

# Готовые решения компании easyRF для IoT

**Стремительное развитие «Интернета вещей» (Internet of Things, IoT) способствует появлению устойчивого спроса на высокоинтегрированные электронные компоненты, реализующие функции сбора, предварительной обработки и обмена информацией между отдельными узлами, объединенными в единую сеть. Компания easyRF, с недавних пор представленная и на российском рынке, предлагает ряд малогабаритных устройств, обладающих низким собственным энергопотреблением и обеспечивающих передачу данных в нелицензируемых диапазонах частот. Готовые модули на основе однокристалльных микросхем известных производителей помогают максимально быстро организовать надежный радиоканал связи.**

**Константин Верхулевский**  
info@icquest.ru

## Введение

Концепция IoT подразумевает использование глобальной сети для решения задач мониторинга, измерения, управления и объединения практически любых устройств, обмен информацией между которыми имеет смысл. В одних случаях передаваемая информация может являться результатом выполнения основной функции устройства (различные датчики и измерительные модули), в другом случае это вспомогательные данные, повышающие удобство эксплуатации, например сервисные уведомления о текущем состоянии оборудования.

Процесс подключения отдельных элементов к сети стартовал примерно десять лет назад. Изначально это были проводные сети доступа к энергетическому оборудованию и к дорогостоящей промышленной технологической аппаратуре. Последние пять лет в мире стремительно растет число M2M-сетей, объединяющих счетчики энергии, развиваются навигационные сервисы слежения за автомобильным транспортом и беспроводные системы безопасности. По оценкам экспертов аналитической компании J'son & Partners Consulting, занимающейся маркетинговыми исследованиями технологий, в 2015 г. объем рынка IoT превысил 16 млрд устройств, что в денежном выражении составило \$109 млрд. Прогноз на 2020 г. предполагает плавную эволюцию, ожидается, что мировой спрос на такие устройства вырастет до 34 млрд шт. общей стоимостью около \$359 млрд (рис. 1).

Существенный рост числа объединенных в сеть приборов стал возможен благодаря развитию беспроводных технологий. Электронные компоненты для беспроводной передачи данных занимают видное место в линейках всех без исключения крупных производителей микросхем. Также в структуре компаний появляются специализированные подразделения, ориентированные исключительно на проектирование и производство решений для IoT, а молодые фирмы, имеющие оригинальные разработки в этой сфере, активно раскупаются крупными игроками.

В настоящее время IoT особенно востребован в таких областях, как медицина, безопасность, промышленная автоматизация, интеллектуальные сети, удаленное управление объектами, инженерные и охранные системы зданий. Все эти применения требуют наличия высокоинтегрированных компонентов передачи и обработки данных с малыми габаритными размерами и низким собственным энергопотреблением для увеличения срока автономной работы. Кроме того, современные беспроводные устройства для «Интернета вещей» должны удовлетворять следующим требованиям:

- максимально возможная дальность устойчивой связи;
- минимальная цена беспроводного модуля для каждого класса изделий;
- простота и надежность эксплуатации;
- обеспечение информационной безопасности соединения;

- возможность масштабирования без значительных дополнительных затрат;
  - соответствие международным стандартам.
- Решение всех вышеперечисленных задач является обязательным условием для вывода конкурентоспособного изделия на такой насыщенный рынок.

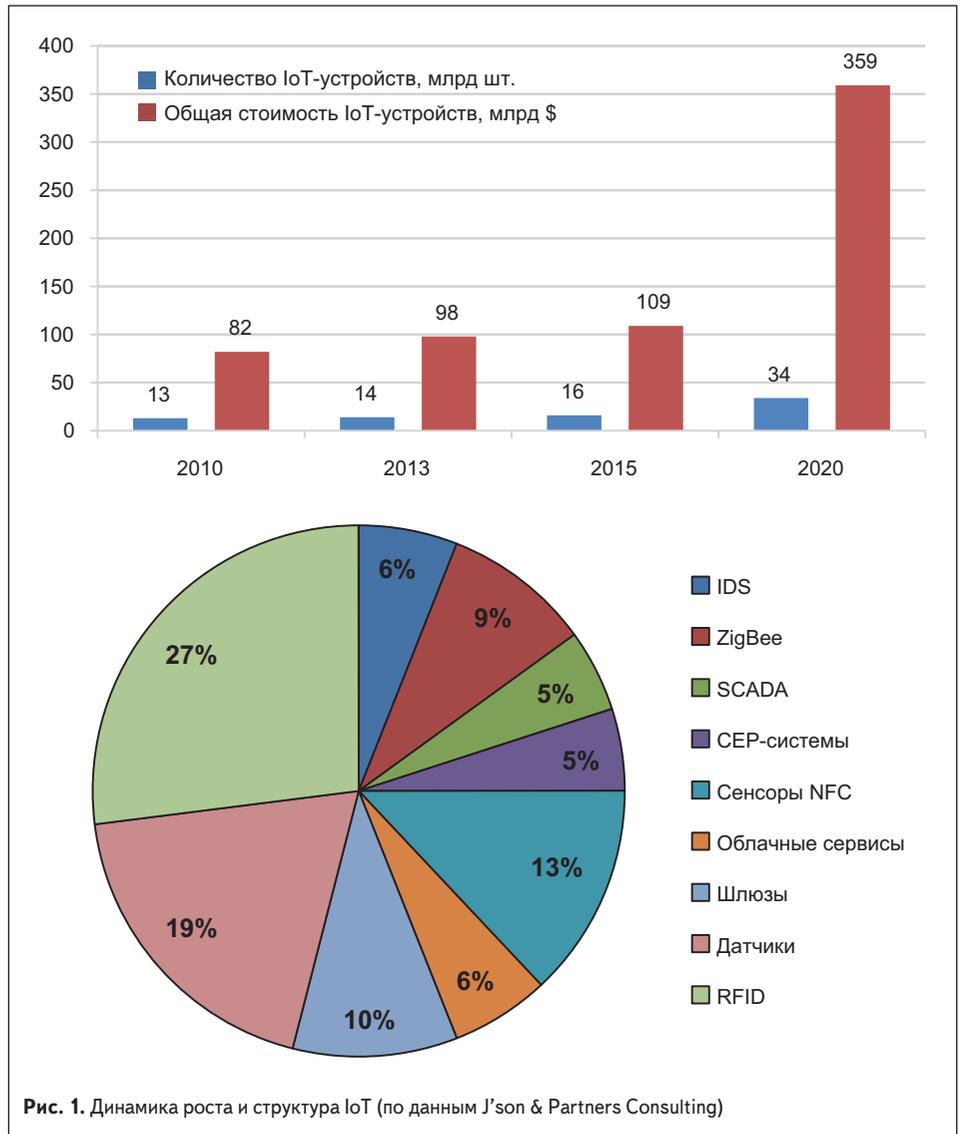
Компания easyRF осуществляет разработку и изготовление беспроводных коммуникационных устройств [1]. Приоритетные сферы применения — промышленное оборудование, системы безопасности и автоматизация зданий. В каталоге продукции компании — готовые к эксплуатации беспроводные модули на основе микросхем известных производителей, а также спроектированные на заказ аппаратные решения, изготовленные в соответствии с требованиями потребителей. Отличительной особенностью устройств являются контроль качества на всех стадиях производства, отличная техническая поддержка, привлекательные цены и гибкая система скидок.

### Однокристалльные трансиверы easyRF в модульном исполнении

В настоящее время доступно множество компонентов для построения систем беспроводной связи. Наиболее распространенные среди них — однокристалльные трансиверы, в которых все необходимые узлы приемопередатчиков объединены в одном корпусе. Полученные микросхемы можно использовать в собственных разработках, но более перспективным и экономически выгодным способом является применение компактных модулей на их основе, не требующих дополнительного расчета, разводки и распайки внешних согласующих цепей. Как правило, для внедрения таких модулей в проектируемые устройства необходима только антенна, рассчитанная на соответствующий частотный диапазон.

Малогобаритные полнофункциональные модули ERF2000 и ERF2001 с чувствительностью приема до -126 дБм и программируемой выходной мощностью передатчика идеально подходят для реализации двухсторонней связи на небольшие расстояния [2, 3]. Они поддерживают пакетную и беспакетную обработку данных с огромным числом настроек и уровней автоматизации, выпускаются с контактами под поверхностный монтаж и имеют сертификацию FCC, ETSI, ARIB и 802.15.4d. Диапазон питающих напряжений 1,8–3,6 В и гибкая система настройки собственного энергопотребления позволяют использовать их в устройствах с батарейным питанием. Основные рабочие характеристики, напрямую зависящие от базового чипа, представлены в таблице 1.

Базовыми чипами модулей являются однокристалльные трансиверы компании Silicon Labs: Si4431 у ERF2000 и Si4460 у ERF2001. В общем случае они предназначены для эксплуатации в диапазонах 240–930 и 142–1050 МГц соответственно, но в данных применениях номиналы и основные параметры их пассивной «обвязки» адаптированы под частоту 868 МГц. Оба трансивера поддерживают модуляции



типов FSK, GFSK и OOK и имеют возможность псевдослучайной перестройки рабочей частоты (FHSS), что позволяет повысить эффективность приема/передачи данных в каналах, подверженных сильным замираниям. Скорость передачи устанавливается пользователем, максимальное значение не превышает 1 Мбит/с (у модуля ERF2001). Структурные схемы, за редким исключением, идентичны. Рассмотрим основ-

ные блоки и их взаимодействие на примере ИС Si4431 (рис. 2).

Трансивер Si4431 работает с временным разделением каналов приема и передачи [4]. В режиме приема при помощи смесителей выполняется квадратурное преобразование с однократным понижением частоты входного FSK/GFSK/OOK модулированного сигнала. Такая схема получила наибольшее

Таблица 1. Основные характеристики трансиверов easyRF

	ERF2000	ERF2001
Рабочая частота, МГц	868	
Чувствительность приемника, дБм	-121	-126
Выходная мощность передатчика, дБм	до +13	
Скорость передачи данных	до 256 кбит/с	до 1 Мбит/с
Антенна	Внешняя	
Тип модуляции	FSK, GFSK или OOK	
Интерфейсы связи	SPI	
Дополнительная периферия	8-битный АЦП, датчик температуры	
Напряжение питания, В	1,8–3,6	
Собственное энергопотребление	15 нА (режим отключения); 18,5 мА (режим приема); 30 мА (режим передачи при выходной мощности +13 дБм)	30 нА (режим отключения); 13 мА (режим приема); 18 мА (режим передачи при выходной мощности +10 дБм)
Диапазон рабочих температур, °С	-40...+85	
Габаритные размеры, мм	16×16×4	

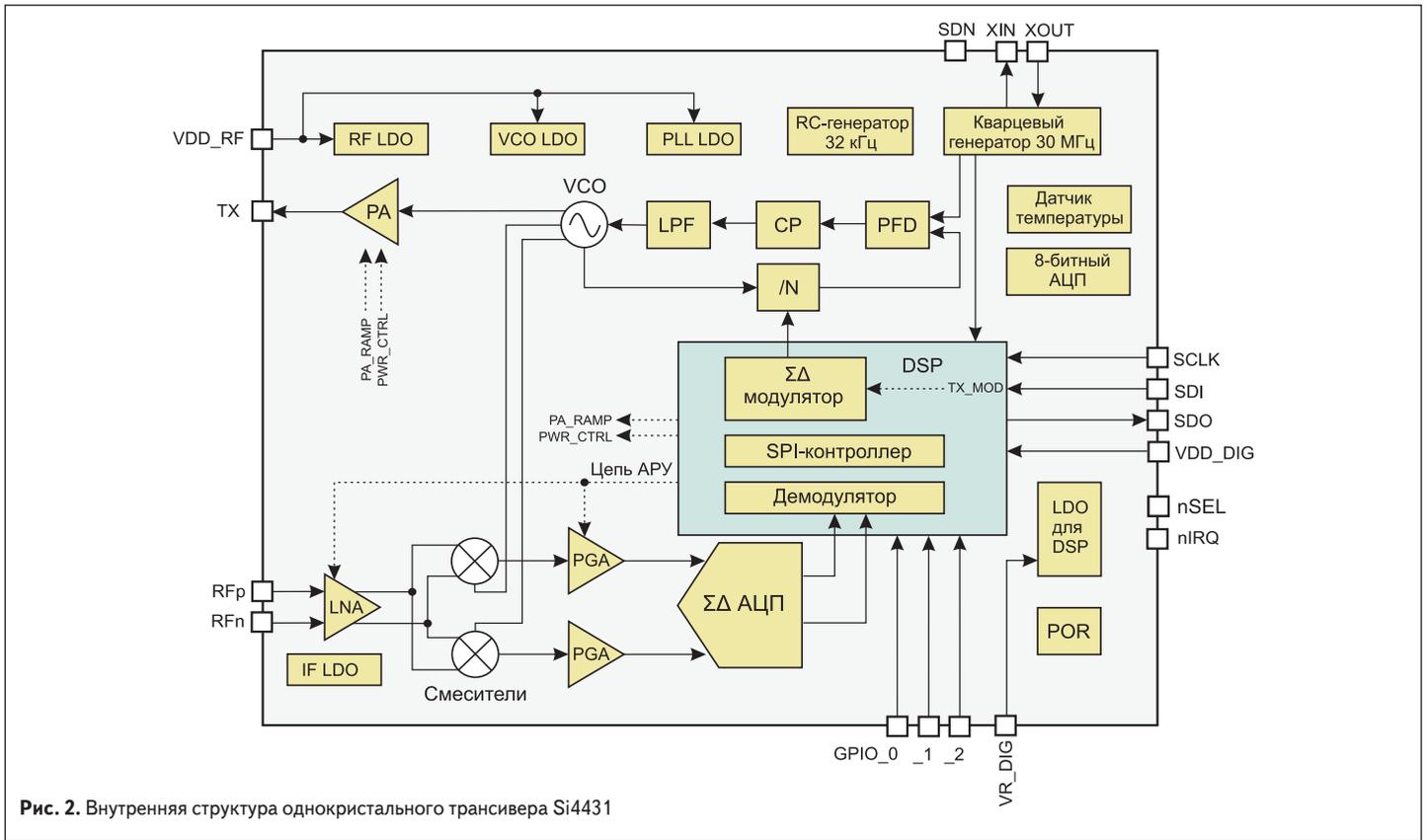


Рис. 2. Внутренняя структура однокристалльного трансивера Si4431

распространение в современных однокристалльных решениях, поскольку позволяет реализовать лучшие характеристики радиоприемного тракта в плане чувствительности и избирательности по соседнему каналу по сравнению со схемой прямого преобразования.

Полученные сигналы промежуточной частоты после усилителей с программируемым коэффициентом (PGA) поступают на высокопроизводительный двухканальный  $\Sigma\Delta$  АЦП, где переводятся в цифровое представление. Программируемые и входной малошумящий

(LNA) усилители охвачены цепью обратной связи, обеспечивающей автоматическую регулировку усиления. Встроенный цифровой сигнальный процессор (DSP) реализует функции фильтрации, демодуляции и обработки пакета данных, в том числе детектирования преамбулы

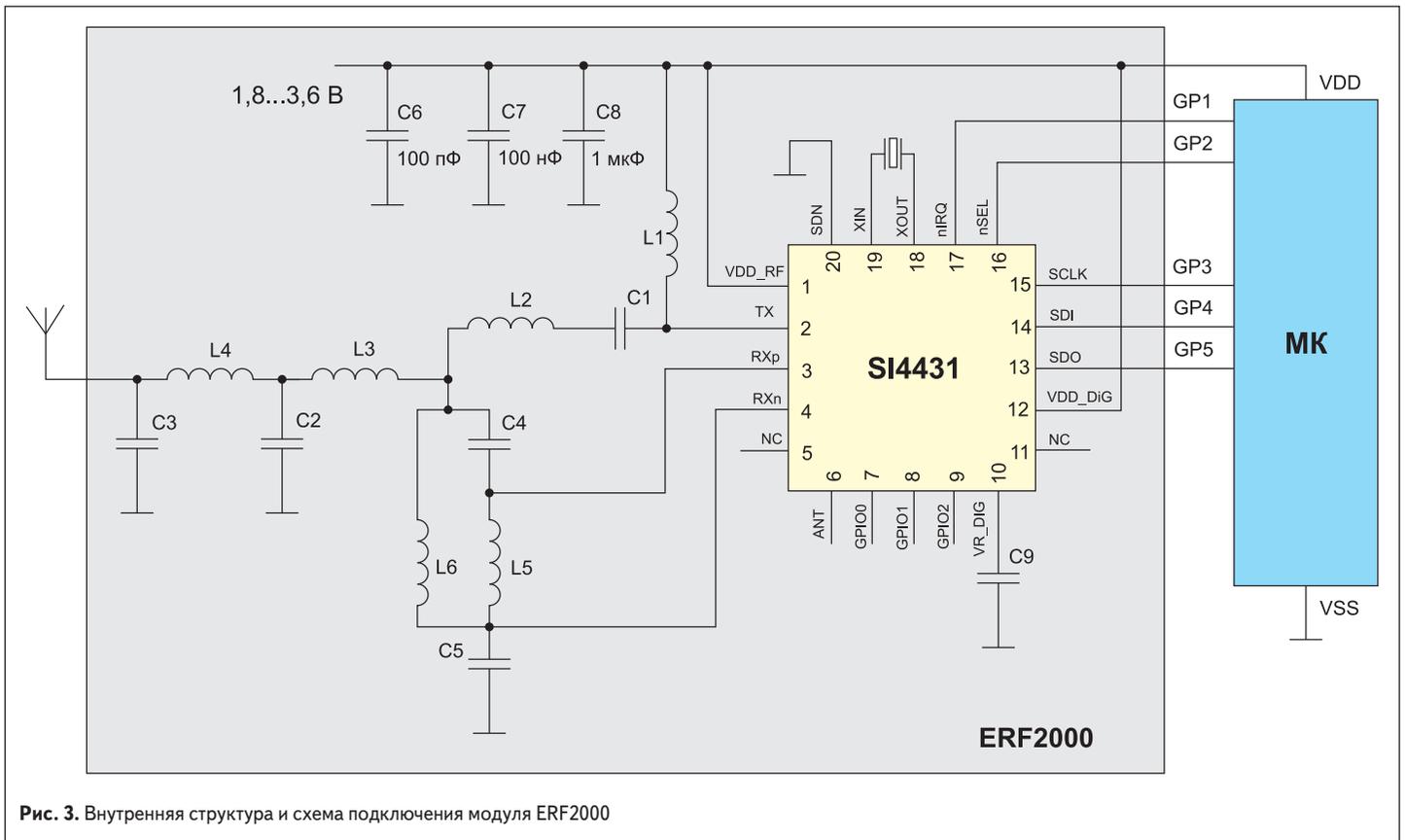


Рис. 3. Внутренняя структура и схема подключения модуля ERF2000

и индикации мощности принимаемого сигнала (RSSI) с разрешением 0,5 дБ. Параметры цифрового фильтра зависят от заданного вида модуляции, его полоса пропускания программируется в пределах от 2,6 до 620 кГц. Обработанное значение демодулированного сигнала может быть передано на управляющий микроконтроллер посредством последовательного интерфейса связи SPI.

Так как приемник и передатчик не функционируют одновременно, то для обеспечения их работы используется один прецизионный гетеродин. Блок гетеродина образуется из встроенного генератора, управляемого напряжением (VCO), и синтезатора с ФАПЧ, имеющего дробный коэффициент деления частоты. Генерируемый сигнал с высокой разрешающей способностью (шаг 312 Гц) используется для получения конфигурируемых значений скорости передачи данных, рабочей частоты и ее девиации. Основным источником тактовых импульсов для синтезатора частоты является кварцевый генератор на 30 МГц, который также обеспечивает синхронизацию цифровой части микросхемы.

В радиопередающем тракте сигнал гетеродина модулируется с помощью цифрового модулятора и через усилитель мощности (PA) подается на выход передатчика. Для проверки целостности передаваемых данных выполняется автоматическая генерация циклической контрольной суммы CRC. При использовании GFSK-модуляции подключается фильтр низких частот Гаусса для устранения нежелательных спектральных составляющих. Программируемые значения выходной мощности в пределах от -8 до +13 дБм с шагом 3 дБ и возможность подключения различных антенн позволяют оптимизировать характеристики модулей для каждого конкретного приложения. Для упрощения согласования с антенной выход УМ сделан несимметричным.

В трансивер также интегрированы датчик температуры с погрешностью измерения 0,5 °С во всем диапазоне рабочих температур и 8-битный АЦП, помогающие уменьшить габариты и стоимость изделия. Конфигурируемые выводы общего назначения, каждый из которых можно независимо запрограммировать на выполнение определенной функции, полезны при организации взаимодействия с управляющим контроллером. Ряд дополнительных опций трансивера, таких как таймер запуска, цепь определения низкого заряда батареи, генерирующая сигнал прерывания при достижении заданного порога, FIFO TX/RX буфер размером 64 байт, позволяют использовать для управления недорогой микроконтроллер. Электрическая принципиальная схема модуля ERF2000 и его соединение с микроконтроллером показаны на рис. 3.

Цепь согласования импедансов C4, C5, L5, L6 обеспечивает согласование входа приемника с антенной и выходным фильтром передатчика C1–C3, L2–L4. Дроссель L1 является нагрузкой выходного каскада передатчика. Номиналы C1–C5 и L1–L6 зависят от диапазона частот и режима выходного каскада. Нагрузочные конденсаторы для кристалла кварца интегрированы в микросхему трансивера. Они могут

программно подстраиваться для компенсации ухода частоты задающего генератора при изменении температуры окружающей среды или корпуса в процессе работы путем использования встроенного датчика температуры.

### Однокристалльные радиомодули easyRF с интегрированным микроконтроллером

Данная линейка продукции представлена тремя модулями: ERF1000, ERF1001 и ERF1002, рассчитанными на наиболее популярные нелцензируемые ISM-частоты: 2400, 433 и 868 МГц соответственно [5, 6, 7]. Они могут найти применение в различных IoT-системах: домашней автоматизации, оборудовании для удаленного мониторинга, беспроводной передачи данных, системах промышленного управления и контроля, медицинской аппаратуре и т. д. Радиомодули представляют собой полностью завершенные решения, применение которых позволяет уменьшить сроки разработки, решить ряд вопросов по сертификации, а также быстро реализовать мелкосерийные проекты. Все необходимые для работы беспроводного узла сети компоненты сгруппированы на малогабаритной печатной плате размерами 15×16 мм. Устройства с такими габаритами могут быть размещены в непосредственной близости к компактным датчикам и прочим IoT-компонентам. Диапазон рабочих температур — промышленный (-40...+85 °С).

Основные параметры как радиочастотной части, так и встроенного процессорного ядра показаны в таблице 2.

В качестве примера рассмотрим характеристики модуля ERF1000 (рис. 4). Он изготавливается с применением микросхем нового семейства «систем-на-кристалле» (System-on-Chip, SoC) SAMR21, представленного компанией Atmel в 2015 г. [8]. Его основное назначение — построение интеллектуальных сетей беспроводных датчиков и исполнительных устройств с аккумуляторным питанием. Используемое в модуле однокристалльное решение представляет собой микроконтроллер на базе ядра CortexM0+ (максимальная тактовая частота 48 МГц) и интегрированный радиотрансивер AT86RF233 с несущей частотой 2,4 ГГц, максимальной выходной мощностью +4 дБм, чувствительностью приема -99 дБм и скоростью передачи данных до 250 кбит/с.

За радиочастотные параметры модуля отвечает AT86RF233 — многофункциональный малопотребляющий приемопередатчик, ориентированный на применение в промышленных и потребительских приложениях стандартов IEEE 802.15.4, ZigBee, 6LoWPAN и оборудовании ISM-диапазона частот. Помимо приемника и передатчика, он содержит цифровой блок модуляции/демодуляции и цепь синтезатора частоты с ФАПЧ. Двухнаправленные дифференциальные линии подключения антенны позволяют отказаться

Таблица 2. Основные характеристики радиомодулей easyRF

	ERF1000	ERF1001	ERF1002
Базовый чип	Atmel ATSAMR21G18A-MU (ядро ARM Cortex M0+)	-	-
Рабочая частота, МГц	2400	433	868
Чувствительность приемника, дБм	-99	-120 (на скорости 1,2 кбит/с)	
Выходная мощность передатчика, дБм	+4	-	-
Скорость передачи данных, кбит/с	250	до 600 (при FSK-модуляции)	
Антенна	Встроенная (чип) или внешняя		
Алгоритм шифрования данных	AES		
Интегрированная память, кбайт	256 (Flash), 32 (SRAM)	128 (Flash), 16 (SRAM)	
Тактирование	16 МГц кварцевый резонатор, 32-битный RTC-таймер	32 МГц кварцевый резонатор, 32-битный RTC-таймер	
Максимальная тактовая частота, МГц	48		
Защита	Сторожевой таймер, детектор пониженного напряжения		
Интерфейсы связи и отладки	SWD, USB 2.0 (12 Мбит/с), USART, I <sup>2</sup> C, SPI	SPI, два I <sup>2</sup> C, три UART с DMA	
Таймеры	Шесть 16-битных таймеров/счетчиков	Шесть таймеров/счетчиков с ШИМ-выходами	
АЦП	12-битный, 8-канальный, 350 квыб/с	16-битный	
Дополнительная периферия	Два аналоговых компаратора, контроллер емкостного сенсорного экрана	12-битный ЦАП с DMA и встроенным буфером	
Интерфейс ввода/вывода	До 26 выводов общего назначения	4 вывода с током нагрузки 18 мА	
Напряжение питания, В	1,8–3,6		
Собственное энергопотребление	2,5 мА (холостой режим); 4,1 мА (режим ожидания); 11,8 мА (режим приема)	1,2 мА (холостой режим); 1,3 мА (режим ожидания); 15,0 мА (режим приема)	
Диапазон рабочих температур, °С	-40...+85		
Габаритные размеры, мм	15×16×3,6		

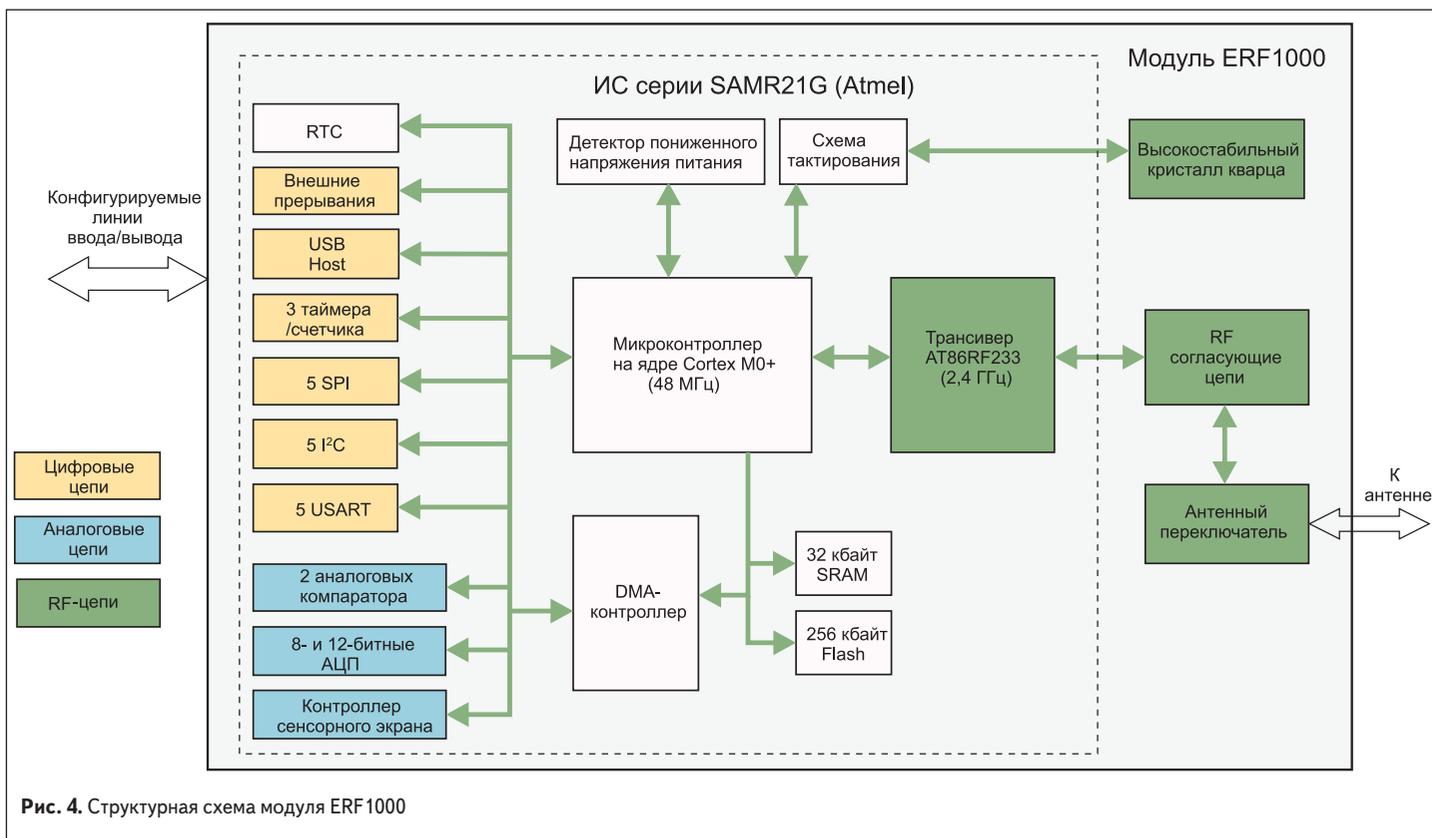


Рис. 4. Структурная схема модуля ERF1000

от использования внешнего переключателя антенны. Приемник и передатчик оснащены FIFO-буферами по 128 байт RAM. Встроенная схема управления напряжением питания, состоящая из LDO-регуляторов, обеспечивает питание аналоговой и цифровой части ИС от шины питания напряжением 1,8–3,6 В.

Другие особенности:

- программируемая выходная мощность передатчика от –17 до +4 дБм;
- простой в использовании интерфейс управления регистрами, буферами данных и модулем кодирования AES посредством скоростного SPI;
- возможность использования скачкообразной смены частоты;
- схема мониторинга заряда батареи и быстрый выход из режима сна (менее 0,4 мс);
- 128-битный аппаратный модуль шифрования по стандарту AES для защиты данных;
- наличие функции разнесенной антенны, улучшающей характеристики радиоканала и надежность связи;
- несколько режимов пониженного энергопотребления для увеличения срока автономной работы.

Характеристики интегрированного микроконтроллера аналогичны параметрам 32-битного семейства SAMD21 компании Atmel. Его отличительной особенностью является наличие модулей последовательного коммуникационного интерфейса (SERCOM), полностью программно конфигурируемых для работы с шинами I2C, USART/UART и SPI. Благодаря четырем имеющимся «на борту» модулям SERCOM, разработчик может гибко адаптировать различные периферийные узлы под задачи конкретного приложения, при этом существует возможность выбора используемых выводов. 12-канальный

контроллер прямого доступа к памяти (DMA) разгружает процессор от обслуживания операций ввода/вывода, способствуя увеличению общей производительности. С помощью аппаратно реализованного контроллера AtmelQTouch можно создавать сенсорные интерфейсы с большим количеством элементов управления (кнопок, слайдеров, дисковых элементов ввода и т. д.). Контроллер отличается высокой чувствительностью и стойкостью к помехам, а также имеет схему автоматической калибровки, устраняя тем самым необходимость пользовательской настройки. Встроенный микроконтроллер также оснащен полноскоростным (12 Мбит/с) интерфейсом USB 2.0 с поддержкой режимов USB Device и USB Host.



Рис. 5. Внешний вид отладочной платы на базе модуля ERF1000

Главное же нововведение — использование высокоэффективного ядра Cortex-M0+ с оптимизированными системами питания и тактирования. Пониженное энергопотребление достигается использованием системы событий, позволяющей периферийным блокам взаимодействовать между собой без участия ЦПУ и выводить его из режима сна только в заранее определенных случаях. Объем интегрированной flash-памяти (256 кбайт) достаточно для программного решения задач обработки полученных данных, также она может использоваться для «прошивки» стека выбранного протокола. Аналоговая периферия представлена восьмиканальным 12-битным АЦП общего назначения и двумя компараторами. Порты ввода/вывода могут использоваться для обмена данными с внешними устройствами, обработки внешних прерываний или в качестве ШИМ-выходов нескольких таймеров.

### Демонстрационные платы для модуля ERF1000

Оценочные платы позволяют продемонстрировать все возможности модуля ERF1000. Для максимально быстрого внедрения модулей в проекты комплект поставки содержит одну плату с Ethernet-интерфейсом (рис. 5), выступающую в качестве шлюза, и две упрощенные платы, предназначенные для применения в оконечных узлах сети [9]. Также в комплект поставки входят:

- антенна на 2,4 ГГц;
- JTAG-программатор/отладчик;
- преобразователь напряжения с питанием от USB-порта.

Каждая плата включает в себя богатый набор аппаратных интерфейсов: для связи с внешними устройствами USB, RS-232, RS-485, IrDa и JTAG

для отладки встроенного ПО. Графический LCD-экран, джойстик и сенсорный поворотный переключатель помогают организовать удобный интерфейс пользователя. Широкий спектр датчиков в интегральном исполнении (освещенности, приближения, давления, влажности), а также 3D-акселерометр, гироскоп и магнитометр позволяет выполнить тестовый сбор типовых данных с удаленных узлов.

В некоторых применениях демонстрационную плату можно использовать непосредственно в своих устройствах без внесения дополнительных исправлений в конструкцию и схемотехнические решения (рис. 6). Этому способствует наличие готовых программных решений. Серверная часть написана с использованием популярного фреймворка Node JS Express, клиентская — на основе Angular JS и Bootstrap CSS. Из других особенностей интересны полная поддержка протоколов IPv4 и IPv6, возможность применения в самосинхронизирующихся многоячейковых сетях и удаленного обновления встроенного ПО, а также использование HTTP для легкой интеграции в веб-сервисы.

## Заключение

Рост числа устройств, подключенных к IoT, способствует широкому использованию малогабаритных изделий беспроводной передачи данных. Модули компании easyRF, построенные на основе микросхем известных производителей, отличаются широкими функциональными воз-

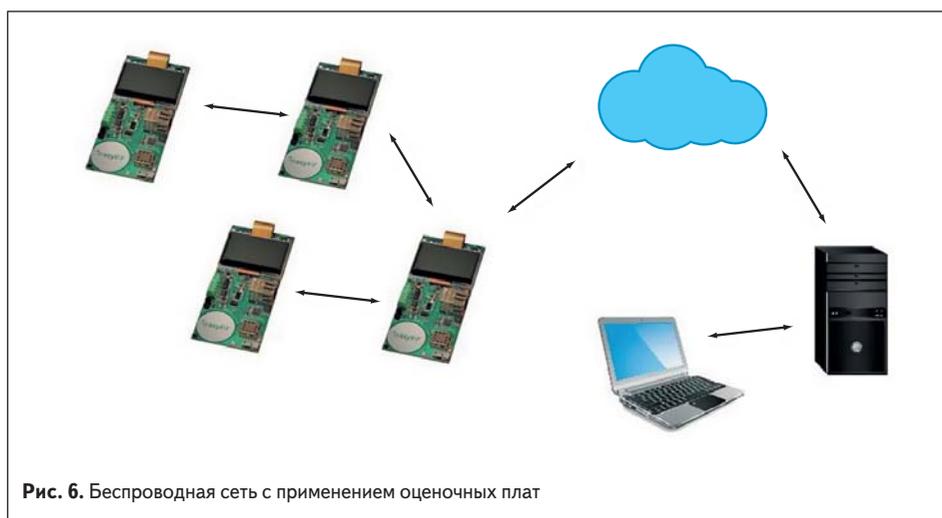


Рис. 6. Беспроводная сеть с применением оценочных плат

можностями, простым цифровым интерфейсом и очень малым током потребления. Они оптимально подходят для недорогих компактных автономных устройств, входящих в состав беспроводных сетей различного типа. ■

## Литература

1. [easyrf.eu](http://easyrf.eu)
2. <http://easyrf.eu/userfiles/documents/ERF2000EasyRF.pdf>
3. <http://easyrf.eu/userfiles/documents/ERF2001EasyRF.pdf>
4. [www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/Si4430-31-32.pdf](http://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/Si4430-31-32.pdf)
5. <http://easyrf.eu/userfiles/DATASHEETEASYRF-ERF1000.pdf>
6. <http://easyrf.eu/userfiles/DATASHEETEASYRF-ERF1001.pdf>
7. <http://easyrf.eu/userfiles/DATASHEETEASYRF-ERF1002.pdf>
8. [www.atmel.com/images/atmel-42223-samr21\\_datasheet.pdf](http://www.atmel.com/images/atmel-42223-samr21_datasheet.pdf)
9. <http://easyrf.eu/userfiles/documents/ERF1000-EvalKitEasyRF.pdf>