленной, так и для двунаправленной зарядки, которая делает возможным создание целых сетей БЗ. Как правило, эффективность зарядки достигает 90% и выше при мощности 1–10 кВт на расстоянии 4–10 мм. В 2012–2015 гг. были продемонстрированы и оценены системы на основе резонансной связи для EV. По сравнению с индуктивными устройствами БЗ, зарядка EV на основе резонансной связи позволяет заметно увеличить зарядное расстояние, а также эффективность передачи энергии. Так, например, в экспериментах, результаты которых были представлены на International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe) в Гетеборге (Швеция) в сентябре 2014 г., была достигнута эффективность более 95% при воздушном зазоре 22,5 см.

Системы зарядки ближнего действия средней мощности (от нескольких ватт до десятков ватт) применяются, прежде всего, в медицинских аппаратах и бытовых устройствах. Различные конструкции биомедицинских имплантатов, основанные на индуктивной связи, были показаны на конференции Medicine and Biology Society (EMBC) в Буэнос-Айресе (Аргентина) еще в 2010 г. Современные решения могут обеспечить более высокую эффективность зарядки — 50% и выше при воздушном зазоре 10 мм. Системы с резонансной зарядкой, используемые в биомедицинских имплантатах, имеют более мощную проникающую способность. Поскольку расстояние до БЗ намного больше размера катушки, резонансная связь обеспечивает меньший размер имплантированного устройства по сравнению со стандартным решением. В некоторых работах было показано, что при передающей катушке диаметром 3 см и приемной диаметром 2 см эффективность зарядки может достигать более 60% на расстоянии свыше 20 см. Современные технологии могут дать повышение эффективности БЗ в биотканевых средах до 70%.

Что касается применения БЗ средней мощности для бытовой техники, то это, например, индуктивная зубная щетка, освещение, настенный выключатель, система отопления и проч. — везде, где только может быть использована БЗ. Если речь идет о портативных устройствах, то для них было выпущено множество стандартных БЗ, таких, например, как зарядное устройство Qi RAVPower, зарядная площадка Verizon Qi, Duracell Powermat, зарядное устройство Energizer Qi, зарядные площадки ZENS Qi и Airpulse, разработанные для передачи энергии на ноутбуки, планшеты и мобильные телефоны (рис. 3ж).

Более того, в период с 2011 по 2014 г. на различных международных научных конференциях по электромагнетизму, СВЧ-технологиям, вопросам беспроводной передачи данных и т. п. были продемонстрированы системы БЗ ближнего действия для передачи энергии с морских энергостанций, для использования в нефтедобывающей промышленности, угольных шахтах, электрических велосипедах, сенсорах и датчиках, носимых устройствах, имплантируемых системах, RFID, LED-дисплеях и т. п.

Таблица 1. Сравнение различных технологий беспроводной зарядки

Технология беспроводной зарядки	Преимущества	Недостатки	Радиус действия
Индуктивная связь	Безопасность, простая конструкция	Работа на коротком расстоянии, нагрев, не подходит для мобильных приложений, необходимо строгое выравнивание зарядного и заряжаемого устройств	От нескольких миллиметров до нескольких сантиметров
Резонансная индуктивная связь	Нестрогие требования к выравниванию устройств, возможность одновременной зарядки нескольких устройств с разной мощностью, высокая эффективность зарядки, устройства могут находиться не в прямой видимости друг друга	Не подходит для мобильных приложений, ограниченный радиус действия, сложная конструкция	От нескольких сантиметров до нескольких метров
Радиоизлучение	Эффективно для работы на больших расстояниях, пригодно для мобильных приложений	Небезопасна при высоких энергиях, низкая эффективность зарядки, устройства должны находиться в прямой видимости.	Обычно от нескольких десятков метров до нескольких километров

**Системы дальнего радиуса действия**

Системы дальнего радиуса действия могут быть реализованы на основе как ненаправленного, так и направленного радиоизлучения. Ненаправленное излучение подходит даже для тех условий, когда передатчик и приемник не находятся в условиях прямой видимости. При этом эффективность приема в очень незначительной степени зависит от ориентации антенны приемника, однако эффективность зарядки в таком случае будет относительно низкой. Поэтому наиболее широко распространенными приложениями для ненаправленной зарядки стали маломощные беспроводные системы, такие как беспроводные сенсорные сети (WRSN) и RFID-системы. WRSN с низкими рабочими циклами могут поддерживать постоянную работу при плотности электромагнитной мощности RF-излучения в диапазоне 20–200 мВт/см<sup>2</sup>. Для работы в ненаправленной системе дальнего радиуса были специально разработаны семейства датчиков сверхнизкой мощности. Как было показано на International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS) в Сеуле (Сев. Корея) в мае 2012 г., встроенный датчик и приемник отдельного устройства потребляют мощность 1,79 и 0,683 мВт соответственно и могут передавать данные со скоростью 500 кбит/с.

Чтобы не зависеть от выделенного устройства БЗ, были разработаны беспроводные системы зарядки, основанные на сборе энергии от окружающей среды. В специализированной литературе в последнее время нередко упоминаются разработки платформ самозарядных датчиков для сбора энергии от RF-сигналов телевизионного вещания, передача радиостанций с амплитудной модуляцией (AM), от глобальной системы мобильной связи (GSM 900/1800), маршрутизаторов Wi-Fi, базовых станций сотовой связи и спутникового телевидения.

RF-датчики могут найти применение в самых разнообразных системах, например таких, как беспроводные нательные сенсорные/компьютерные сети (Wireless Body Area Networks, WBAN), предназначенные для мониторинга состояния пациента и медико-санитарной помощи. Устройства WBAN могут быть носимыми, размещенными на теле, или даже имплантированными внутрь человеческого тела. В некоторых научных публикациях 2012–2014 гг. рассматриваются вопросы создания и варианты использования WBAN, не имеющих батарей, питание которых осуществляется с помощью БЗ. Как правило, потребляемая мощность таких датчиков составляет десятки милливольт, а эффективность зарядки составляет около нескольких процентов (например, 1,2%). Следует отметить, что размещение имплантированных датчиков глубоко внутри органов тела влечет за собой значительно меньшую эффективность зарядки, обычно менее 0,1%. Утверждается, что типичные имплантированные датчики с микроволновым источником питания могут работать на расстоянии десятков сантиметров от излучателя. RF-датчики также используются в системах «Интернета вещей» (IoT), системах связи межмашинного взаимодействия (M2M) и системах интеллектуальных сетей (Intelligent Network, IN).

Системы с направленным излучением могут быть использованы для беспроводного

питания электронных устройств с большим энергопотреблением. В 1960-х годах были разработаны сверхмощные системы передачи энергии, использующие микроволновое излучение, способные передавать сотни киловатт. Направленные СВЧ-системы передачи большой мощности на дальнее расстояние получили относительно широкое распространение. Как было упомянуто выше, эксперимент по передаче СВЧ-энергии в Голдстоуне, проведенный в 1975 г., продемонстрировал возможность передачи 30 кВт с мощностью пучка 450 кВт на расстоянии более 1,54 км при работе системы на частоте 2,388 ГГц. Системы на основе направленного СВЧ-излучения дальнего радиуса действия также стимулировали развитие сетей больших систем БЗ. Это, например, Solar Power Satellites (SPS); беспилотные летательные аппараты (БЛА), в том числе с беспроводным питанием от источника СВЧ-излучения; высотные платформы на электромоторах (HAPP); воздушная радиоантенна Raytheon (RAMP) и программы создания высотных стационарных ретрансляторов (SHARP).

В последнее время активно набирают популярность транспортные средства на электроприводе (упомянутые ранее EV/PHEV). Для их питания также могут быть использованы системы БЗ на основе направленного СВЧ-излучения. На International Electric Drives Production Conference (EDPC) в Нюрнберге (Германия) в 2013 г. были представлены материалы исследования и создания системы дорожных излучателей для беспроводной передачи энергии электротранспорту. Показано, что разработанная ректенна способна принимать мощность 10 кВт с эффективностью преобразования RF–DC более 80%.

В прошедшем десятилетии большое распространение получили системы беспроводного питания средней мощности для работы с портативными электронными устройствами. Например, коммерческая система Cota, о которой также говорилось выше, способна передавать энергию на расстоянии до 10 м даже при наличии препятствий между передающим и принимающим устройствами. Кроме того, система передающих станций СВЧ-излучения (например, 60 ГГц) может служить источником питания для мобильных устройств в сотовых сетях. Однако практичность и экономическая эффективность такой системы требуют дальнейшего исследования.

**Обзор систем беспроводной зарядки**

Рассмотрим и проанализируем системы БЗ, их архитектуру, аппаратное обеспечение и вопросы конструирования.

**Архитектура**

На рис. 6 представлена блок-схема типичной неизлучающей системы БЗ. Передатчик состоит из: выпрямителя, преобразующего переменный ток в постоянный; повышающего преобразователя постоянного тока, увеличивающего выходное напряжение; инвертора-преобразователя, конвертирующего постоянный ток в переменный. Приемник состоит из: выпрямителя, преобразующего переменный ток высокой частоты в постоянный; понижающего преобразователя постоянного тока, уменьшающего выходное напряжение; нагрузки.

Процесс передачи происходит следующим образом. Переменный ток передается на вход выпрямителя. Существующие сети переменного тока работают на частоте 50 или 60 Гц, что слишком мало для систем БЗ. Полученный постоянный ток при помощи преобразователя получает более высокое напряжение. Затем происходит преобразование напряжения-частота, после которого на выходе получается переменный ток высокой частоты. Проходя через катушку, переменный ток формирует магнитное поле, которое взаимодействует с катушкой приемника через воздушный зазор и возбуждает переменный ток высокой частоты в приемнике. Далее происходит обратный процесс преобразования: переменный ток выпрямляется, затем происходит уменьшение полученного напряжения в преобразователе для получения тока, пригодного для питания устройства или зарядки батареи.

Топология индуктивных систем связи имеет четыре разновидности, а именно: последовательно-последовательная; последовательно-параллельная; параллельно-последовательная; параллельно-параллельная. Различие данных топологий сказывается на компенсационных преобразованиях при взаимодействии электромагнитных цепей. Параллельно-последовательная и параллельно-параллельная регулируют ток инвертора, протекающий в параллельных резонансных контурах, при помощи дополнительных индукторов, что приводит к увеличению размеров преобразователя и его стоимости. Кроме того, эти две топологии имеют различные значения резонансной емкости в зависимости от сочетания и добротности контуров. Поэтому более широкое распространение получили последовательно-последовательная и последовательно-параллельная структуры. Основными типами входного порта системы резонансного соединения являются последовательные и параллельные схемы, которые используются в сочетании для повышения эффективности работы индукционной катушки.

Индуктивные системы связи обычно используют архитектуру с двумя катушками, как

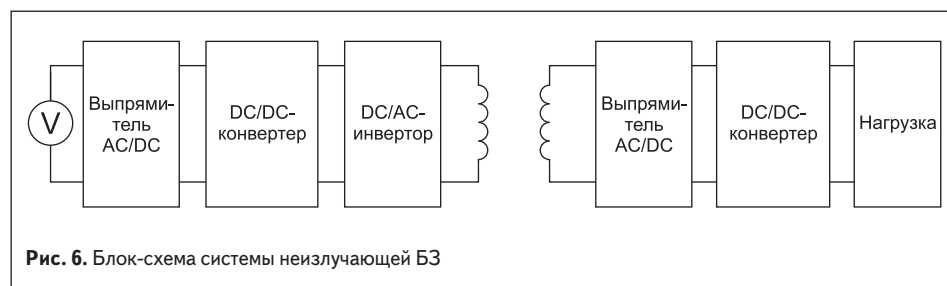


Рис. 6. Блок-схема системы неизлучающей БЗ

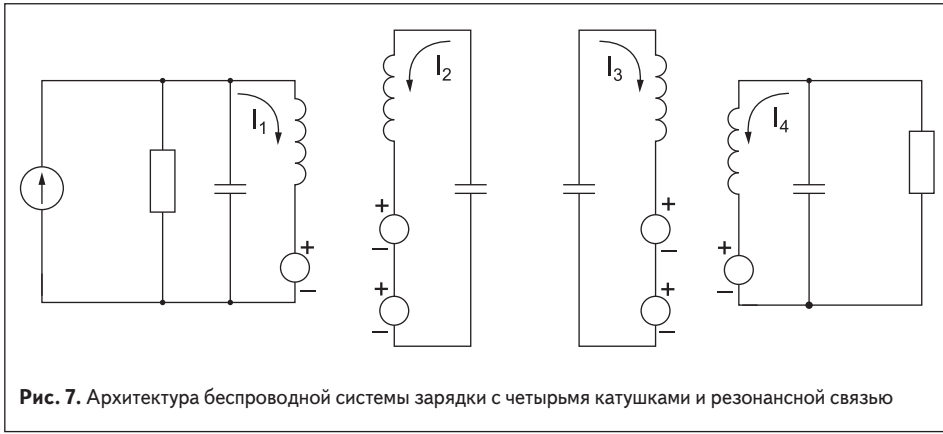


Рис. 7. Архитектура беспроводной системы зарядки с четырьмя катушками и резонансной связью

показано на рис. 6. В то же время архитектура системы при использовании резонансной связи более разнообразна. Сравнительно недавно получили распространение системы с применением магнитной связи на основе четырех катушек с согласованным импедансом, системой релейного резонатора и системами домино-резонаторов.

Идея использовать систему БЗ с четырьмя катушками впервые была предложена в 1998 г. В ней на стороне передатчика располагаются катушка возбуждения и передающий резонатор, а на стороне приемника — принимающий резонатор и катушка нагрузки (рис. 7). Использование катушки возбуждения и катушки нагрузки включает в себя два дополнительных коэффициента взаимной связи, т. е. коэффициент между катушкой возбуждения и передающим резонатором, а также между принимающим резонатором и катушкой нагрузки.

По сравнению с системой с двумя катушками, два дополнительных коэффициента обеспечивают дополнительные возможности по увеличению расстояния передачи. Однако общая эффективность передачи не будет превышать 50% из-за требования согласования независимости.

Система с использованием релейного резонатора получается путем добавления дополнительного релейного резонатора между передающей и приемной катушками. Оптимизация и экспериментальные оценки такой системы проводились с рабочими частотами 115,6 кГц, 1,25/6,78/7/13,56 МГц. Для дальнейшего расширения диапазона передачи системы с релейным резонатором может быть применена так называемая система домино-резонатора, когда между передающей и приемной катушками могут быть размещены несколько промежуточных резонаторных реле. Такие системы получают

очень гибкими и могут быть выполнены в различных конфигурациях: прямая линия, кольцо, изогнутые и Y-образные узоры. Энергия может передаваться отдельными путями или объединять несколько путей, что обеспечивает улучшенное управление передачей мощности.

#### Аппаратное обеспечение

Напряженность магнитного поля можно охарактеризовать как функцию расстояния  $d$  от источника следующим образом:

$$H(d) = \frac{INr^2}{2\sqrt{(r^2 + d^2)^3}}, \quad (1)$$

где  $I$ ,  $N$  и  $r$  — ток, число витков и радиус катушки соответственно.

Из (1) непосредственно следует, что увеличение числа витков и радиуса передающей катушки приводит к усилению напряженности. Однако они не могут увеличиваться беспредельно, поэтому их оптимизация производится более сложным способом, при котором учитываются частота и сопротивление. Для эффективного приема передаваемой энергии принимающая катушка должна иметь низкий импеданс.

Эффективность передачи энергии неизлучательной зарядной системы сильно зависит от взаимной индуктивности между двумя катушками, добротности  $Q$  и коэффициента согласования нагрузки. Взаимная индуктивность пары катушек указывает, как изменение одной катушки влияет на индуцированный ток в другой. Взаимная индуктивность между парой катушек пропорциональна самоиндукции двух катушек через коэффициент связи.

Таблица 2. Сравнение особенностей реализации устройств индуктивной зарядки

Публикация	Применяемая технология	Напряжение на выходе, В	Максимальная эффективность зарядки, %	Максимальная рабочая дистанция, мм	Частота
J. Yoo, L. Yan, S. Lee, Y. Kim, and H.-J. Yoo. A 5.2 mW Self-Configured Wearable Body Sensor Network Controller and a 12 W Wirelessly Powered Sensor for a Continuous Health Monitoring System // IEEE Journal of Solid-State Circuits. Vol. 45. № 1. 2010.	0,18 мкм КМОП	1,8	54,9	10	13,56 МГц
H.-M. Lee and M. Ghovanloo. An Adaptive Reconfigurable Active Voltage Doubler/rectifier for Extended-range Inductive Power Transmission // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. Vol. 59. № 8. 2012.	0,5 мкм КМОП	3,1	77	80	13,56 МГц
S.-Y. Lee, J.-H. Hong, C.-H. Hsieh, M.-C. Liang, and J.-Y. Kung. A Low-power 13.56 MHz RF Front-end Circuit for Implantable Biomedical Devices // IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst. Vol. 7. № 3. 2013.	0,18 мкм КМОП	3	87	20	13,56 МГц
O. Lazaro and G. A. Rincon-Mora. 180-nm CMOS Wideband Capacitor-Free Inductively Coupled Power Receiver and Charger // IEEE Journal of Solid-State Circuits. Vol. 48. № 11. 2013.	0,18 мкм КМОП	1,5	82	11,35	100–150 кГц
X. Li, C.-Y. Tsui, and W.-H. Ki. Power Management Analysis of Inductively-Powered Implants with 1X/2X Reconfigurable Rectifier // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. Vol. 62/ № 3. 2015.	0,13 мкм КМОП	3,6	65	20	40,68 МГц

Таблица 3. Сравнение особенностей реализации устройств на основе магнитной связи

Публикация	Диаметр передающей катушки, см	Диаметр приемной катушки, см	Рабочая дистанция, см	Максимальная эффективность зарядки, %	Частота
A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher and M. Soljacic. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances // Science. Vol. 317. № 5834. 2007.	60×60	30×30	75	93	9,9 МГц
Z. N. Low, R. Chinga, R. Tseng and J. Lin. Design and Test of a Highpower High-efficiency Loosely Coupled Planar Wireless Power Transfer System // IEEE Trans. Ind. Electron. Vol. 56. № 5. 2009.	21×21	13×13	1	75,7	134 кГц
D. Wang, Y. Zhu, H. Guo, X. Zhu, T. Mo and Q. Huang // Enabling Multi-angle Wireless Power Transmission via Magnetic Resonant Coupling // in Proc. of International Conference on Computing and Convergence Technology (ICCT), Seoul, South Korea. Dec. 2012.	30×30	30×30	0,5	74,08	15,1 МГц
D. Ahn and S. Hong. Effect of Coupling Between Multiple Transmitters or Multiple Receivers on Wireless Power Transfer // IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 60. № 7. 2013.	30×30	31,5×22,5	21–31	45–57	144 кГц
M. T. Ali, A. Anwar, U. Tayyab, Y. Iqbal, T. Tauqeer and U. Nasir. Design of High Efficiency Wireless Power Transmission System at Low Resonant Frequency // in Proc. of IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC), Antalya, Turkey. Sept. 2014.	13,6×13,6	5×5	0,3	88,1	22,2–22,4 МГц

Коэффициент эффективности передачи, который характеризует качество взаимосвязи катушек, определяется выравниванием, расстоянием, отношением диаметров и формой двух катушек.

Добротность  $Q$  определяется как отношение энергии, хранящейся в резонаторе, к энергии, обеспечиваемой генератором. Более высокое значение  $Q$  указывает на меньшую скорость потери энергии системы при передаче мощности. Поэтому в силовой системе с высокой добротностью колебания/резонанс медленно снижаются. На добротность влияет самоиндуктивность, сопротивление и внутренняя частота, которые, в основном, зависят от применяемых материалов. Коэффициент соответствия нагрузки зависит от расстояния. Так как резонансные частоты пары катушек меняются при изменении зазора, коэффициент согласования нагрузки измеряет, насколько точно совпадают резонансные частоты. Для настройки коэффициента согласования нагрузки для поддержания согласования резонансной частоты на различном расстоянии в литературе предложены различные решения, такие как манипуляция с сопряжением, согласование частоты, согласование импеданса и настройка параметров резонатора.

В таблицах 2 и 3 показаны некоторые из недавно разработанных способов аппаратной реализации систем передачи энергии через индуктивность (IPT) и резонансных систем связи соответственно. Показано, что для систем IPT эффективность зарядки 50–80% может быть достигнута при расстояниях до зарядки в несколько сантиметров. Для систем резонансной связи зарядное расстояние увеличивается до нескольких дециметров с эффективностью от 50% до 90%.

**Изучение распространения беспроводной энергии**

Распространение радиоволн для дальней радиосвязи хорошо изучено. Уделим внимание основным характеристикам распространения магнитных волн при близком взаимодействии. Сначала рассмотрим фундаментальную модель магнитной индукции в базовой установке одиночного входа/одиночного выхода (SISO). Затем модель расширяется для конфигураций с множественными входами и выходами: с несколькими входами/одиночными выходами (MISO), с одним входом и несколькими выходами (SIMO) и с несколькими входами и выходами (MIMO).

**SISO**

Система магнитной индукции с одним входом и одним выходом показана на рис. 8а. Пусть  $r_t$  и  $r_r$  — радиусы передающей и принимающей катушек соответственно. Расстояние между катушками обозначим как  $d$ . Пусть  $\omega_0$  — это резонансная угловая частота, с которой связаны две катушки. Тогда:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_t C_t}} = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}},$$

где  $L_t$  и  $L_r$  — самоиндукция передающей и принимающей катушек соответственно.

$M$  — взаимная индукция, а  $C_t$  и  $C_r$  — резонансные емкости. Сопротивление передающей и принимающей катушек соответственно обозначим как  $R_t$  и  $R_r$ . Импеданс источника передатчика и нагрузки приемника —  $R_s$  и  $R_L$  соответственно. В соответствии со вторым правилом Кирхгофа, напряжение между двумя катушками может быть выражено следующей формулой:

$$\left( R_s + R_t + j\omega L_t + \frac{1}{j\omega C_t} \right) I_t + j\omega M I_r = V_s,$$

$$j\omega M I_t + \left( R_L + R_r + j\omega L_r + \frac{1}{j\omega C_r} \right) I_r = 0. \quad (2)$$

После упрощения (2) полученная мощность на нагрузке приемника может быть вычислена как:

$$P_r = P_t Q_t Q_r \eta_t \eta_r k^2(d), \quad (3)$$

где  $P_t$  — передаваемая мощность источника,  $\eta_t$  и  $\eta_r$  — эффективность передатчика и приемника, вычисляемые по формуле:

$$\eta_t = \frac{R_s}{R_t + R_s}, \quad \eta_r = \frac{R_L}{R_r + R_L}. \quad (4)$$

$Q_t$  и  $Q_r$  — добротность передатчика и приемника, вычисляемые по формуле:

$$Q_t = \frac{\omega L_t}{R_t + R_s}, \quad Q_r = \frac{\omega L_r}{R_r + R_L}. \quad (5)$$

$k(x)$  — коэффициент фактора связи между двумя катушками. Коэффициент связи является функцией взаимной индуктивности, обозначенной как  $M$ , и собственной индуктивностью катушек передающей и приема. Его значение определяется следующим выражением:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_t L_r}}. \quad (6)$$

Если известен радиус катушек передающей и приема, а также расстояние зарядки между ними, коэффициент связи также может быть выражен в виде следующей функции:

$$k^2(d) = \frac{r_t^3 r_r^3 \pi^2}{(d^2 + r_t^2)^3}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (3), получим, что мощность, полученная передатчиком при соединении один к одному (SISO), приводится к следующему виду:

$$P_r = P_t Q_t Q_r \eta_t \eta_r \frac{r_t^3 r_r^3 \pi^2}{(d^2 + r_t^2)^3}. \quad (8)$$

**MISO**

На рис. 8б показана базовая модель для схемы MISO (несколько входов/один выход). Пусть  $N_t$  — это число передающих катушек. На резонансной частоте каждая катушка передатчика взаимодействует с катушкой

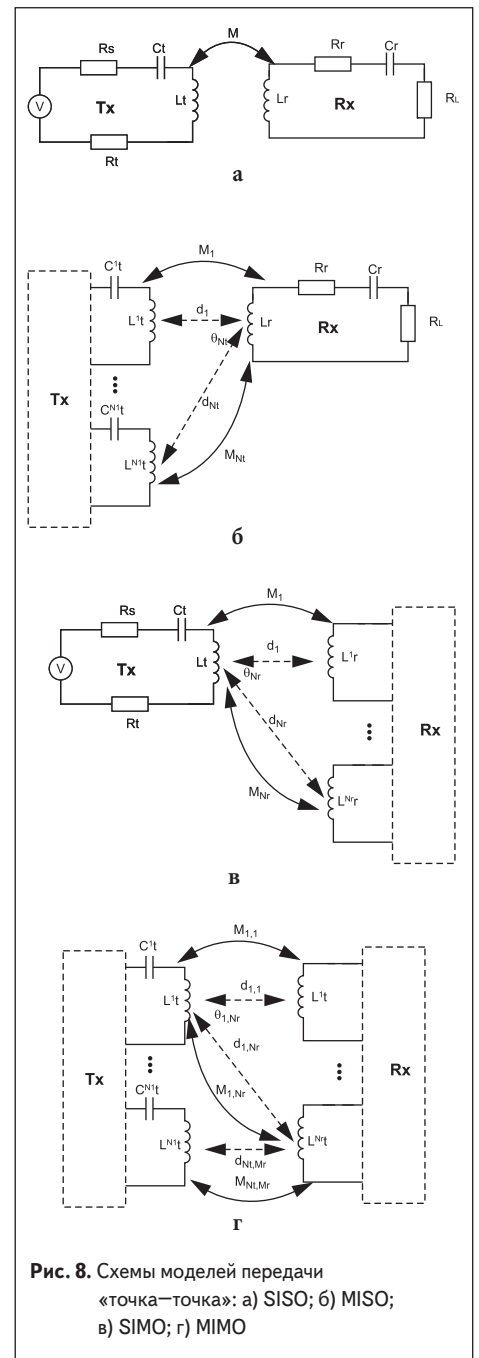


Рис. 8. Схемы моделей передачи «точка-точка»: а) SISO; б) MISO; в) SIMO; г) MIMO

приемника. Энергия, передаваемая на приемник от катушки передатчика,  $n \in \{1, \dots, N_t\}$ , рассчитывается по формуле:

$$P_r^n = P_t^n Q_t^n Q_r^n \eta_t^n \eta_r^n k_n^2(d_n), \quad (9)$$

где  $P_t^n$ ,  $Q_t^n$  и  $\eta_t^n$  — передаваемая энергия, добротность и эффективность передающей катушки  $n$  соответственно.

Эффективность передачи между передатчиком и приемником может быть вычислена по формуле:

$$k_n^2(d) = \frac{r_n^3 r_r^3}{(d_1^2 + r_n^2)^3} = \frac{r_n^3 r_r^3}{\left( \left( \frac{d_1}{\cos \theta_n} \right)^2 + r_n^2 \right)^3}, \quad (10)$$

где  $\theta_n$  — угол между  $d_1$  и  $d_n$ , как показано на рис. 8б, а  $r_n$  — радиус  $n$ -ной катушки передатчика.

Суммарная мощность, получаемая приемником в этом случае, может быть рассчитана по формуле:

$$P_r = Q_r \eta_r r_r^3 \left[ P_1 Q_1 \eta_1 \frac{r_1^3}{\left( \left( \frac{d_1}{\cos \theta_1} \right)^2 + r_1^2 \right)^3} + \dots + P_{N_t} Q_{N_t} \eta_{N_t} \frac{r_{N_t}^3}{\left( \left( \frac{d_{N_t}}{\cos \theta_{N_t}} \right)^2 + r_{N_t}^2 \right)^3} \right]. \quad (11)$$

В случае когда катушки передатчика идентичны, т. е.  $P_1 = P_2 = \dots = P_{N_t} = P_T$ ,  $Q_1 = Q_2 = \dots = Q_{N_t} = Q_T$ ,  $\eta_1 = \eta_2 = \dots = \eta_{N_t} = \eta_T$  и  $r_1 = r_2 = \dots = r_{N_t} = r_T$ , формула для расчета переданной энергии может быть приведена к виду:

$$P_r = P_T Q_T Q_r \eta_r \pi^2 r_r^3 r_r^3 \times \left[ \frac{1}{\left( 1 + \frac{r_T^2}{d_1^2} \right) d_1^6} + \dots + \frac{\cos^6 \theta_n}{\left( 1 + \frac{r_T^2 \cos^2 \theta_{N_t}}{d_n^2} \right) d_n^6} \right]. \quad (12)$$

### SIMO

На рис. 8в показана базовая модель для схемы подключения один вход/несколько выходов (SIMO). Пусть  $N_r$  — это число катушек приемника. Подобно схеме MISO, на резонансной частоте каждая катушка приемника взаимодействует с передающей катушкой, т. о. каждая катушка приемника получает свою порцию энергии от передатчика. Энергия, получаемая приемником,  $m \in \{1, \dots, N_r\}$ , рассчитывается по формуле:

$$P_r^m = P_T Q_T Q_r^m \eta_r^m k_m^2(d_m), \quad (13)$$

где  $Q_r^m$  и  $\eta_r^m$  — добротность и эффективность  $m$ -ой катушки приемника соответственно,  $d_m$  — это расстояние между катушкой  $m$  приемника и передающей катушкой.

Общая мощность, передаваемая приемнику, рассчитывается по следующей формуле:

$$P_r = P_T Q_T \eta_r \left( Q_r^1 \eta_r^1 k_1^2(d_1) + \dots + Q_r^{N_r} \eta_r^{N_r} k_{N_r}^2(d_{N_r}) \right), \quad (14)$$

где  $k_m^2(d_m)$  аналогичны формуле (10).

### MIMO

Пусть  $k_{n,m}$  и  $d_{n,m}$  обозначают коэффициент связи и расстояние между катушкой  $n$  приемника и катушкой  $m$  передатчика соответственно. Для расчетов в схеме подключения MIMO применяется система «точка-точка» (рис. 8г). Согласно ей приемник получает

энергию отдельно от каждой отдельной катушки передатчика. Перекрестные связи между катушками приемника и передатчика слабые. Мощность на катушке приемника  $m \in \{1, \dots, N_r\}$ , получаемая от  $n \in \{1, \dots, N_t\}$  катушки передатчика, рассчитывается по формуле:

$$P_r^{n,m} = P_t^n Q_t^n Q_r^m \eta_r^m k_{n,m}^2(d_{n,m}), \quad (15)$$

где  $k_{n,m}^2(d_{n,m})$  аналогичны формуле (10).

Полная переданная мощность может быть вычислена следующим образом:

$$P_r = \sum_{n=1}^{N_t} \sum_{m=1}^{N_r} P_r^{n,m}. \quad (16)$$

\*\*\*

На этом мы завершим первую часть статьи. В следующих публикациях будут подробно рассмотрены спецификации ведущих международных стандартов беспроводной зарядки и существующие их реализации, исследованы сетевые приложения, включая стратегии планирования статического зарядного устройства, мобильные беспроводные зарядные устройства и стратегии развертывания беспроводных зарядных устройств. Завершающие статьи цикла будут посвящены некоторым открытым направлениям исследований в области внедрения технологий БЗ, а также прогнозам некоторых будущих сетевых приложений. ■

Оригинал статьи опубликован в журнале IEEE Communications Surveys & Tutorials [www.researchgate.net/publication/281273340](http://www.researchgate.net/publication/281273340)

## НОВОСТИ

### Bluetooth Low Energy — сертифицированный BLE-модуль процессора приложений от STMicroelectronics



Компания STMicroelectronics запустила в серийное производство Bluetooth Low Energy (BLE) модуль SPBTLE-1S. Новинка содержит процессор приложений SoC BlueNRG-1, высокочастотные осцилляторы, балун и чип-антенну. Применение этого модуля разработчиками позволяет избежать трудностей, связанных с дизайном высокочастотных цепей. SPBTLE-1S утвержден VQE и сертифицирован FCC, IC и CE-RED (директива по средствам радиосвязи

и телекоммуникационному оконечному оборудованию), что облегчает получение разрешений для конечных изделий. Модуль поставляется с сертифицированным стеком протокола Bluetooth 4.2, а программный пакет разработки (SDK) содержит широкий диапазон Bluetooth-профилей и примеры кода приложений.

Габариты модуля составляют 11,5 × 13,5 мм, что в сочетании с широким диапазоном напряжения питания 1,7–3,6 В делает SPBTLE-1S оптимальным решением для миниатюрных объектов с прямым батарейным питанием. Высокая выходная мощность +5 дБм и хорошая чувствительность помогают максимизировать расстояние передачи данных и обеспечить ее высокую надежность.

Микросхема BlueNRG-1, являясь центральным элементом модуля, реализует физический и канальный уровни BLE. Ее вычислительная часть, выполняющая прикладные и сетевые задачи, состоит из энергоэффективного низкочастотного ядра ARM Cortex-M0 (160 кбайт flash, 24 кбайт RAM) и сопроцессора безопасности. Микросхема реализует «умное» управление питанием с DC/DC-преобразователем, способным питать весь модуль, что оптимизирует энергетическую эффективность решений

на его основе. Модуль имеет обширный набор интерфейсов, включая UART, два порта I<sup>2</sup>C, порт SPI, порт однопроводной отладки и 14 выводов GPIO. Внутренняя периферия включает два многофункциональных таймера, 10-разрядный АЦП, сторожевой таймер, часы реального времени, контроллер DMA и интерфейс аудиопотока PDM — идеальный вариант для разработки приложений, управляемых голосовыми командами.

Оценочная плата, содержащая модуль SPBTLE-1S, STEVAL-IDB007V1M сочетает его с МЭМС-датчиками давления и температуры, светодиодами, кнопками и интерфейсом программирования для запуска демонстрационного приложения прямо из «коробки». Плата имеет Arduino-совместимый разъем для быстрого расширения функционала проекта и полностью совместима с существующей платформой STEVAL-IDB007V1.

Другая оценочная плата, STEVAL-BLUEMIC-1, содержит, кроме самого модуля, МЭМС-микрофон и 3D-инерционный модуль (акселерометр и гироскоп).

Модуль SPBTLE-1S способен работать в температурном диапазоне –40...+85 °С.

[www.ptelectronics.ru](http://www.ptelectronics.ru)