

## Радиомодули диапазона ISM компании RADIOCRAFTS

Очень часто при разработке устройств и систем самого различного назначения возникает задача беспроводной передачи данных на расстояния от десятков метров до нескольких километров. Как правило, для таких задач используется диапазон частот ISM (Industrial, Scientific, Medical), не требующий регистрации устройств при ограниченной мощности передатчика. В статье дан обзор функционально завершенных радиомодулей компании RADIOCRAFTS (Норвегия) для реализации задач беспроводной телеметрии в ISM-диапазоне. Описаны конкретные примеры применения радиомодулей, позволяющих как организовывать передачу в режиме «точка–точка», так и строить сложные сети, в том числе сети ZigBee на основе стандарта IEEE 802.15.4.

Александр СТРАТИЕНКО  
san@rainbow.msk.ru

Работая над задачей беспроводной передачи данных, разработчики ищут решения, которые позволяли бы добиться наибольшей дальности и устойчивости связи, потребляли бы как можно меньше энергии для увеличения периода автономной ра-

боты, не требовали бы регистрации и платы за использование частотного ресурса, имели бы привлекательную цену и были бы просты в освоении. Все перечисленное является необходимым для быстрого выхода на рынок с конкурентоспособным продуктом. Причем,

как правило, системные интеграторы ищут готовые радиомодули, не требующие для работы установки какого-либо ПО, разработчики устройств склонны поработать с микросхемами трансиверов и создать свой продукт. Компромиссом в решении таких задач могут стать продукты «субинтеграторского» уровня — функционально завершенные встраиваемые модули.

Компания RADIOCRAFTS предлагает разработчикам семейства малогабаритных модулей в корпусах для поверхностного монтажа размером 12,7×25,4×3,5 мм либо 16,5×35,6×3,5 мм (рис. 1, таблица), которые перекрывают весь ISM-диапазон, учитывая распределение частотного ресурса во всех регионах мира. Для России актуальны модули, работающие в диапазоне частот 433, 868 и 2400 МГц [1]. Особенностью RADIOCRAFTS является специализация на протокольных модулях, то есть модулях, содержащих встроенный контроллер с ПО и дающих разработчику доступ к конфигурации устройства с помощью системы команд через интерфейс UART. Такие модули позволяют легко организовывать беспроводные сети.

Таблица. Описание малогабаритных модулей в корпусах для поверхностного монтажа

Семейство модулей	Тип	Частота, МГц	Макс. выходная мощность, дБмВт	Чувствительность приемника, дБм	Количество каналов	Макс. скорость передачи в эфире, кбит/с	Примечание
Самые простые с наименьшим энергопотреблением	RC1040	433,05–434,79	9	–95	5	19,2	протокол RC232 <sup>2)</sup>
	RC1081	868–870	3	–106	17	19,2	
	RC1090	902–928	–1	–95	9	19,2	
Узкополосные с увеличенной дальностью связи до 2...4 км	RC1210	418,72–419,45	8	–112	30	4,8	Протокол RC232
	RC1230	426,025–429,925	10	–115	71	2,4	Протокол RC232
	RC1240	433,05–434,79	8	–115	69	4,8	Протокол RC232
	RC1250	424,7–447,99	10	–117	80	2,4	Протокол RC232
	RC1280	868–870	3	–110	80	4,8	Протокол RC232
	RC1280HP <sup>1)</sup>	868–870	500	–115	3/10 <sup>3)</sup>	4,8	Сборка: RC1280 + усилитель мощности
	RC1290	902–928	2	–110...–106	90	19,2	–110 дБм при 4,8 кбит/с –106 дБм при 19,2 кбит/с
Модули для построения Mesh-сетей	RC1380-S-LP	869,40–869,65	10	–110	5	4,8	ведомое устройство (slave) маломощное
	RC1380-S-HP		17	–110	5	4,8	ведомое устройство повышенной мощности
	RC1380-M-HP		17	–110	5	4,8	мастер сети
Модули для высокоскоростной передачи данных	RC2000	2400–2483	–3	–101...–91	83	1024	FSK, –87 дБм (при 1 Мбит/с)
	RC2100	0	–94		250	DSSS	
Аппаратная платформа для ZigBee	RC2200	2400–2483	0	–94	16, по IEEE 802.15.4 (silicon MAC на CC2420)	250	128 кбайт Flash
	RC2202				250	32 кбайт Flash	
	RC2204				250	64 кбайт Flash	
Готовый модуль со стеком ZigBee	RC2200 AT-SPPIO	2400–2483	0	–94	16, по IEEE 802.15.4	250	с профилем «Serial Port Profile and I/O mapping» (SPPIO)
Аппаратная платформа для ZigBee	RC2300	2400–2483	0	–94	16, по IEEE 802.15.4	250	128 кбайт Flash
	RC2302						128 кбайт Flash, определение координат в сети
	RC2302						32 кбайт Flash
	RC2304						64 кбайт Flash

<sup>1)</sup> предназначен для некоторых стран Европы, где максимальная разрешенная ЭИИМ (эквивалентная изотропно излучаемая мощность) в ISM-диапазоне составляет 0,5 Вт. При этом соотношение длительности периодов передачи и приема не менее 0,1.

<sup>2)</sup> 3 канала при максимальной мощности.

<sup>3)</sup> протокол RC232, разработанный RADIOCRAFTS, не путать с RS-232 [2]



Рис. 1. Внешний вид малогабаритного модуля в корпусе для поверхностного монтажа

**Семейства RC10x0 и RC12x0**

Эти семейства очень близки по принципу работы и отличаются параметрами радиоканала, построенного на трансиверах от CHIPCON/TI. Модули объединяются в сеть под управлением протокола RC232 (не путать с распространенным последовательным интерфейсом RS-232). Этот протокол определяет взаимодействие модулей на сетевом уровне и позволяет работать с 256 кластерами по 256 модулей в каждом. Таким образом, общее количество модулей при топологии сети «звезда» составит 65 536 (64К). Если сравнить спецификации на трансивер CC1100 и RC10x0, принцип работы последнего станет еще понятнее. Выражаясь терминами семиуровневой модели OSI, управление доступом к среде, вычисление CRC, управление приемопередающим трактом реализовано в трансивере аппаратно (PHY+MAC уровень), а в контроллере внутри модуля происходит обработка сообщений на уровне кластеров. Кроме того, имеется возможность задавать мощность, номер канала, формировать условия передачи сообщения в эфир, управлять конфигурацией сети, измерять напряженность поля — сигнал RSSI, что может быть использовано в алгоритмах предупреждения коллизий. Все эти и другие настройки хранятся в энергонезависимой памяти. Это избавляет от необходимости изучать трансиверы от CHIPCON/TI (так, описание трансивера CC1100 состоит из примерно 80 страниц), а сосредоточиться на собственно задаче беспроводной телеметрии, например, организации подтверждений о доставке пакетов (квотирования), временного мультиплексирования для предотвращения коллизий и т. д.

Рассмотрим принцип организации связи сначала на примере двух модулей в конфигурации «точка-точка» (рис. 2). Каждый модуль имеет несколько параметров, отвечающих за адресацию и работу в сети. Наиболее часто используемые из них следующие:

- SYSTEM\_ID (SID) — номер кластера, значения — 0...0xFF(256); все модули, работающие в одном кластере, должны иметь одинаковый SYSTEM\_ID.
- UNIQUE\_ID (UID) — собственный адрес модуля в кластере; не должно быть более одного модуля в кластере с одинаковым UNIQUE\_ID.
- DESTINATION\_ID (DID) — адрес модуля, к которому происходит обращение.

Адрес модуля, к которому происходит обращение, должен быть занесен в ячейку DID модуля-источника посылки и наоборот.

Если необходимо передать широковещательную посылку, принимаемую всеми модулями, но обязательно одного кластера с одинаковым SID, необходимо в ячейку DID записать значение 0xFF (рис. 3). По умолчанию, это означает широковещательную посылку. Это значение также доступно для модификации по адресу BROADCAST\_ID (BID). Всего

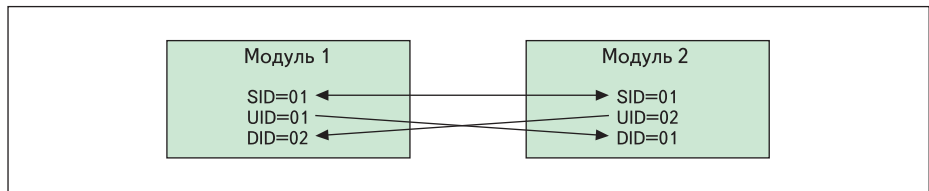


Рис. 2. Организация связи модулей в конфигурации «точка-точка»

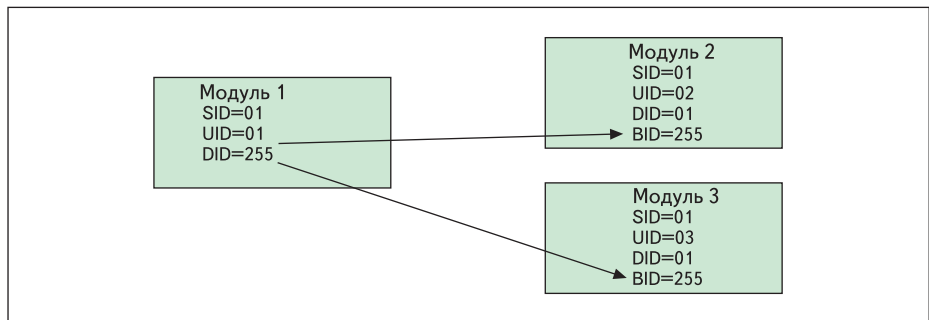


Рис. 3. Широковещательная посылка (broadcast) в конфигурации «звезда», до 256 модулей в кластере

пользователю доступно около 30 параметров, хранящихся в энергонезависимой памяти.

Алгоритм работы модуля очень прост. В состоянии IDLE происходит прослушивание эфира, при нахождении посылки с заданной преамбулой модуль переходит в режим приема (RX), и спустя 0,5 мс на выводе TXD появляется первый бит принятых данных. При передаче, обнаружив старт-бит на входе RXD, модуль переходит из состояния IDLE в режим передачи (TX). В эфир данные будут переданы при выполнении одного из условий: переполнение внутреннего буфера FIFO (параметр PACKET\_LENGTH), истечения определенного времени — тайм-аут (параметр PACKET\_TIMEOUT), или приеме

символа окончания посылки (параметр PACKET\_END\_CHARACTER).

Схема включения модуля приведена на рис. 4. Выводы RXD, TXD, CONFIG, RESET, ON/OFF могут подключаться к внешнему микроконтроллеру для реализации протоколов верхнего уровня и более сложных сценариев работы, например поиска устройств в сети или выключения модуля для снижения энергопотребления, ведь в состоянии IDLE потребляемый ток такой же, как и в режиме приема — примерно 20 мА. Для сопряжения с ПК необходимо использовать микросхемы преобразователей уровня RS-232 — TTL [3]. Возможно использование внешних устройств — усилителя мощности и малошумящего усилителя (МШУ)

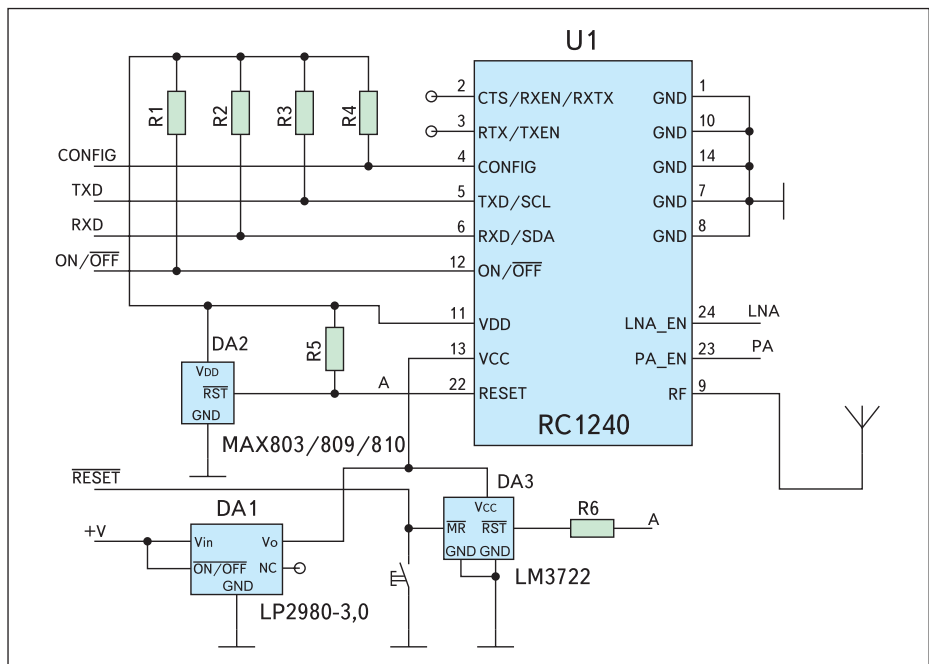


Рис. 4. Схема включения модуля на примере RC1240

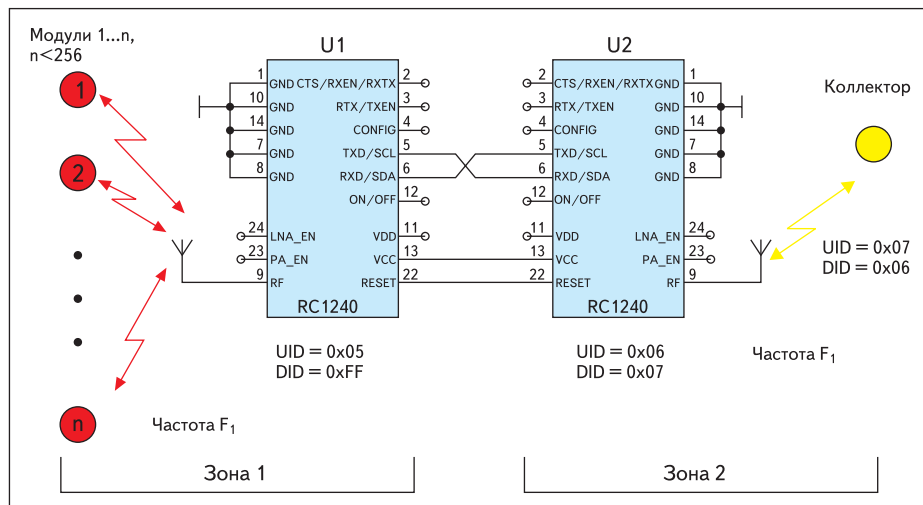


Рис. 5. Увеличение зоны покрытия путем связывания зоны 1 и 2 репитером (связка U1+U2)

в приемном тракте, которые управляются выводами PA\_EN и LNA\_EN соответственно.

Необходимо обратить внимание на несколько несложных требований к схеме включения модулей RADIOCRAFTS, выполнение которых позволит избежать ошибок:

- Необходимо использовать внешний супервизор напряжения питания, так как внутри модуля его нет. При плавном снижении питающего напряжения, например, при разряде батареи, может произойти защелкивание портов внутреннего микроконтроллера. Также желательно предусмотреть подачу сигнала сброса извне.
- Интерфейсные выводы RXD, TXD, CONFIG, ON/OFF имеют внутренний последовательный резистор 100 кОм и должны быть «подтянуты» к линии Vdd, а не к Vcc.
- Вывод Vdd — это 2,7 В выход внутреннего стабилизатора LDO. Этот вывод нельзя использовать для питания внешних устройств.
- Вывод RESET. На этот вывод нельзя подавать напряжение более 2,7 В, так как он не имеет внутренних последовательных резисторов. Используя супервизор с выходным каскадом push-pull, питать его необходимо от линии Vdd. В этом случае напряжение на выходе не превысит Vdd и выход супервизора можно соединять со входом RESET напрямую. Выход супервизоров с открытым коллектором необходимо подтянуть к линии Vdd, но не Vcc. Если же супервизор питается от линии Vcc, сигнал сброса необходимо подавать на модуль через последовательный резистор около 10 кОм. На рис. 4 представлены схемы включения различных супервизоров.

Как поступить, если в сети имеются один или несколько объектов, которые не вписываются в топологию «звезда» (то есть из-за ограниченной мощности передатчика они оказываются вне зоны радиовидимости)? Увеличивать мощность передатчика нельзя [1], по крайней мере, в России. Применять уст-

ройства, поддерживающие mesh-сети (о них ниже) не всегда целесообразно, так как ZigBee устройства, например, имеют существенно меньшую дальность связи и более высокую цену, а это резко увеличивает стоимость беспроводной сети. Есть красивое решение — шлюз на двух модулях с протоколом RC232, соединенных, как показано на рис. 5.

Его суть — разделение зон, обслуживаемых каждым модулем. Объекты в зоне 1 работают на одном частотном канале. Объекты во второй зоне работают на другом частотном канале. Передача сообщений между двумя зонами достигается проводным соединением модулей U1 и U2, как показано на рис. 5. Такое решение может рассматриваться как шлюз-повторитель. Чтобы идентифицировать пакеты, приходящие из других зон, необходимо добавлять в них информацию об источнике этих пакетов. Можно также разделять зоны обслуживания не только по частоте, но и по параметру SYSTEM\_ID (SID). Учитывая, что модули семейства RC12x0 имеют большую дальность связи — до 2 и даже до 4 км на открытой местности и несколько сотен метров в городе при работе на четвертьволновую антенну, при использовании таких шлюзов можно создавать зоны покрытия требуемой формы, не прибегая к превышению излучаемой мощности.

### Семейство RC13x0

Это семейство включает в себя устройства, содержащие смонтированные на одной плате размером 25×76 мм радиомодуль и внешний контроллер. Ориентированы они на применение в беспроводных сетях сбора данных. Имеются устройство-мастер и два типа ведомых устройств — пониженной (RC1380-S-LP) и повышенной (RC1380-S-HP) мощностей. Один мастер способен обслуживать до 100 ведомых устройств. Программное обеспечение, поддерживающее mesh-сеть, предоставлено сторонним разработчиком —

шведской компанией Tritech Technology ([www.tritech.se](http://www.tritech.se)).

### Семейство RC2x00

Это семейство представлено многоканальными модулями с протоколом RC232, работающими на частоте 2,45 ГГц, с частотной модуляцией (RC2000) и DSSS-манипуляцией (RC2100). Предназначены они для приложений с большим потоком данных. Используют 83 канала в диапазоне 2,45 ГГц с частотной модуляцией (RC2000) и DSSS (RC2100) для лучшей работы в условиях помех от устройств Bluetooth и WLAN, которых становится все больше. RC2000 позволяют передавать данные со скоростью до 1 Мбит/с, но при этом уменьшается дальность связи.

### Семейство RC220x и RC230x

Модули предназначены для построения сетей ZigBee на основе стандарта IEEE 802.15.4. Схожие по функциональности, так называемые ZigBee-ready модули являются аппаратной платформой для построения сетей ZigBee. Модули состоят из микроконтроллера ATmega (Atmel) и трансивера CC2420/CC2430/CC2431. Поставляются незапрограммированными (без firmware) и рассчитаны на создание собственного или инсталлируемого приобретенного ПО, поддерживающего сеть. RC2200/RC2300 являются так называемыми полнофункциональными устройствами (Full Function Devices — FFD), на их базе создаются координаторы сети; RC2204/RC2304 используются как узлы сети (nodes) — маршрутизаторы; на базе RC2202/RC2302 создаются оконечные устройства (называемые еще устройствами с ограниченной функциональностью — Reduced Function Device, RFD). Как известно, стандарт IEEE 802.15.4 определяет физическую среду (уровень PHY в терминах общепринятой семиуровневой модели OSI) и уровень доступа к среде (MAC — Medium Access Control). Часть уровня MAC аппаратно поддерживается трансивером CC2420 (генерация и детектирование преамбулы, обнаружение свободного частотного канала, вычисление CRC, измерение уровня принятого сигнала). IEEE 802.15.4 позволяет строить сети типа «звезда», полнофункциональная же сеть с топологией «многоячейковая сеть» (mesh network), «кластерное дерево» (cluster tree) возможна только с полным стеком протоколов ZigBee, который поставляется многими компаниями, например Figure 8 Wireless, Ember, Airbee. Последняя является партнером RADIOCRAFTS и предоставляет ПО для их ZigBee-модулей. Ожидается, что следующая версия стандарта IEEE, называемая IEEE 802.15.4b, будет поддерживать сети с произвольной топологией и маршрутизацией. Отличительной особенностью модулей семейства RC2302 является аппаратно реализованная в трансивере CC2431 возможность

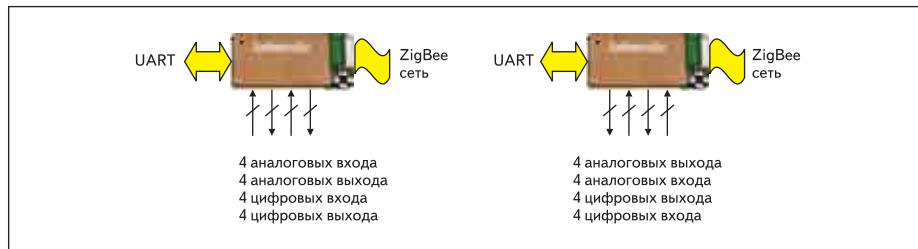


Рис. 6. ZigBee-сеть на модулях RC2200-SPPIO

определения условных координат в ZigBee-сети при наличии в ней от 3 до 8 узлов с привязкой. Позиционирование происходит на двух уровнях: на уровне трансивера аппаратно, без затрат вычислительных ресурсов контроллера, а также на уровне координатора сети. Трансивер измеряет уровни сигнала от узлов с привязкой, вычисляет собственные условные координаты и передает их в координатор, который, пользуясь известным положением узлов с привязкой, переводит их в физические декартовы координаты X, Y. Такое решение снижает нагрузку на сеть, сокращая трафик служебных сообщений, и в итоге повышает скорость передачи данных. Кроме того, позиционирование является довольно интересной опцией. Так, например, имея зону 64 на 64 м и от 3 до 8 узлов, координаты которых заданы с точностью не хуже 0,5 м, можно определить координаты RC2302 с точностью не хуже 3 м.

Модуль RC2200-SPPIO выделяется из линейки ZigBee-модулей наличием полного стека протоколов ZigBee и является полностью законченным устройством, не требующим каких-либо затрат на разработку ПО для работы в сети. В нем реализован ZigBee-профиль последовательного порта и входов/выходов общего назначения (Serial Port Profile with I/O mapping — SPPIO). Такие модули являются оптимальным решением для случаев, когда требуется в кратчайшие сроки решить задачу построения сети беспроводной передачи.

Модуль предоставляет пользователю до 16 входов и выходов, в том числе до восьми аналоговых. Каждый модуль может быть

skonфигурирован как координатор, узел-маршрутизатор, либо оконечное устройство.

Управление работой осуществляется через интерфейс UART с помощью AT-команд. Во многих случаях достаточно сконфигурировать модуль AT-командами и установить его в целевое устройство с минимальным количеством дополнительных внешних компонентов (цепи формирования входных и выходных сигналов — делители напряжения, преобразование сигналов от токовой петли 4–20 мА и др.). Такой вариант применения показан на рис. 6.

Аналоговые и бинарные входы и выходы у модулей, обменивающихся информацией, должны быть настроены комплементарно — аналоговый вход одного модуля должен соответствовать аналоговому выходу модуля-визави (так называемый binding). В более сложных случаях может понадобиться внешний микроконтроллер для приема и передачи данных через UART, поскольку SPPIO-модуль не позволяет встраивать в него пользовательское программное обеспечение.

В рамках альянса ZigBee существует только один общепризнанный глобальный профиль устройств — профиль HCL (Home Control Lightning), позволяющий в общем случае управлять удаленной нагрузкой: включать, выключать, управлять мощностью. Профиль SPPIO является сейчас частным профилем, поэтому модули RC2200xx-SPPIO могут работать с такими же модулями SPPIO и не могут работать в произвольной сети ZigBee. Подобные частные профили разрабатывают и другие компании, но их модули не будут совместимы с RC2200-SPPIO.

Для обеспечения связи беспроводной сети, состоящей из модулей SPPIO с другими устройствами и сетями, координатор сети SPPIO должен работать как шлюз (gateway), а значит — иметь внешний микроконтроллер, либо быть подключенным к ПК через свой UART.

В настоящее время существуют три пути создания беспроводной ZigBee-сети передачи данных:

1. Используя готовую аппаратную платформу без firmware, разработать собственный стек протоколов на всех уровнях; применительно к продукции RADIOCRAFTS — это приобретение модулей RC22x0, RC23x0.
2. Используя готовую аппаратную платформу, приобрести ПО от третьего производителя, интегрировать уровень приложения (Application Layer), реализующий задачу управления устройством со стеком протоколов, и запрограммировать модуль: RC22x0 (RC23x0) + AVR JTAGICE от Atmel или средства программирования CC2430.
3. Приобрести готовый модуль RC2200-SPPIO со стеком протоколов, поддерживающий профиль SPPIO. Наиболее быстрый способ выйти на рынок со своим решением. Возможно, в случае сложной задачи, придется реализовать часть уровня приложения на внешнем контроллере.

У всех перечисленных способов есть достоинства и недостатки, выбор зависит от предполагаемого объема выпуска, возможности разработки собственного ПО, требования совместимости и других.

### Литература

1. Постановление Правительства РФ № 539 от 12 октября 2004 г. «О порядке регистрации радиоэлектронных средств и высокочастотных устройств».
2. RC232 user manual. [w www.radiocrafts.com](http://www.radiocrafts.com)
3. RC1xx0\_DB\_Schematic\_3\_0.pdf. [w www.radiocrafts.com](http://www.radiocrafts.com).
4. [w www.zigbee.org](http://www.zigbee.org)
5. IEEE Standard, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs).