

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИАПАЗОНОВ 433 И 868 МГц В СИСТЕМАХ ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕЛЕМЕТРИИ

ОЛЕГ ПУШКАРЕВ, o.pushkarev@compel.ru

Выбор частотного диапазона оказывает существенное влияние на характеристики проектируемой беспроводной системы, т.к. этот параметр неразрывно связан с дальностью связи, пропускной способностью, энергопотреблением и даже с финансовыми и инженерными затратами на проектирование. В статье будут рассмотрены преимущества и недостатки субгигагерцевых безлицензионных диапазонов частот по сравнению с диапазоном 2,4 ГГц, широко используемым в потребительской электронике.

В диапазоне 2,4 ГГц работают такие популярные стандарты как Bluetooth, Wi-Fi и ZigBee. Однако значит ли это, что это лучший выбор разработчика при проектировании любой системы? Разумеется, нет. Субгигагерцевые диапазоны обеспечивают ряд преимуществ в виде большей дальности, сниженного энергопотребления, меньшей стоимости для таких приложений как системы безопасности и сбора данных со счетчиков энергии, низкоскоростные устройства промышленной телеметрии и домашней автоматизации. Примерное соотношение дальности связи и скорости передачи данных для различных беспроводных стандартов приведено на рисунке 1.

В Российской Федерации выделены два субгигагерцевых диапазона частот, где возможно безлицензионное применение радиопередающих устройств — 443 и 868 МГц. Термин «безлицензионный» означает, что потребитель может использовать радиопередающие устройства без специальных разрешений и регистрации.

Однако необходимо, чтобы технические характеристики радиопередающих устройств отвечали техническим требованиям, утвержденным решениями Государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ). За это отвечает производитель этих устройств, подтверждая соответствие их параметров установленным нормам.

ГКРЧ — межведомственный координационный орган, действующий при Министерстве связи и массовых коммуникаций РФ и регулирующий на коллегиальной основе использование радиочастотного спектра в РФ. Основные требования к радиопередающим устройствам субгигагерцевых диапазонов приведены в таблице 1. Следует отметить, что распределение российских участков частот в диапазоне 868 МГц не совпадает с европейским. В частности, в РФ не разрешены к свободному применению мощные передатчики диапазона g3 (869,4...869,650 МГц), которые позволяют достигать дальности связи в десятки километров (см. рис. 2).

По сравнению с диапазоном 2,4 ГГц приемопередатчики диапазонов 433 и 868 МГц представляют собой относительно простые беспроводные решения, которые могут десятилетиями работать от батарей, обеспечивая при этом устойчивую связь не только на открытом пространстве.

ДАЛЬНОСТЬ СВЯЗИ

Увеличенная дальность связи систем субгигагерцевого диапазона по сравнению с диапазоном 2,4 ГГц обусловлена несколькими факторами. В диапазонах 433 и 868 МГц можно использовать более узкую полосу приемника, что позволяет достигать значения чувствительности до -125 дБм, по сравнению с -102 дБм у микросхем 2,4 ГГц. Сужению полосы пропускания приемника препятствует долговременная нестабильность кварцевого резонатора, которая умножается на больший коэффициент для высокочастотного диапазона 2,4 ГГц. При прохождении через препятствия внутри зданий радиоволны субгигагерцевого диапазона ослабляются в меньшей степени, что особенно заметно в железобетонных зданиях. Даже на открытом пространстве затухание низкочастотного сигнала меньше, т.к. дальность распространения радиоволн прямо пропорциональна длине волны (обратно пропорциональна частоте сигнала). Инженерное правило гласит: увеличение частоты в два раза приводит к двойному сокращению дистанции связи. Зависимость затухания радиосигнала в свободном пространстве определяется формулой Фрииса:

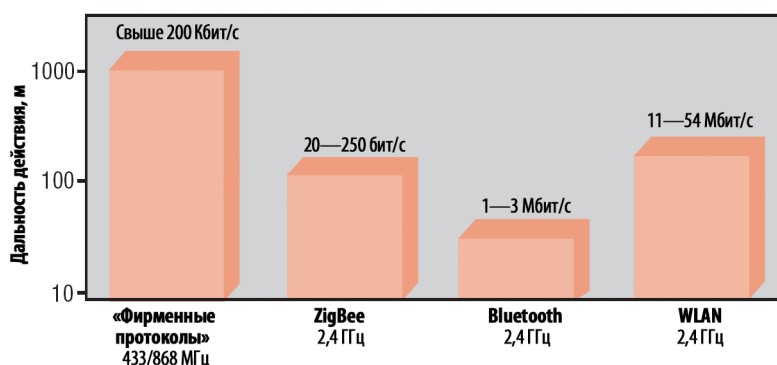


Рис. 1. Примерное соотношение дальности связи и скорости передачи данных для различных беспроводных стандартов

$$\text{Path loss} = 20 \cdot \log_{10} \left[\frac{4 \cdot \pi \cdot d}{\lambda} \right], \text{ (дБ)},$$

Таблица 1. Основные технические характеристики и условия использования устройств беспроводной передачи данных в диапазонах 433 и 868 МГц

Частота, МГц	Основные характеристики	Назначение	Регламентирующий документ
433,075...434,79	10 мВт (EN 300 220) (Рабочий цикл не ограничен)	Неспециализированные (любого назначения) устройства — устройства малого радиуса общего применения, включая устройства дистанционного управления и передачи телеметрии, телеуправления, сигнализации, передачи данных и других подобных передач.	Приложение 1 к решению ГКРЧ от 7 мая 2007 г. № 07-20-03-001
433,05...434,79	5 мВт (Рабочий цикл < 10%)	Устройства охранной радиосигнализации — системы радиосигнализации, включающие системы общественной радиосигнализации и системы радиосигнализации для обеспечения безопасности.	Приложение 3 к решению ГКРЧ от 7 мая 2007 г. № 07-20-03-001
868...868,2	10 мВт (Рабочий цикл < 10%)	Устройства охранной радиосигнализации — системы радиосигнализации, включающие системы общественной радиосигнализации и системы радиосигнализации для обеспечения безопасности.	Приложение 3к решению ГКРЧ от 7 мая 2007 г. № 07-20-03-001
864...865	25 мВт (EN 300 220) Рабочий цикл 0,1%	Неспециализированные (любого назначения) устройства — устройства малого радиуса общего применения, включая устройства дистанционного управления и передачи телеметрии, телеуправления, сигнализации, передачи данных и других подобных передач. Запрещается использование в пределах аэропортов (аэродромов).	Приложение 11к решению ГКРЧ от 07 мая 2007 г. № 07-20-03-001
868,7...869,2	25 мВт (EN 300 220)	Неспециализированные (любого назначения) устройства — устройства малого радиуса общего применения, включая устройства дистанционного управления и передачи телеметрии, телеуправления, сигнализации, передачи данных и других подобных передач.	Приложение 11 к решению ГКРЧ от 07 мая 2007 г. № 07-20-03-001
863...865	10 мВт (EN 301 357) Рабочий цикл 100%	Беспроводное аудиооборудование — устройства малого радиуса действия, используемые для передачи данных между акустическими системами, наушниками, микрофонами и другими аудиоустройствами.	Приложение 14 к решению ГКРЧ от 07 мая 2007 г. № 07-20-03-001

В таблице не представлены основные технические характеристики и условия использования устройств радиочастотной идентификации 868 МГц, требующих присвоения (назначения) радиочастот или радиочастотных каналов в установленном порядке.

где d — расстояние; λ — длина волны (в той же размерности, что и d).

В данном случае подразумевается, что приемная и передающая антенны имеют коэффициент усиления, равный единице.

Ослабление радиосигнала в зависимости от расстояния и частоты продемонстрировано на рисунке 3. Для оценки качества радиосвязи применяется понятие энергетического потенциала радиолинии или бюджета радиолинии (Link margin), который показывает, насколько сигнал на входе приемника превышает его предельную чувствительность. Бюджет радиолинии вычисляется по следующей формуле:

$$\text{Link margin (дБ)} = \text{TX power} - \text{RX sensivity} + \text{ANT gain} - \text{Path loss},$$

где TX power — выходная мощность передатчика, дБм; RX sensivity — чувствительность приемника, дБм; ANT gain — совокупный коэффициент усиления приемной и передающей антенны, дБи; Path loss — затухание сигнала на радиотрассе, дБ.

Для устойчивой связи бюджет радиолинии должен быть не менее 10...20 дБ. Допустимый разброс этого параметра может определяться типом

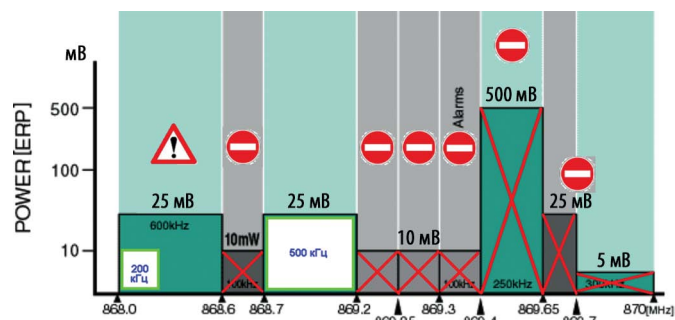


Рис. 2. Разрешенные полосы в 868...870 МГц

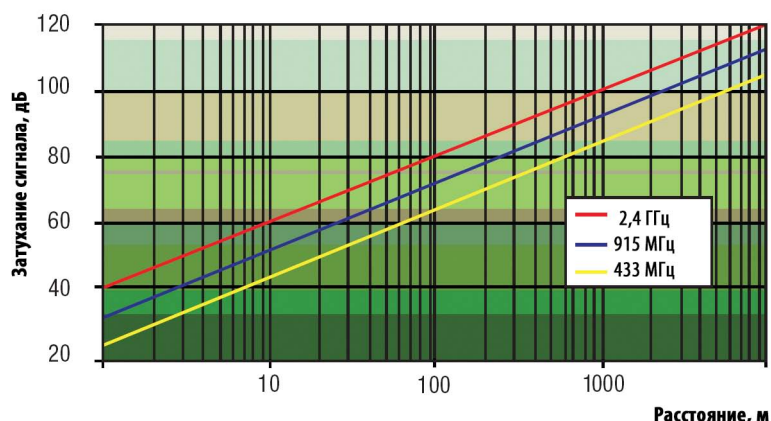


Рис. 3. Затухание сигнала на разных частотах

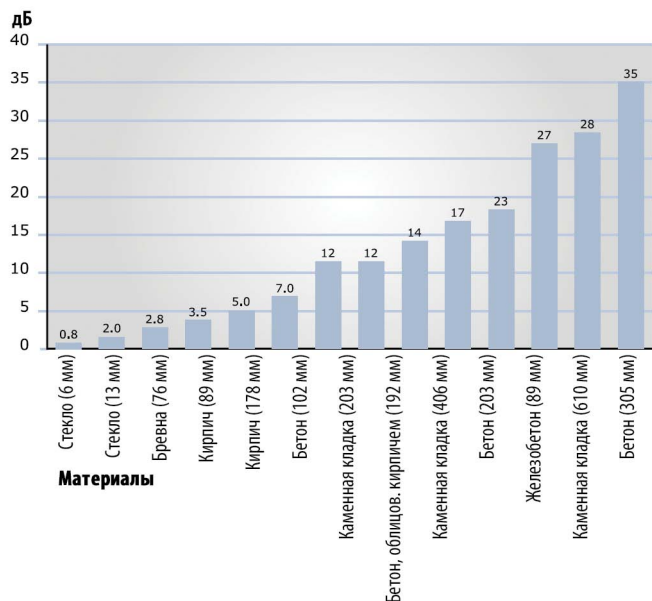


Рис. 4. Ослабление сигнала на частоте 900 МГц различными препятствиями

модуляции, наличием избыточного кодирования и каких-либо методов расширения спектра. Очень опасно строить беспроводную систему, которая не имеет достаточного запаса энергетического потенциала. Классический пример такого рода — развернутая зимой система становится совершенно неработоспособной в летние месяцы из-за распутившейся листвы деревьев.

Если между приемником и передатчиком располагаются какие-то препятствия, то дополнительное ослабление сигнала определяется типом и толщиной материала (см. рис. 4).

Радиоволны субгигагерцового диапазона характеризуются большей дифракцией, т.е. способностью огибать препятствия. К сожалению, радиоволны диапазона 2,4 ГГц распространяются

подобно световому лучу, и попадание приемной антенны в зону радиотени даже от относительно небольшого объекта может нарушать связь. Например, для модулей XBee Pro 2,4 ГГц заявленная дальность связи в 3 км легко подтверждается экспериментом. На практике она достигает даже 4 км. Однако на таком большом расстоянии любое препятствие между приемной и передающей антеннами (человек, дерево, столб, машина) приводит к уменьшению количества успешно принятых пакетов с 80% до 0.

ГАБАРИТЫ ИЗДЕЛИЙ

Выбранный диапазон частот практически не влияет на габариты изделия с точки зрения размеров и количества компонентов на печатной плате. Однако размер антенны прямо пропорционален длине волны, поэтому субгигагерцевые системы имеют антенны большего размера. Инженерная формула для расчета длины антенны в виде четвертьволнового штыря имеет следующий вид:

$$\text{Length(cm)} = \frac{7500}{\text{freq(Гц)}}$$

Длина антенны для диапазона 433 МГц составляет 17,3 см, для диапазона 868 МГц — 8,2 см. Разумеется, существуют миниатюрные антенны и для диапазонов 433 МГц, например,



Рис. 5. Полноразмерные и миниатюрные антенны



Мультисистемные навигационные модули GeoС



GeoС-3М

- 32 спутниковых канала слежения
- Размер: 14x14x2,5 мм
- Время первого определения: 28/25/2 с
- Чувствительность: -144/-161 дБмВт
- Потребление: < 100 мВт

- Поддержка A-GNSS и D-GNSS
- Режимы энергосбережения
- Изменяемое напряжение ввода/вывода для упрощенной интеграции в системы 3,3 В
- Готов для ЭРЫ ГЛОНАСС



GeoС-3

- 32 спутниковых канала слежения
- Размер: 22,1x15,9x2,5 мм
- Время первого определения: 28/25/2 с
- Чувствительность: -144/-161 дБмВт
- Потребление: < 100 мВт

- Поддержка A-GNSS и D-GNSS
- Режимы энергосбережения
- Изменяемое напряжение ввода/вывода для упрощенной интеграции в системы 3,3 В
- Готов для ЭРЫ ГЛОНАСС



GeoС-1М

- 24 спутниковых канала слежения
- Размер: 35x33x3,5 мм
- Время первого определения: 36/32/4 с
- Чувствительность: -141/-151 дБмВт
- Потребление: 350 мВт

- Лидер продаж российского рынка 2010-2011 гг.
- Внесен в Государственный реестр средств измерений



GeoС-1

- 24 спутниковых канала слежения
- Размер: 47x35x9 мм
- Время первого определения: 36/32/4 с
- Чувствительность: -141/-151 дБмВт
- Потребление: 400 мВт

- ОЕМ модуль для объемного монтажа (MMCX, розетка)
- Внесен в Государственный реестр средств измерений

РЕКЛАМА



(812) 441-23-31
www.atoma.spb.ru



(812) 667-33-85
www.auroramobile.ru



(495) 995-09-01
www.compel.ru

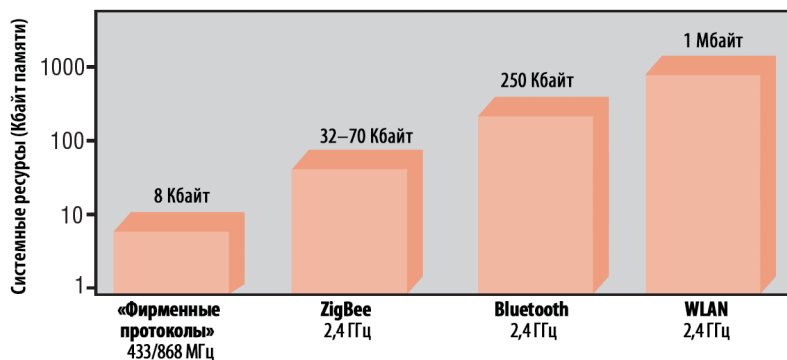


Рис. 6. Объем памяти для различных стеков протоколов

керамические чип-антенны, однако их эффективность меньше, чем у полно-размерных, т.е. тех антенн, размер которых соизмерим с длиной волны (см. рис. 5).

В отличие от 2,4 ГГц антенны 433 и 868 МГц могут работать на кабель длиной в единицы метров. Затухание сигнала диапазона 2,4 ГГц в коаксиальном кабеле достаточно велико, поэтому на практике для данного диапазона вынос антенны на расстояние большее, чем несколько десятков сантиметров, едва ли возможно.

ПОМЕХОВАЯ ОБСТАНОВКА

В диапазоне 2,4 ГГц работает большое количество потребительской электроники – Wi-Fi-роутеры и компьютеры, телефоны с Bluetooth и микроволновые печи. Особенностью данных источников помех является то, что они могут работать продолжительное время. Например, Wi-Fi-роутер может часами и сутками работать на максимальной мощности при закачке фильмов. Что касается микроволновых печей, то их влияние, исходя из опыта автора, сильно преувеличено. Диапазон 433 МГц в крупных населенных пунктах также загружен многочисленными устройствами охранной сигнализации, однако все эти устройства включаются, как правило, лишь на короткое время, поэтому их влияние можно нивелировать правильным алгоритмом отправки пакетов — необходимо применять контроль доставки и повторные отправки сообщений. Наиболее спокойным относительно количества помех на текущий момент представляется диапазон 868 МГц, возможно, потому, что безлицензионным он стал в нашей стране относительно недавно.

ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ

В общем случае, чем выше рабочая частота системы, тем больше потребление тока. Это относится как процессорам, работающим с разными тактовыми частотами, так и к высокочастотным устройствам. Например, типо-

вое потребление ZigBee-трансивера составляет 20...40 мА в диапазоне 2,4 МГц, в то время как трансиверы субгигагерцевых диапазонов имеют потребление в пределах 10...20 мА. Это касается, в основном, активного режима работы трансивера, т.к. в режиме сна параметры потребления не зависят от частотного диапазона. Для снижения энергопотребления важно, чтобы трансивер переходил из состояния сна в режим передачи за короткое время. У современных микросхем это время достигает единиц микросекунд, что позволяет строить на них системы со скачкообразной перестройкой частоты даже в субгигагерцевых диапазонах.

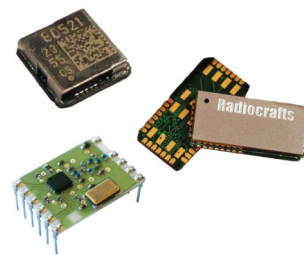
Продолжительность работы в 10 и более лет от батарей обеспечивается периодическим засыпанием устройства на время от долей секунд до десятков минут. В моменты сна обмен данными по эфиру невозможен. При необходимости поддерживать 100% готовность радиолинка (по времени) нужно, чтобы приемник постоянно находился в активном режиме. Лучшие пакетные трансиверы имеют потребление порядка единиц мА в диапазонах 433 и 868 МГц. Минимальное потребление в активном режиме приема обеспечивают простейшие свержегенеративные приемники, однако они характеризуются низкими значениями чувствительности и избирательности. Например, радиомодуль Telecontrolli STE-RX-868 потребляет 0,7 мА, а радиомодуль RR18-433 всего лишь 70 мкА.

Чем дальше устройство находится в спящем состоянии, тем меньше требуемая емкость батарей для обеспечения заданного времени автономной работы. Обратная сторона спящего режима — снижение мгновенной доступности связи.

СЛОЖНОСТЬ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Любая беспроводная система представляет собой не только аппаратные средства («железо»), но и программное обеспечение, реализующее радиопро-

Рис. 7. Радиочастотные модули разных производителей на базе трансивера CC1101



токол. В диапазоне 2,4 ГГц в основном используются стандартные стеки протоколов (Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee), которые довольно сложны с программной точки зрения. Для их реализации требуется повышенный объем флэш-памяти микроконтроллера (МК) — от 1 МБ для Wi-Fi до десятков КБ для ZigBee (см. рис. 6). Проприетарные протоколы для субгигагерцевого диапазона укладываются в единицы Кбайт, например, стек Silicon Labs EzMacPro. Кроме объема памяти стандартные протоколы требуют повышенной вычислительной мощности МК. Использование проприетарных протоколов во многих случаях оказывается более выгодным с точки зрения временных затрат на разработку. Преимущество же стандартных технологий в виде совместимости с оборудованием других производителей имеет значение главным образом в потребительской электронике. Едва ли разработчику системы охраны или сбора данных с промышленного оборудования нужно стремиться к тому, чтобы к его системе можно было подключать устройства конкурирующего производителя.

КАКИЕ КОМПОНЕНТЫ ДОСТУПНЫ?

Практически каждый крупный производитель микросхем выпускает свою номенклатуру чипов для субгигагерцевого диапазона. Это трансиверы, отдельные микросхемы приемников и передатчиков и многофункциональные ИС, включающие высокочастотную часть и 8–32-разрядный процессор (см. табл. 2). Для тех, кто в силу недостаточности опыта или просто нехватки времени не хочет заниматься разводкой высокочастотных цепей, на рынке предлагаются радиочастотные модули с различной степенью интеграции. В простейшем случае радиомодуль может представлять собой микросхему трансивера, запаянную на плату с необходимой обвязкой. Довольно популярны модули на базе пакетных трансиверов Texas Instruments (см. рис. 7). Например, радиомодуль Panasonic PAN2355, построенный на базе микросхемы CC1101, имеет размеры

Таблица 2. Радиочастотные микросхемы субгигагерцевого диапазона

(Таблица не отражает полной номенклатуры радиочастотных микросхем. Исчерпывающая информация доступна на сайтах компаний-производителей)

Микросхема (Производитель)	Особенности	Диапазон частот, МГц	Скорость передачи, макс.	Чувствительность, дБм	Выходная мощность, дБм	Напряжение питания, В
Texas Instruments						
CC1101	Пакетный трансивер с гибкими настройками. Автоматическое формирование и проверка контрольной суммы. Автокоррекция ошибок. Пакетный и потоковый режим	300...348 387...464 779...928	500	-116	+12	1,8...3,6
CC110L	Пакетный трансивер с гибкими настройками. Бюджетная версия CC1101	300...348 387...464 779...928	600	-116	+12	1,8...3,6
CC113L/CC115L	Отдельный приемник/передатчик на основе CC110L	300...348 387...464 779...928	600	-116	+12	1,8...3,6
CC1121	Пакетный трансивер с повышенной устойчивостью к помехам	164...192 410...480 820...928	200	-117	+16	2,0...3,6
CC1120	Узкополосный (12,5 кГц) пакетный трансивер с повышенной устойчивостью к помехам	164...192 410...480 820...928	200	-123	+16	2,0...3,6
CC1110F8/16/32	Система-на-кристалле на основе трансивера CC1101 и МК 8051	300...348 391...464 782...928	500	-112	+10	2,0...3,6
CC1180	Сетевой процессор стандарта 6LoWPAN	300...348 391...464 782...928	200	-112	+10	2,0...3,6
CC430	Система-на-кристалле на основе трансивера CC1101 и МК MSP430	300...348 391...464 782...928	500	-117	+12	2,0...3,6
Analog Devices						
ADF7023	Пакетный трансивер с малой потребляемой мощностью. Аппаратное шифрование AES-128, коррекция ошибок кодами Рида-Соломона	431...464 862...928	300	-116	+13,5	1,8...3,6
ADF7021-V	Узкополосный (12,5 кГц) пакетный трансивер с высокой чувствительностью	431...464 862...928	24	-125	+13	2,3...3,6
ADF7012	Передатчик с широким диапазоном установки частоты	75...1000	179	-	+14	2,3...3,6
Silicon Labs						
Si4330	Приемник EZRadio® с программируемой полосой 2,6...620 кГц	240...960	256	-121	-	1,8...3,6
Si4031	Передатчик EZRadio® с программируемой выходной мощностью	240...930	256	-	+13	1,8...3,6
Si4431	Трансивер EZRadio®	240...930	256	-121	+13	1,8...3,6
Si1000	Система-в-корпусе на базе трансивера EZRadio® и МК 8051. Встроенный DC/DC-преобразователь. Повышенная выходная мощность	240...960	256	-121	+20	0,9...3,6
Microchip						
MRF89XAM9A	Пакетный трансивер с малым потреблением (3 мА) в режиме активного приема	863...870 902...928	200	-113	+12,5	2,1...3,6
MRF49XA	Пакетный трансивер с регулировкой полосы пропускания. Аналоговый и цифровой индикатор RSSI	430...439 860...879 900...929	256	-110	+7	2,2...3,8
rfPIC12F675F/H	МК PIC12 с интегрированным передатчиком	380...450 859...930	40	-	+10	2,0...5,5
Semtech						
SX1233/ SX1231	Высокоскоростной пакетный трансивер с высокой устойчивостью к помехам. Индикатор RSSI с диапазоном 115 дБм	290...340 424...510 862...1020	600/300	-120	+17	1,8...3,6
SX1212	Пакетный трансивер с низким энергопотреблением. Оптимизирован для бюджетных приложений	300...510	150	-110	+12,5	2,1...3,6
SX1240	АМ/ЧМ-передатчик с возможностью работы без внешнего микроконтроллера	418 433 864,868,869	100	-	+10	1,8...3,7
SX1239	АМ/ЧМ-приемник с высокой избирательностью	290...340 424...510 862...1020	300	-120	-	1,8...3,6

Таблица 2. (Продолжение). **Радиочастотные микросхемы субгигагерцевого диапазона**
(Таблица не отражает полной номенклатуры радиочастотных микросхем. Исчерпывающая информация доступна на сайтах компаний-производителей)

Микросхема (Производитель)	Особенности	Диапазон частот, МГц	Скорость передачи, макс.	Чувствительность, дБм	Выходная мощность, дБм	Напряжение питания, В
Freescale Semiconductor						
MC13260	Система-в-корпусе на базе трансивера и МК с ядром ARM926EJ-S™ MCU. Голосовой кодек (предварительная информация)	60...960	600	-122	+5	2,675...2,875
Nordic Semiconductor						
nRF905	Бюджетный пакетный трансивер	430...928	50	-100	+10	1,9...3,6
nRF9E5	Система-на-кристалле на основе трансивера nRF905 и МК 8051	430...928	50	-100	+10	1,9...3,6



Рис. 8. Радиомодуль Xbee 868 со встроенным протоколом DigiMesh



Рис. 9. Радиомодуль RXQR7



Рис. 10. Радиомодуль APC240-43

всего лишь 8x8 мм. Для отправки пакета здесь необходимо запрограммировать многочисленные внутренние регистры трансивера CC1101. Относительная сложность управления компенсируется невероятной гибкостью — разработчик может настраивать вид модуляции, скорость передачи данных, полосу пропускания приемника, длину пакета и множество других параметров.

Радиомодуль Xbee 868 LP (см. рис. 8) включает не только трансивер (ADF7023), но и 32-разрядный процессор на ядре Cortex-M3, реализующий фирменный протокол DigiMesh. Для российских потребителей этот модуль интересен тем, что имеет максимальную выходную мощность, разрешенную в РФ для диапазона 868 МГц (25 мВт), и позволяет построить сеть со спящими ретрансляторами. Дальность связи составляет 4 км на открытом пространстве и до 200 м внутри помещений. Скорость передачи данных в радиоканале составляет 80 кбит/с. Потребление модуля в режиме сна составляет единицы микроампер, поэтому на его основе можно строить протяженные сети, где все узлы будут работать от батарей в течение нескольких лет. Управление модулем заключается в подаче простых AT-команд конфигурации, передача данных может производиться в прозрачном режиме.

В последние годы все большее распространение получают системы-на-кристалле и системы-в-пакете, интегрирующие в одной микросхеме высокочастотный трансивер и МК. Радиомодули на их основе позволяют создавать полностью законченные функциональные узлы, которые не только передают, но и хранят данные, обслуживают датчики и реализуют интерфейс с пользователем. Например, радиомодуль Telecontrolli RXQR7-868 (см. рис. 9) построен на базе чипа Silicon Labs Si1010, где в одном корпусе интегрирован радиочастотный трансивер, МК с 51 ядром (25 MIPS, 16 Кбайт флэш-памяти, 768 В RAM) и усилитель мощности. Чувствительность модуля в узкополосном режиме достигает -121 дБм, выходная мощность регулируется в широких пределах: 1...20 дБм. Низкое потребление и широкий диапазон питающего напряжения позволяют реализовать на базе данного модуля радиоинтерфейсы к счетчикам электричества, газа и воды.

Радиомодуль APC240-43 (см. рис. 10) на базе трансивера Semtech SX1212 будет интересен для тех разработчиков, которым требуется простой в применении и готовый к употреблению радиоканал в диапазоне 433 МГц. Пара таких модулей реализуют функционал «беспроводный UART», т.е. все данные,

отправляемые на последовательный порт одного модуля, можно получить на выходе другого на расстоянии до 700 м. К несомненным достоинствам модуля можно отнести простоту подключения, широкий диапазон питающего напряжения (2,1...5,5 В) и минимальный ток потребления в режиме приема (5 мА).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современная элементная база позволяет создавать малопотребляющие и недорогие субгигагерцевые решения для систем охраны, промышленной телеметрии и беспроводных систем сбора данных со счетчиков энергии, в том числе и с батарейным питанием. Беспроводные системы передачи данных для безлицензионных диапазонов 433 и 868 МГц имеют ряд преимуществ перед системами 2,4 ГГц. Они хорошо зарекомендовали себя в условиях городской застройки и при работе внутри помещений. Широкая номенклатура микросхем и радиомодулей разной степени интеграции позволяет создавать устройства, оптимизированные для каждой конкретной задачи, а, следовательно, более совершенные в техническом плане и экономически более выгодные по сравнению с решениями на базе стандартных технологий диапазона 2,4 ГГц.