

Построение беспроводного канала на базе компонентов Texas Instruments

Беспроводные системы прочно вошли в нашу жизнь. В быту это различные мультимедийные системы, управляющие устройства, беспроводные интерфейсы, разнообразные системы мониторинга. В промышленности — системы сбора данных, автоматизированные и автоматические системы управления (от систем освещения до автоматизации зданий и их комплексов). На транспорте — отслеживание грузов, мониторинг параметров движения и т. д. Кроме того, сфера применения беспроводных устройств и систем на их основе постоянно растет как качественно (добавляются новые области), так и количественно (ширится число устройств, использующих радиоканал, увеличивается плотность узлов и сетей). Это вынуждает производителей беспроводных микросхем и разработчиков систем и программного обеспечения постоянно искать новые решения проблем взаимодействия узлов и систем, совместимости сетей.

Александр КАЛАЧЕВ
ti@compel.ru

Пространство задач

Являясь одним из лидеров на рынке беспроводных систем, особенно в части так называемых низкопотребляющих беспроводных устройств (Low Power RF, LPRF) компания Texas Instruments (TI) предлагает актуальные решения возникающих задач как в области аппаратного обеспечения, так и программного, во многих случаях предугадывая или предупреждая возникновение ряда проблем. На рис. 1 изображены сравнительные области применения различных беспроводных технологий, стандартов и спецификаций и примерный территориальный охват сервисов.

Выделены и отмечены те стандарты, для которых TI может предоставить аппаратное или программное решение. Как видно, охвачены практически все области.

Фактически каждая прикладная задача в области беспроводных систем представляется как отдельный проект, со своими этапами развития и жизненным циклом. Типичный цикл разработки для беспроводных систем следующий.

1) Определение требований:

- количество узлов сети;
- анализ и выбор необходимой топологии сети;
- среднее расстояние между узлами;
- диапазон требуемых скоростей передачи данных;
- энергопотребление узлов и источники их питания (стационарное питание, автономные устройства);

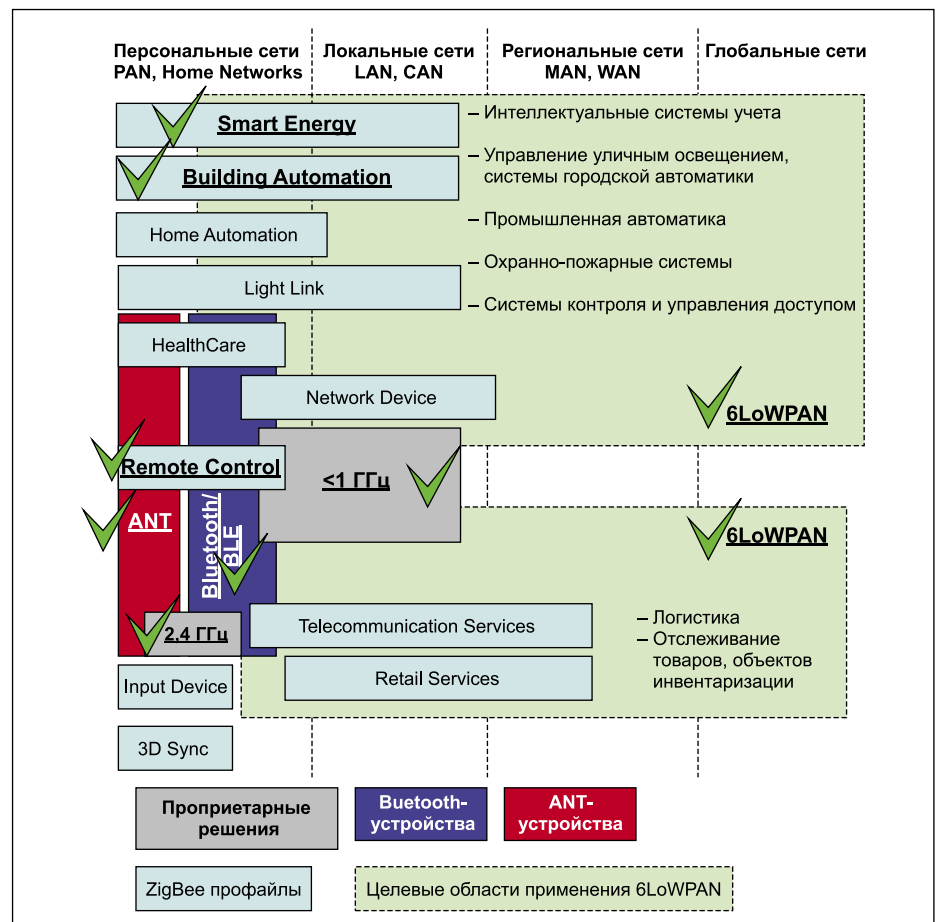


Рис. 1. Сравнение областей применения стандартов низкопотребляющих беспроводных сетей

- типичное время работы узлов в автономном режиме.
- 2) Выбор технологий реализации:
 - адаптация типовых решений или разработка «с нуля»;
 - выбор или разработка стека протоколов;
 - приведение в соответствие с правовыми, техническими и медицинскими нормами;
 - выбор между использованием модулей и микросборок и самостоятельной разработкой узлов на основе наборов микросхем — оценка временных и денежных затрат.
- 3) Проектирование:
 - выбор линейки продуктов для построения решения;
 - выбор антенн;
 - разработка печатной платы;
 - выбор средств разработки программного обеспечения сетевого приложения;
 - поддержка разработки — симуляция, отладочные платы, эскизный проект.
- 4) Тестирование приложения:
 - сертификация;
 - проверка совместной работы с другими беспроводными системами или обеспечение совместимости с ними;
 - тестирование работы приложения.
- 5) Производство:
 - планирование жизненного цикла продукта и его сопровождение;
 - система контроля качества.

При этом беспроводной канал передачи данных между узлами сети представим в традиционном виде: источник/приемник данных, приемопередатчик (в ряде случаев только приемник или только передатчик), антенный усилитель (может отсутствовать или быть частью приемопередатчика), антенна и сама среда передачи.

Оценка расстояния между узлами беспроводной сети

Окружение, в котором предстоит работать устройствам беспроводной сети, может быть весьма сложным и динамичным: препятствия в виде объектов технического и естественного происхождения, стены, перекрытия, подвижные объекты (люди, машины).

Одним из факторов, тесно связанных, а в некоторых задачах и влияющих на топологию сети и выбор беспроводной технологии, является предельное расстояние, на которое можно разнести узлы в сети при сохранении устойчивой связи и требуемой скорости обмена данными (хотя бы на минимальных значениях, устраивающих приложение).

На рис. 2 приведены типовые расстояния между отдельными узлами для распространенных технологий беспроводных сетей.

Расстояние между узлами можно оценить, исходя из сведений о выходной мощности передатчика, чувствительности приемника и характеристик антенн с учетом эмпирических сведений [1, 2].

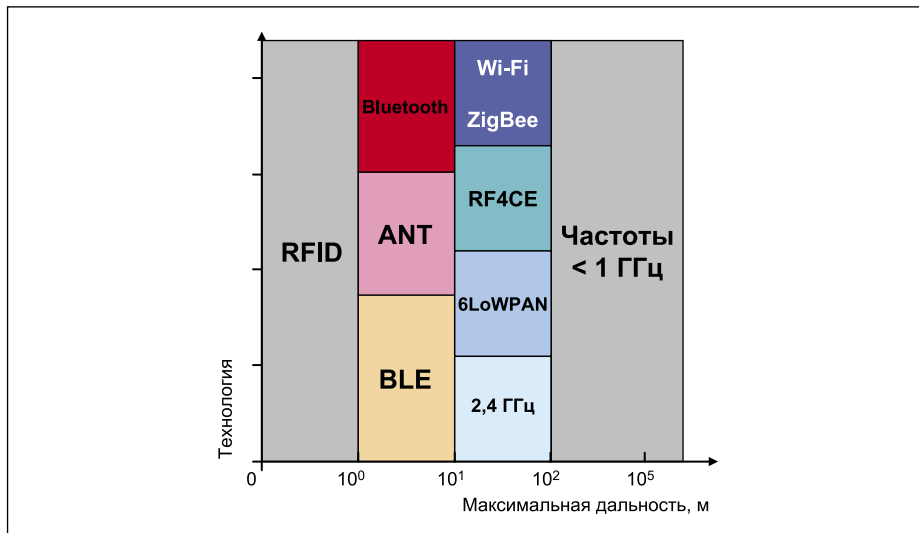


Рис. 2. Дальность связи между узлами, обеспечиваемая различными беспроводными технологиями

Для теоретических оценок используется формула Фриза для свободного пространства:

$$P_r = P_t + G_t + G_r + 20 \log(\lambda / 4\pi) - 20 \log d \quad (1)$$

или

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2}, \quad d = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t G_t G_r}{P_r}} \quad (2)$$

где P_t — мощность передатчика; P_r — чувствительность приемника; G_p, G_r — коэффициенты усиления передающей или приемной антенн соответственно; d — расстояние между узлами; λ — длина волны.

Формула (1) носит еще название энергетического бюджета канала связи (или просто «бюджет канала»).

В реальной ситуации рассчитанная дальность передачи будет несколько ниже из-за различных эффектов распространения сигнала (рассеяние, дисперсия, многолучевое распространение и др.). Поскольку учесть все или хотя бы часть эффектов практически нереально, пользуются эмпирическими правилами (правила приближенного счета), позволяющими сделать необходимые оценки.

Антенны

Наиболее важными факторами для узлов сети являются характеристики антенны: коэффициент усиления, диаграмма направленности, чувствительность к предметам в ближней зоне и др. Все характеристики антенн приводятся относительно изотропной — теоретической — модели, излучающей одинаково во всех направлениях. В маломощных беспроводных системах чаще всего используются дипольные или штыревые антенны [3].

По типу подключения выделяют две разновидности антенн (рис. 3):

- Антенны с одной точкой подключения:
 - обычно имеют сопротивление 50 Ом;
 - подключаются через согласующий фильтр (часто называемый баллонным фильтром);
 - легко анализируются при помощи сетевых анализаторов;
 - легко можно достичь высокой производительности.
- Дифференциальные антенны:
 - напрямую подключаются к дифференциальным выходам микросхем;
 - позволяют уменьшить число внешних компонент;

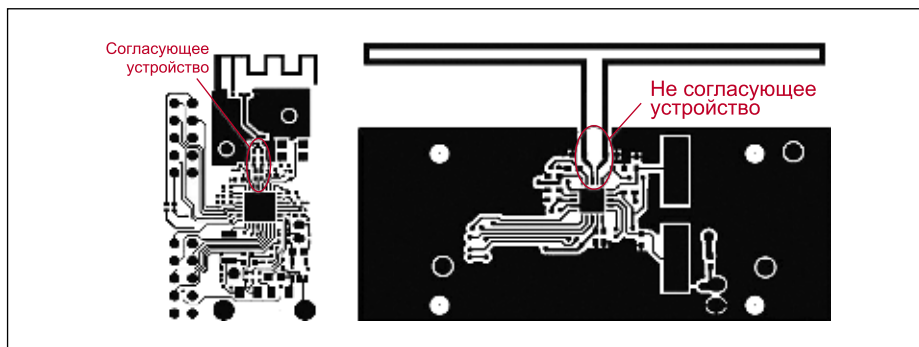


Рис. 3. Способы подключения антенн к беспроводным модулям

- для достижения нужных показателей в некоторых случаях необходима симуляция работы;
- трудно измеримый импеданс;
- возможно достижение производительности, сравнимой с антеннами с одной точкой подключения.

По способу физической реализации:

- Печатные антенны:
 - не повышают стоимость решения;
 - требуется больше пространства печатной платы;
 - имеют значительные размеры на низких частотах;
 - имеют широкий диапазон;
 - для расчетов их параметров необходимо специализированное программное обеспечение.
- Штыревые антенны:
 - стоимость от \$1;
 - наилучшее совпадение реальных характеристик с теоретическими;
 - меньшее влияние размера антенны на размеры конечного устройства.
- Чип-антенны:
 - менее дорогие (дешевле \$1);
 - меньший диапазон.

TI предлагает несколько решений для реализации печатных антенн с различными размерами, РСВ-файлами и рекомендациями по применению [7–9]. В качестве средств разработчика предлагается набор антенн CC-Antenna-DK, содержащий 13 разнотипных антенн (диапазон 136–2480 МГц).

Антенны диапазона 2,4 ГГц

Краткие сведения о печатных антеннах, предлагаемых TI для диапазона 2,4 ГГц, представлены в таблицах 1–3.

Таблица 1. Ненаправленные антенны с одной точкой подключения




Тип	Инвертированная F-антенна	Меандровая инвертированная F-антенна	Меандровый монополь
Внешний вид			
Эффективность	80% EB 94% SA	68% EB	76% EB 87% SA
Ширина полосы пропускания, МГц	280	101	400
Размеры, мм	26×8	15×6	39×25

Таблица 2. Дифференциальные антенны




Тип	Петлевой диполь для CC25xx	Петлевой диполь для CC24xx
Внешний вид		
Эффективность	80% EB	80% EB
Ширина полосы пропускания, МГц	100	80
Размеры, мм	26×8	15×6


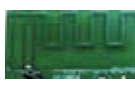

Таблица 3. Направленные антенны

Тип	Антенна Удо-Йаги
Внешний вид	
Эффективность	72% SA
Ширина полосы пропускания, МГц	497
Размеры, мм	150×100

Антенны диапазона 868/915/955 МГц

Краткие сведения о печатных антеннах, предлагаемых TI для диапазона 868/915/955 МГц, представлены в таблице 4. Кроме того, для этого диапазона применяются спиральные и чип-антенны. Оба данных типа обладают своими преимуществами. Так, спиральные антенны достаточно просты в изготовлении, а чип-антенны имеют весьма компактные размеры.

Таблица 4. Печатные антенны диапазона 868/915/955 МГц

Тип	Меандровый монополь	Меандровая инвертированная F-антенна	Нагруженная штыревая антенна
Внешний вид			
Эффективность	64% EB 91% SA	80% EB	64% EB
Ширина полосы пропускания, МГц	46	40	56
Размеры, мм	39×25	43×20	48×8

Для более длинноволновых диапазонов (315 МГц) применяются в основном спиральные антенны, но существуют и чип-решения.

Рекомендованный TI путь выбора антенны состоит из нескольких шагов (рис. 4): обзор возможных решений на основе краткого справочника и более полной технической информации; изучение характеристик антенн (диаграмма направленности, влияние окружения); полевые испытания; изучение технических чертежей, шаблонов антенн, технологии их реализации, особенностей размещения на печатной плате, рекомендаций по конфигурации печатной платы.

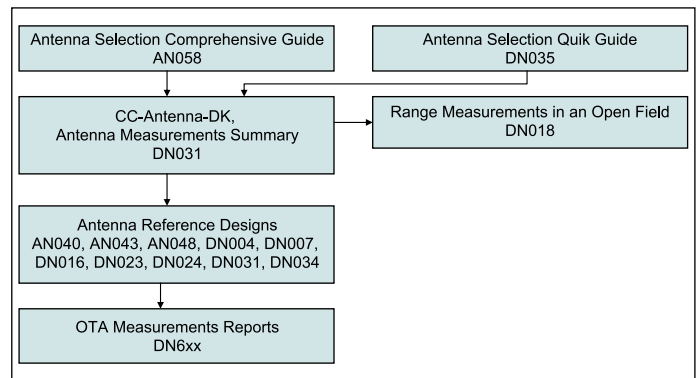


Рис. 4. Этапы выбора антенны для проекта

Предупреждение проблем

При создании печатной платы для беспроводного узла принято следовать определенным рекомендациям, позволяющим создать хорошее решение без проведения большой вычислительной работы по моделированию поведения платы в условиях высокочастотных сигналов.

Необходимо стремиться к снижению индуктивности переходов и межслойных соединений. Обычно это сводится к увеличению размеров переходных отверстий или созданию большого количества параллельных рядом лежащих переходов.

Размеры земли верхнего слоя должны быть как можно больше, это же касается и нижнего слоя. Количество возвратных линий токов для цифровых линий и для линий радиосигналов должно быть одинаковым, чтобы снизить влияние импульсных токов цифровой части схемы на аналоговую радиочасть. Предпочтительнее более компактные линии с радиосигналами и более компактное их расположение, но при сохранении достаточной степени электромагнитной изоляции между ними. Длины линий схемы, по возможности, должны быть менее 1/4 длины волны, и геометрия линий не должна содержать прямых углов и острых изгибов.

При самостоятельной разработке узлов рекомендуется следовать типовой конфигурации печатной платы (приводимой в специализированных руководствах или в документации на микросхемы), особенно в радиочасти — антенна, развязывающие конденсаторы, печатная антенна, обвязка частотных генераторов. Следует отметить, что для всех своих продуктов компания TI предоставляет типовые рекомендованные топологии разводки печатных плат, вплоть до предоставления исходных файлов разводки. Это существенно упрощает и ускоряет процесс разработки собственного решения и освоения нового продукта.

Варианты построения беспроводных систем

Для обмена данными во всем мире предоставляются нелицензируемые радиочастотные диапазоны. В РФ на основании решения Государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ) № 08-24-01-001 от 28.04.2008 и № 07-2 0-03-001 от 07.05.2007 для этих целей выделены частотные диапазоны 433,075–434,75 МГц и 868,7–869,2 МГц, 915 МГц, 2,45 и 5,8 ГГц. Эти частоты могут использоваться без оформления специального разрешения ГКРЧ и совершенно бесплатно при условии соблюдения требований по ширине полосы, излучаемой мощности (до 10 мВт в районе частоты 434 МГц и до 25 мВт в районе частоты 868 МГц, до 100 мВт в диапазоне 2,4 ГГц) и назначению радиопередающего изделия.

Помимо законодательных критериев, при выборе частотного диапазона следует учитывать и технические факторы.

Для диапазона 2,4–2,4835 ГГц доступно больше частотных каналов, более высокие скорости передачи, возможен непрерывный режим работы (для радиочасти), более компактные антенны. С другой стороны, устойчивая работа реализуется на более коротких расстояниях, возрастает влияние различных помех (интерференционные, многолучевое распространение, препятствия).

Для частот менее 1 ГГц разрешенные частотные диапазоны в различных странах могут отличаться, поэтому не всегда возможно использовать одну и ту же элементную базу. Также не везде разрешена непрерывная радиоактивность устройства.

Преимущества касаются лучшей дальности устойчивой работы по сравнению с частотами диапазона 2,4 ГГц при одинаковой выходной мощности передатчика, уменьшения влияния препятствий на прохождение сигнала (особенно актуально для работы внутри зданий и офисных помещений).

TI предлагает и развивает три подхода к построению беспроводных узлов, приемлемых как для субгигагерцевого диапазона, так и для диапазона 2,4 ГГц [4,5].

Подход первый: приемопередатчик совместно с управляющим микроконтроллером.

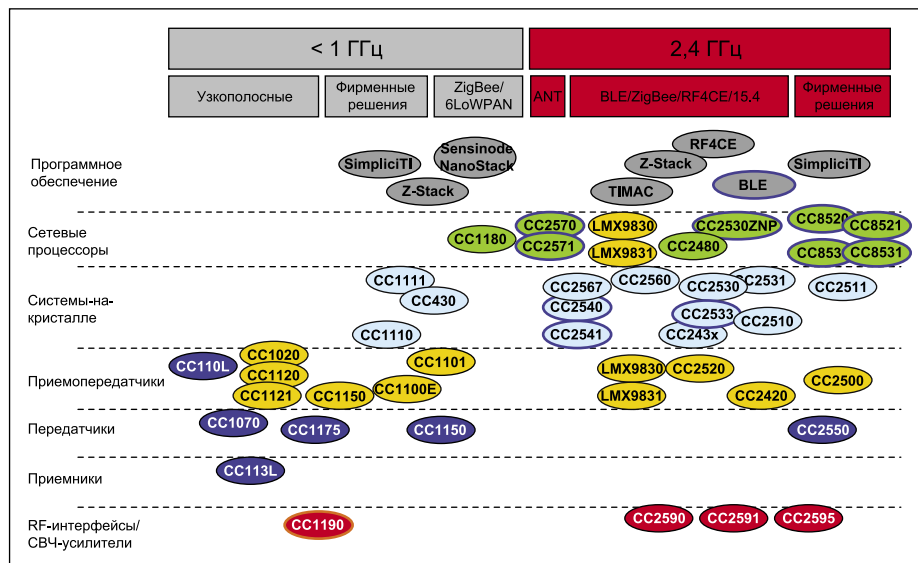


Рис. 5. Спектр аппаратно-программных решений TI

В этом случае микроконтроллер отвечает за работу сетевого стека и прикладных задач. Приемопередатчик подключается к контроллеру через последовательный интерфейс (как правило, используется SPI или UART). Возможно использование практически любого приемопередатчика из предлагаемого TI спектра.

Второй вариант — применение «систем-на-кристалле», содержащих в одном корпусе и приемопередатчик, и микроконтроллер. Процессорное ядро контроллера при этом также выполняет и стек протоколов, и приложения. Данное решение является более компактным, во многих случаях выгоднее энергетически (меньшая общая потребляемая мощность по сравнению с вариантом приемопередатчик+микроконтроллер).

И в том, и в другом случае при отладке приложения необходимо отслеживать работу и стека протоколов, и приложения. Кроме того, некорректная работа приложения может привести к прекращению выполнения процедур стека протоколов и, как следствие, выходу узла из сети, что, в свою очередь, может повредить выполнению распределенного приложения в целом. Аналогично ошибки в работе стека протоколов могут привести к зависанию микроконтроллера или прекращению выполнения приложения. В таком случае узел перестает выполнять свои функции.

Третий метод — разнесение выполнения прикладной задачи и стека протоколов на разные микроконтроллеры. Микроконтроллер, выполняющий стек протоколов, часто называется сетевым процессором или процессором протоколов. Данные решения предлагаются как для общепринятых стандартов (например, сети ZigBee, 6LoWPAN или Bluetooth), так и для собственных проприетарных протоколов.

TI предлагает достаточно широкий выбор компонентов для построения радиотракта

субгигагерцевого диапазона и диапазона 2,4 ГГц: усилители, приемники, передатчики, приемопередатчики и «системы-на-кристалле» (рис. 5).

Таким образом, беспроводные решения TI позволяют реализовать любую стратегию развития и реализации продукта, выбранную разработчиком.

Универсальные решения для различных диапазонов: проприетарные и стандартные

Протокол SimpliciiTI

SimpliciTI — несложный протокол с открытым исходным кодом для небольших беспроводных сетей с низкой интенсивностью обмена данными диапазонов до 1 ГГц, 2,4 ГГц и диапазонов стандарта IEEE 802.15.4 (рис. 6). Разработан для сетей преимущественно с автономным батарейным питанием на основе «систем-на-кристалле» (например, CC2530, CC2430) или на основе связки низкопотребляющих контроллеров серии MSP430 и любого из приемопередатчиков, предлагаемых TI (MSP430 + CC1XXX/CC25XX).

В качестве средств отладки или тестирования приложений предлагаются платы SmartRF с CC2430EM и CC2520EM, отладочные наборы MSP430FG4618/F2013 совместно с CC1100EM, CC1101EM или CC2500EM.

Ключевые свойства:

- является протоколом, разработанным TI для минимизации энергопотребления с поддержкой спящего режима узлов сети;
- низкие системные требования: <8 кбайт flash-памяти и менее 1 кбайт ОЗУ для работы, в зависимости от конфигурации;
- поддержка топологий «точка-точка», «звезда» (с расширителями радиуса действия до четырех промежуточных узлов);
- легок в применении с точки зрения программиста — небольшой набор API функций;

- большой выбор поддерживаемых платформ.
Типовые приложения:
- сигнализация и системы охраны (датчики проникновения, датчики света, СО-датчики, датчики разбития стекла);
- пожарная сигнализация — датчики дыма;
- системы учета (счетчики воды, газа, электричества);
- приложения RFID с активными метками.

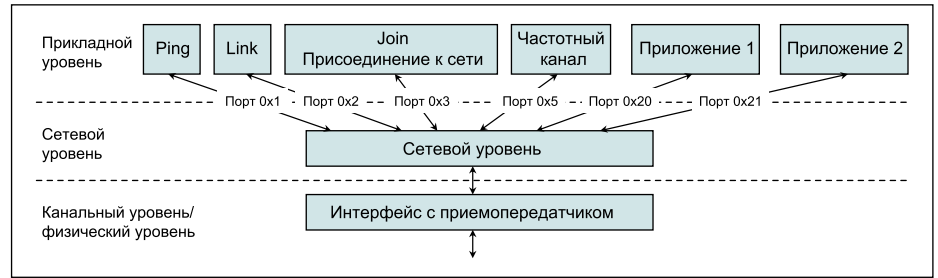


Рис. 6. Структура стека протоколов SimpliciTI

Программное обеспечение TI MAC

TI MAC является свободно распространяемым программным обеспечением для приемопередатчиков и «систем-на-кристалле», ориентированных на стандарт IEEE 802.15.4. Предоставляется в виде объектных кодов без авторских или патентных отчислений за его использование.

Сертифицирован как стандарт, поддерживающий IEEE 802.15.4, легок в применении. Поддерживает несколько аппаратных платформ:

- «системы-на-кристалле» CC2530 и CC2430;
- MSP430F5438+CC2520;
- MSP430F2618+CC2520.

Применение TI MAC оправдано в случаях:

- организации беспроводных сетей типа «точка–точка», «точка–многоточка» (например, связь нескольких сенсоров с центральным узлом);
- необходим стандартизованный протокол;
- используются узлы с батарейным питанием;
- нужна поддержка подтверждения приема или ретрансляция пакетов;
- используются низкие скорости передачи данных (порядка 100 кбит/с).

Протокол Remo TI

Для задач дистанционного управления устройствами Texas Instruments предлагает протокол RemoTI с поддержкой соответствующими беспроводными устройствами, отвечающий спецификации ZigBee RF4CE (рис. 7).

Протокол Remo TI основывается на стандарте IEEE 802.15.4, добавляя к нему уровень сетевого взаимодействия и набор базовых команд управления. Включает в себя:

- поддержку нескольких каналов;
- безопасные транзакции;
- режимы энергосбережения;
- простой механизм объединения устройств для совместной работы.

Стек протоколов Z-Stack

Для организации сложных сетей TI предлагает стек протоколов Z-Stack, один из линейки программных продуктов, ориентированных на стандарт IEEE 802.15.4.

Z-Stack совместим со стандартами ZigBee (ZigBee и ZigBee PRO) и позволяет реализовывать функционал, заложенный в данных стандартах на платформах TI: CC2530, MSP430+CC2520, Stellaris LM3S9B96+CC2520, CC2591. Более того, Z-Stack поддерживает профайлы ZigBee — Smart Energy и Home Automation.

Основные возможности:

- полная поддержка стандарта ZigBee PRO;
 - возможность обновления прошивки узлов сети по радиоканалу;
 - предоставляет набор API, уменьшающих время разработки приложения (дополнительно предоставляются примеры программ).
- Сеть, построенная на базе Z-Stack, обладает следующими свойствами:
- самоорганизация сети (топология Mesh);
 - низкая стоимость установки узлов;
 - низкая стоимость узлов сети;
 - поддерживаются большие сети (сотни узлов);
 - нацелена на приложения контроля и мониторинга систем и объектов;
 - используются стандартизованные протоколы.

Z-Stack тестировался и разрабатывался с применением компиляторов фирмы IAR (www.iar.com). При покупке отладочных комплектов TI предоставляется 30 дополнительных дней для ознакомления с продуктами IAR. Если пользователь уже имеет полную лицензию, он может свободно скачать новую или любую из предыдущих версий компилятора, используя свой аккаунт на www.iar.com. Для компиляции Z-Stack под различные

платформы необходимы соответствующие версии кросс-компиляторов:

- CC2530: IAR EW8051 7.60;
- CC2520+MSP: IAR EW MSP 5.10;
- CC2520+LM9B96: IAR EW ARM 5.50.5.

Благодаря партнерским отношениям TI с Ubilogix, можно в качестве еще одного инструмента разработчика, а также для тестирования работы сети применять анализатор протоколов для сетей IEEE 802.15.4 and ZigBee — Ubiqua Protocol Analyzer. Данный программный продукт имеет поддержку платы TI CC2531USB Dongle из отладочного комплекта CC2531EMK.

Ubiqua Protocol Analyzer позволяет анализировать трафик IEEE 802.15.4, ZigBee 2007, ZigBee 2007 PRO, ZigBee RF4CE, 6LoWPAN сетей и протоколов.

Стандарт 6LoWPAN

6LoWPAN — это открытый стандарт IETF (Internet Engineering Task Force) (RFC 4944), определяющий реализацию протокола IPv6 поверх маломощных недорогих беспроводных сетей.

Технология 6LoWPAN обеспечивает поддержку адресов IPv6 для всех узлов беспроводной сети. Поддерживает ячеистую топологию для организации масштабируемых сетей с поддержкой маршрутизации и самовосстановления в случае выхода каких-либо узлов из сети. 6LoWPAN может поддерживать несколько физических уровней (PHY), в частности, поддиапазона до 1 ГГц и диапазона 2,4 ГГц, работающая поверх протоколов стандарта IEEE 802.15.4.

Решения TI для 6LoWPAN основываются на собственных аппаратных и программном обеспечении фирмы-партнера Sensinode Ltd — одного из лидеров в области программных продуктов для 6LoWPAN. Компанией Sensinode разработан стек протоколов NanoStack lite 2.0 для организации сетей 6LoWPAN [6].

6LoWPAN (рис. 8) является более простым по структуре, чем стек ZigBee, и более прозрачным с точки зрения прикладного программного обеспечения. Следствием этого является меньший объем бинарного кода, (так, для стека Sensinode NanoStack составляет примерно 20 кбайт, что в среднем в четыре-шесть раз меньше размера стека ZigBee).

По сути NanoStack 2.0 lite является операционной системой, ориентированной на об-

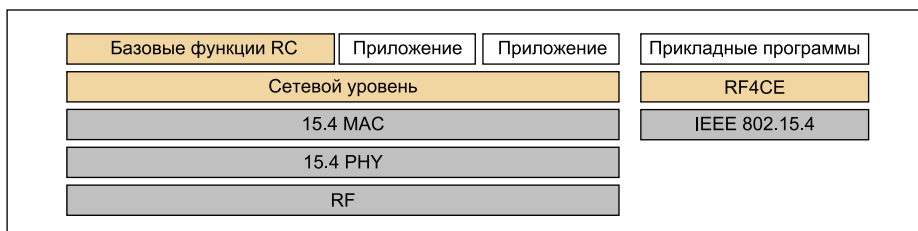


Рис. 7. Структура стека протоколов Remo TI



работку событий. Периферийные устройства, такие как таймеры, АЦП, интерфейсы ввода-вывода, обрабатываются в основной программе. Обработка прерываний осуществляется драйверами устройств.

В качестве аппаратных платформ для 6LoWPAN TI предлагаются «системы-на-кристалле» CC1110 и CC430, а также сетевой процессор CC1180.

Сетевой процессор CC1180 является «системой-на-кристалле» CC1110F32, поставленной с прошитым стеком протоколов NanoStack 2.0 Lite для сетей 6LoWPAN. CC1180 выполняет все критически важные и ресурсоемкие процессы, связанные с работой сетевых протоколов, экономя ресурсы внешнего микроконтроллера для решения прикладных задач. Взаимодействие с внешним контроллером (часто его называют прикладным контроллером или контроллером приложений) осуществляется по интерфейсу UART с протоколом обмена NAP. Например, возможно использование микроконтроллеров серии MSP430 или любых других. Сетевой процессор позволяет легко расширить функциональность создаваемой или существующей системы за счет подключения к 6LoWPAN сети.

Ключевые особенности:

- простая интеграция в сеть 6LoWPAN;
- распространенный UART-интерфейс;
- простой и функциональный протокол взаимодействия;
- обновление прошивки через радио (при условии, что у узла достаточно памяти для временного хранения образа);
- большой выбор возможных диапазонов частот — 315/433/868/915 МГц;

- выходная мощность радиосигнала —30...+10 дБм;
- скорости передачи данных — 50, 100, 150, 200 кбит/с;
- AES-шифрование в пределах подсети;
- диапазон напряжений питания 2–3,6 В;
- размеры корпуса QFN36 — 6×6 мм.

Приемопередатчики диапазона до 1 ГГц

Для субгигагерцевого диапазона TI предлагает достаточно широкий спектр продукции [2]:

- антенные усилители (серия CC1190);
- приемники (серия CC113L);
- передатчики (CC115L, CC1150, CC1050, CC1070);
- приемопередатчики (серии CC110L, CC1000, CC102x, CC1101, CC1100);
- «системы-на-кристалле»:
 - CC430 — на основе приемопередатчика CC1101 с аппаратной поддержкой шифрования AES-128 и 16-битным контроллером (ядро MSP430);
 - CC111x — с 8-битным контроллером (ядро 8051), поддержкой шифрования AES-128.

В основе беспроводных решений TI рассматриваемого диапазона лежит хорошо зарекомендовавшая себя архитектура многоканального приемопередатчика CC1101.

Пожалуй, семейство приемопередатчиков является одним из самых популярных при разработке беспроводных систем субгигагерцевого диапазона. Учитывая это, а также динамику развития рынка потребления данной продукции, компания уделяет большое внимание развитию семейства.

Приемопередатчики CC1101 сочетают в себе компактные размеры, низкое энергопотребление, низкопрофильный корпус. Благодаря уникальной схемотехнике, на базе приемопередатчиков данной серии можно

строить беспроводные приемопередатчики практически для всего частотного субгигагерцевого диапазона 300–960 МГц.

Линейки продуктов LPRF

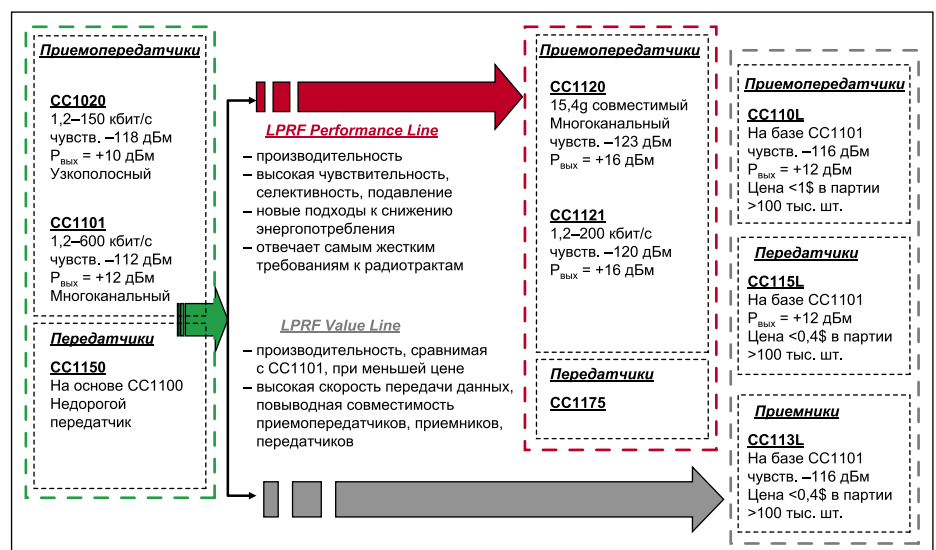
В 2011 г. в рамках развития и совершенствования архитектуры CC1101 Texas Instruments выпустила две линейки продуктов: LPRF Performance Line и LPRF Value Line [7–10].

Линейка LPRF Value Line представлена сериями недорогих устройств, рассчитанных на массовое применение. В нее вошли приемопередатчик CC110L и отдельные микросхемы приемников CC113L и передатчиков CC115L — бюджетные микросхемы (цена единицы в крупной партии менее \$1), совместимые с приемопередатчиками CC1101.

Целевая аудитория LPRF Performance Line — приложения с высокой производительностью, требующие широкого спектра аппаратных возможностей, а также для работы в условиях зашумленной или плотно занятой частотной полосы. В линейке Performance представлены узкополосные (6–50 кГц) многоканальные приемопередатчики CC1120/CC1121, высокопроизводительный передатчик CC1175 (рис. 9).

LPRF Value Line

CC110L (рис. 10) — приемопередатчик для частотных диапазонов 300–348/387–464/779–928 МГц, основанный на CC1101 с аналогичными характеристиками производительности радиотракта. Имеет аппаратную поддержку обработки пакетов (детектирование синхрослова, автоматический подсчет контрольной суммы), буферизации данных (FIFO буферы по 64 байта на прием и передачу), непрерывной передачи больших объемов данных. Наилучшие показатели чувствительности —116 дБм при скорости передачи данных 0,6 кбит/с. Скорость передачи данных варьируется в пределах 0,6–600 кбит/с.



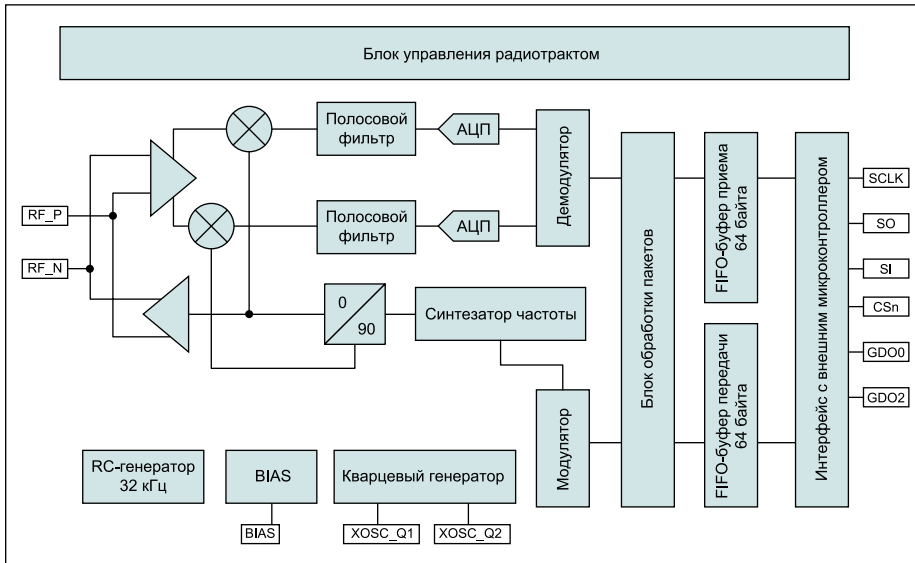


Рис. 10. Структура приемопередатчиков серии CC110L

Приемопередатчик поддерживает частотную (2-SK, 4-SK, GFSK) и амплитудную (OOK) модуляции сигнала. Время выхода из режима низкого энергопотребления (ток потребления ~200 нА) в режим приема или передачи порядка 240 мкс. Отсутствие режима пробуждения по наличию радиосигнала (Wake-on-Radio, WOR) и блока коррек-

ции ошибок (Forwarding Error Correction, FEC) несколько снижают функциональность устройства, но зато это положительно сказывается на его цене. Отсутствует также аналоговый датчик температуры.

CC110L пассивно и схемотехнически совместим с CC1101 и выпускается в таком же корпусе — QLP20 (4×4 мм).

Для случаев, когда поток данных только однонаправленный, идеально подойдут отдельные микросхемы приемников CC113L и передатчиков CC115L, полностью совместимые с CC110L и имеющие еще меньшую стоимость. От CC110L они отличаются только отсутствием приемных или передающих блоков.

LPRF Performance Line

В основу беспроводных приборов линейки LPRF Performance Line легла архитектура приемопередатчиков CC1101.

Усовершенствования, направленные на увеличение производительности и стабильности работы устройств коснулись радиотракта, схем и способов обработки сигналов, подходов к управлению отдельными узлами и приборов в целом (рис. 11).

По сравнению с CC1101, уменьшено время выхода из режима низкого энергопотребления в режим приема — 150 мкс. Также поддерживается автоматическое прослушивание канала перед началом передачи (Clear Channel Assessment, CCA), имеется программируемый индикатор наличия несущей. Уровень принятого сигнала может быть оценен с высокой степенью линейности в широком диапазоне.

Приятным дополнением к работе радиочасти устройств линейки Performance является режим совместимости с устройствами стан-

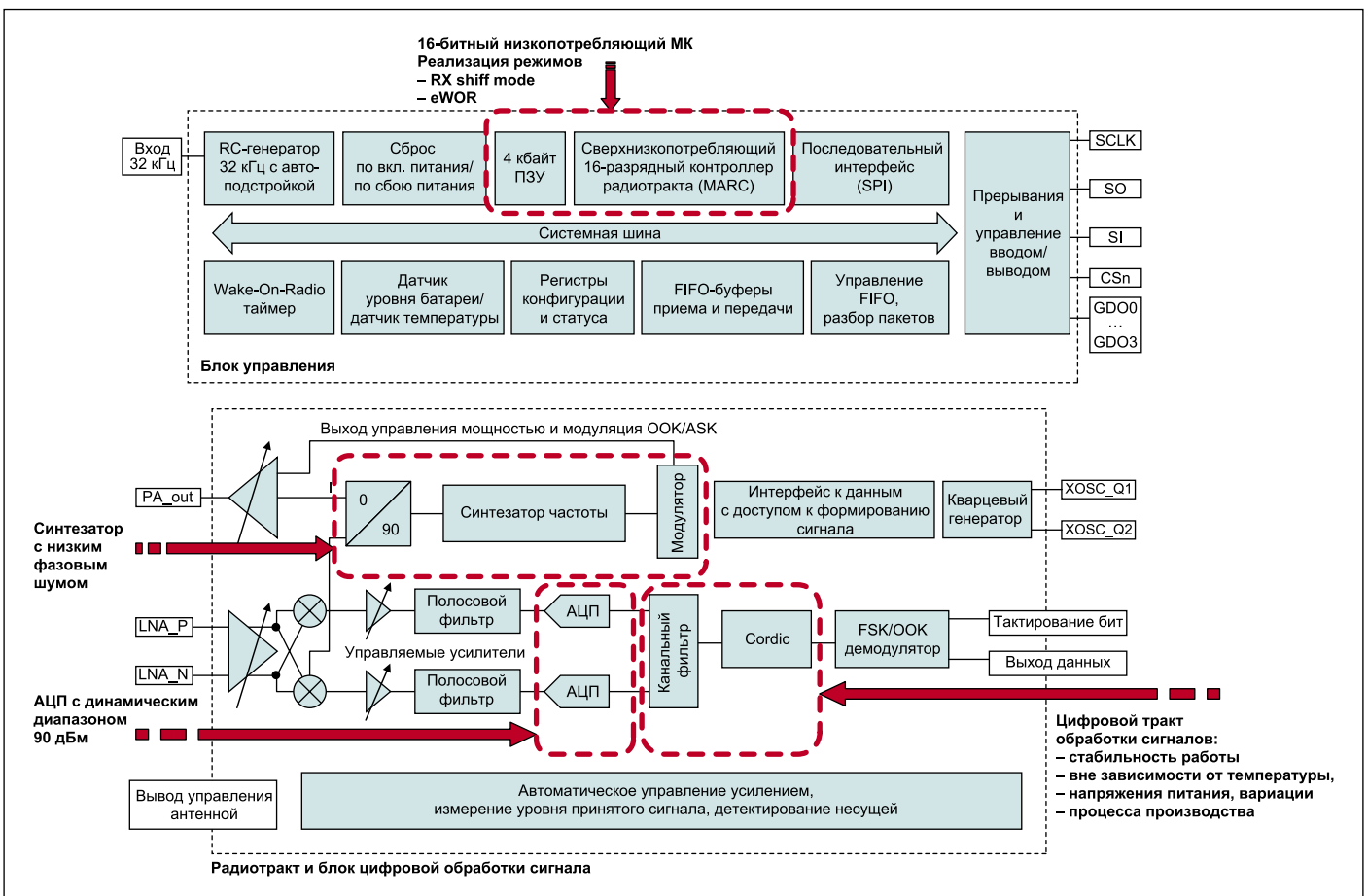


Рис. 11. Структурная схема приемопередатчиков CC112x

дарт 802.15g. Это позволяет без опаски использовать проприетарные протоколы без нарушения работоспособности существующих сетей (например, возможна совместная работа с сетями стандартов ZigBee или 6LoWPAN).

Применение в сигнальном тракте АЦП с динамическим диапазоном 90 дБ позволяет полностью перейти на последующую цифровую обработку сигнала, включая его фильтрацию. Цифровые фильтры, помимо лучших характеристик в полосе пропускания и подавления сигнала вне полосы, обеспечивают высокую стабильность параметров вне зависимости от напряжения питания, температуры и вариаций технологического процесса. Фильтрами обеспечивается высокий уровень подавления сигнала вне текущего частотного канала — более 80 дБм.

Режим RF Channel Shift Mode позволяет автоматически обнаруживать активность в радиоканале. В этом режиме приемник автоматически через короткие промежутки времени проверяет наличие передачи в канале, после чего отключается, и в следующем периоде времени ситуация повторяется. Период включения приемника установлен меньшим, чем длина преамбулы пакета.

Сравнительные характеристики приемопередатчиков серий CC1101 и продуктов линеек Value Line и Performance Line представлены в таблице 5.

Средства отладки

Для оценки возможностей приемопередатчиков серий CC110L предлагается отладочный набор CC110LDK-868-915, содержащий:

- две платы TRXEB;
- два модуля с приемопередатчиками CC110L, по одному оценочному модулю с передатчиками CC115L и приемниками CC113L;
- комплект соединительных кабелей и документацию (рис. 12).



Рис. 12. Отладочный набор CC110LDK-868-915

Оценочные модули представляют собой печатные платы с установленными беспроводными устройствами и спиральными антеннами и разъемами для подключения внешней антенны (рис. 13).

Плата TRXEB (рис. 14) содержит микроконтроллер MSP430F5438 MCU, светодиодные индикаторы, разъемы для подключения

Таблица 5. Сравнительные характеристики приборов линеек Value Line, Performance Line и серий CC1101

Параметр	CC1101	CC110L	CC1020	CC1121	CC1120	CC1175
Чувствительность, дБм	-116	-116	-118	-120	-123	-
Подавление соседнего канала (± 100 кГц), дБм	37	35	41	48	52	-
Максимальная выходная мощность, дБм	12	10-12	5-10	14-16	14-16	14-16
Частотные диапазоны, МГц	300-348 387-464 779-928 (470-510/950-960 для CC1100E)	300-348 387-464 779-928	402-480 804-960	164-192 410-480 820-960	164-192 410-480 820-960	164-192 410-480 820-960
Минимальная ширина канала, кГц	50	50	12,5	50	12,5	-
Максимальная ширина канала, кГц	800	800	200	250	250	-
Максимальная скорость передачи, кбит/с	600	600	153,6	200	200	200
Режимы модуляции	2-FSK, 4-FSK, GFSK, MSK, OOK, ASK	2-FSK, 4-FSK, GFSK, OOK	FSK, OOK, GFSK, 4-FSK	2-FSK, 4-FSK, 2-GFSK, 2-GFSK, MSK, OOK, ASK, FM	2-FSK, 4-FSK, 2-GFSK, 2-GFSK, MSK, OOK, ASK, FM	FSK, OOK, GFSK, 4-FSK, 4-GFSK
Режимы работы приемника	Обычный, WOR	Обычный	Обычный	Обычный, WOR, Sniff Mode	Обычный, WOR, Sniff Mode	-
Фазовый шум 10/100/1000 кГц, дБц/Гц	-90/-92/-107	-90/-92/-107	-90/-110/-114	-109/-111/-130	-109/-111/-130	-109/-111/-130



Рис. 13. Оценочные модули с CC110L

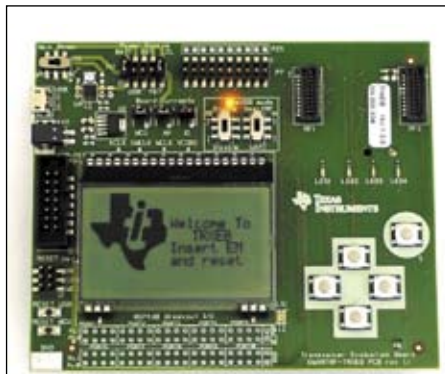


Рис. 14. Отладочная плата TRXEB

внешних устройств, оценочных модулей, набор кнопок, индикатор освещенности, трехосевой датчик ускорения, точечный жидкокристаллический экран (128×64 точки). В качестве примера в TRXEB предустановлен тест канала передачи данных на ошибки передачи (PER-test) и тест на дальность связи; исходные тесты демонстрационной программы также предоставляются. Подключение к персональному компьютеру осуществляется через USB-интерфейс.

На этой же плате базируется отладочный комплект (рис. 15) для представителя линейки Performance CC1120 — CC1120DK.

В состав CC1120DK входят:

- две платы TRXEB;
- два модуля с CC1120 в конфигурации на диапазон 868/915 МГц (для других диапазонов модули могут быть заказаны отдельно);



Рис. 15. Отладочный набор CC1120DK

- две штыревые антенны;
- набор соединительных кабелей;
- батареи питания.

В качестве примера предварительно прошит тест канала на количество ошибок (PER-test).

Решения для диапазона 2,4 ГГц

Стек протоколов BLEStack

Стек протоколов Bluetooth Low Energy (BLE) предоставляет все необходимое программное обеспечение для разработки соответствующих приложений на базе «системы на кристалле» CC2540. BLEStack включает в себя объектный код самого стека протоколов BLE, примеры программных проектов и приложений с исходными текстами, приложение для ПК VTools для тестирования BLE-приложений, техническую документацию, включающую пособие разработчика и справочник по API-функциям BLE.

Основные возможности BLEStack:

- отвечает требованиям спецификации Bluetooth v.4.0;
- режим хост-устройства, контроллера;
- поддержка специализированных профилей устройств;

- поддержка режимов мастера и подчиненного устройства, поддержка совмещенного режима;
 - небольшой объем кода;
 - высокая энергоэффективность.
- Объектный код оптимизирован для CC2540, не требуется каких-либо авторских или патентных отчислений.
- Области применения:
- аксессуары для мобильных телефонов;
 - приборы для занятий спортом, отдыха, бытовые медицинские приборы;
 - игровые консоли, интерфейсные устройства, устройства удаленного управления;
 - возможно использование в системах безопасности.

Технология ANT

Технология ANT предлагается как простое недорогое энергоэффективное решение для организации простых сетей типа «точка–точка», «звезда». Будучи пригодной для многих приложений, ANT на сегодняшний день является признанной технологией для сбора, автоматической передачи и отслеживания данных датчиков при занятиях спортом, оздоровительных процедурах, при мониторинге состояния здоровья в домашних условиях.

Основные области применения:

- спорт/фитнес;
- бытовая медицинская аппаратура;
- аксессуары для мобильных телефонов;
- беспроводные сенсорные сети.

TI предлагает решения для ANT для широкого спектра систем (от интеллектуальных сенсоров до смартфонов), разработанные в сотрудничестве с компанией Dynastream Innovations Inc, одной из компаний, работающих с технологией ANT на рынке (www.thisisant.com). В качестве аппаратной платформы используется связка микроконтроллера семейства MSP430 и сетевого процессора CC257x.

В сотрудничестве с Dynastream Innovations компания предлагает полный спектр ANT-решений «под ключ» с поддержкой программного и аппаратного обеспечения. Интересным решением является микросхема CC2567, поддерживающая и Bluetooth, и ANT. Модули CC2567-PAN1327/17 позволяют подключать к мобильным телефонам или компьютерам устройства, поддерживающие Bluetooth, ANT+, и организовывать взаимодействие между ними. Таким образом уменьшаются время на разработку проекта и затраты на производство, экономится пространство печатных плат, упрощается процесс сертификации продуктов.

WiLink — первое комплексное однокристалльное решение для работы с беспроводными сетями, GPS, Bluetooth, Bluetooth low energy, ANT и FM (www.ti.com/wilink).

Целевое назначение WiLink — продукты широкого потребления: смартфоны, нетбуки, портативные медиаплееры. Существующие устройства с WiLink и BlueLink могут также

работать с ANT-устройствами после обновления программного обеспечения.

Технология PurePath Wireless Audio

PurePath Wireless Audio — уникальная технология, разработанная Texas Instruments для беспроводной передачи потокового аудио на небольшие расстояния в диапазоне 2,4 ГГц, вылившаяся в серию однокристалльных устройств CC85xx. Два или более устройств CC85xx составляют сеть. Особое внимание было уделено вопросам поддержания непрерывной связи между устройствами в условиях различного окружения и совместимости с другими беспроводными устройствами, работающими в диапазоне 2,4 ГГц.

Большинство приложений с использованием PurePath Wireless Audio могут быть реализованы без разработки программного обеспечения. CC85xx просто подключается к источнику внешнего аудиосигнала (аудиокодек, интерфейс S/PDIF, усилитель класса D) с парой кнопок или светодиодов в качестве интерфейса пользователя. В более сложных случаях возможно подключение внешнего хост-процессора или ДСП для прямого управления аудиопотоком или для контроля сетевых операций.

Плюсы данной технологии:

- сниженная стоимость разработки;
- удвоенное время работы по сравнению с обычными решениями (порядка 22 ч с батарей 465 мА·ч);
- хорошо подходит для высококачественных аудиоустройств.

Для настройки конфигурации CC85xx и обновления прошивки используется приложение для ПК PurePath Wireless Configurator. Все устройства семейства CC85xx напрямую могут взаимодействовать с расширителем диапазона CC2590 для более широкого охвата территории и повышения надежности связи.

Встроенный протокол передачи аудио использует несколько технологий для обеспечения нужного качества передачи данных и совместимости с другими устройствами:

- адаптивную схему переключения частот;
- коррекцию ошибок передачи;
- буферизацию и ретрансляцию данных;
- маскировку ошибок;
- эффективные алгоритмы сжатия;
- скорость передачи данных 5 Мбит/с;
- выходную мощность до +4 дБм;
- чувствительность –83 дБм;
- несжатый канал CD-качества (44,1/48 кГц, 16/24 бит);
- задержку аудиосигнала менее 20 мс.

Некоторые интерфейсные функции CC85xx, такие как управление питанием, выбор аудиоканала, управление уровнем, могут быть отображены на линии ввода-вывода.

Приложения:

- беспроводные наушники, гарнитуры;
- беспроводные микрофоны;
- замена кабелю;
- беспроводной домашний кинотеатр.

Средства разработки

Традиционно средства разработки, предлагаемые TI, включают набор аппаратных и программных средств — отладочные модули, отладочные платы, аппаратные средства разработки [5].

Отладочные модули — небольшие платы, содержащие только беспроводную микросхему, необходимую обвязку и разъемы для подключения питания, периферийных узлов, антенны.

Отладочные платы имеют разъемы для подключения отладочных модулей и являются платформой для тестирования работы беспроводных элементов и отладки программного обеспечения.

Аппаратные средства разработки позволяют подключать отладочные платы к персональному компьютеру для тестирования работы как аппаратной, так и программной частей сетевых приложений.

Для тестирования и отладки сетевого приложения предлагается несколько видов наборов аппаратных средств, далеко не полный список которых приведен в таблице 6. Наборы разработчика содержат все необходимое аппаратное обеспечение для начала разработки. Как правило, они состоят из двух отладочных плат, двух отладочных модулей, антенн и кабелей. Мини-наборы разработчика содержат необходимое оборудование для разработки небольших демонстрационных приложений.

Наборы отладочных модулей содержат два беспроводных модуля, антенны и кабели и могут быть использованы для расширения возможностей других отладочных комплектов.

USB-устройства — небольшие отладочные платы, имеющие возможность подключения к USB-портам ПК чипа или печатной антенны. Чаще всего строятся на базе «систем-на-кристалле».

Отладочные наборы ZigBee — ZigBee Development Kit (ZDK) имеют возможности отладочных наборов, но содержат дополнительные беспроводные узлы для обеспечения тестирования возможностей ячеистых сетей ZigBee. В данных наборах узлы имеют предустановленное тестовое приложение.

Кроме стеков протоколов, TI предоставляет ряд программных инструментов разработчика, предназначенных для конфигурирования устройств, анализа их работоспособности, а также наборы программных библиотек для встроенных микроконтроллеров.

SmartRFStudio — приложение для ПК, позволяющее пользователю выставить необходимые настройки для выбранного устройства: частоту передачи данных, канал, скорость передачи, выходную мощность и ряд других. При подключении отладочных модулей возможна удаленная установка параметров. Кроме этого, приложение предоставляет простые инструменты тестирования

Таблица 6. Аппаратные средства разработки

Устройство	Описание	Отладочные модули	Отладочные комплекты
CC1020 CC1070	Узкополосный приемопередатчик	CC1020-CC1070DK433 CC1020-CC1070DK868	CC1020EMK433 CC1020EMK868 CC1070EMK433 CC1070EMK868
CC1101	Приемопередатчик <1 ГГц	CC1101DK433 CC1101DK868	CC1101EMK433 CC1101EMK868
CC110L	Приемопередатчик <1 ГГц	CC110LDK-868-915	
CC1120	Приемопередатчик <1 ГГц	CC1120DK	
CC1110 CC1111	МК 8051 + приемопередатчик <1 ГГц МК 8051 + приемопередатчик <1 ГГц + USB	CC1110-CC1111DK CC1110DK-MINI-868	CC1110EMK433 CC1110EMK868 CC1111EMK868
CC430 CC1180	«Система-на-кристалле» Сетевой процессор	EM430F5137RF900 CC1180DB	CC-6LoWPAN-DK-868
CC2500	Приемопередатчик диапазона 2,4 ГГц	CC2500-CC2550DK EZ430-RF2500	CC2500EMK
CC2510 CC2511	МК 8051 + 2,4-ГГц приемопередатчик	CC2510-CC2511DK CC2510DK-MINI	CC2510EMK CC2511EMK
CC2520	IEEE 802.15.4 совместимый приемопередатчик	CC2520DK	CC2520EMK
CC2530 CC2531	МК 8051 + IEEE 802.15.4 совместимый приемопередатчик МК 8051 + IEEE 802.15.4 совместимый приемопередатчик + USB	CC2530DK CC2530ZDK RemoTI-CC2530DK	CC2530EMK CC2531EMK
CC1190	Малошумящий СВЧ-усилитель		CC1190EMK-915
CC2591	Малошумящий СВЧ-усилитель		CC2591EMK CC2430-CC2591EMK CC2520-CC2591EMK CC2530-CC2591EMK
CC2590	Малошумящий СВЧ-усилитель		CC2590EMK CC2430-CC2590EMK
CC2560-PAN1325	Bluetooth v2.1 + EDR приемопередатчик		PAN1315
CC2567-PAN1327	Bluetooth v2.1 + EDR и ANT двухрежимный приемопередатчик	CC2567-PAN1327ANT-BTkit	
CC85xx	Технология PurePath Wireless Audio	CC85xxDK CC85xxDK-MINI	

беспроводного канала: проверку возможности приема-передачи данных, пакетов, измерение качества канала связи (количество ошибок связи). Предоставляется свободно для всей линейки продуктов TI.

SmartRFPacket Sniffer — анализатор пакетов для стандартных и фирменных сетевых протоколов (SimpliciTI, TI MAC, ZigBee, Remo TI). Работает совместно с любыми беспроводными модулями и отладочными платами TI, позволяет прослушивать сеть на выбранной частоте и частотном канале. Имеет графический интерфейс для облегчения разбора и анализа пакетов.

SmartRF Flash Programmer используется для обновления прошивки отладочных модулей, программирования flash-памяти «систем-на-кристалле».

Примеры библиотек, содержащие основные функции, необходимые для осуществления сетевого взаимодействия между узлами сети:

- USB Libraries — библиотеки, реализующие USB-интерфейс для «систем-на-кристалле» и модулей (CC2511, CC1111, CC2531);

- MSP430 Code Library — библиотеки программ и функций для МК MSP430 для «систем-на-кристалле» серий CC1100/2500. PurePath Wireless Configurator — приложение для ПК с графическим интерфейсом для настройки параметров CC85xx.

Заключение

Texas Instruments предлагает широкий спектр продуктов для самых различных областей применения:

- охранно-пожарные системы;
- дистанционное управление;
- беспроводные аудиосистемы;
- бытовые медицинские приборы;
- периферийные устройства (HID);
- системы домашней автоматизации, управления освещением;
- системы сбора данных и др.

Компания предлагает несколько линеек продуктов с низким энергопотреблением для беспроводных систем со всем необходимым программным и аппаратным обеспечением.

Фактически это избавляет разработчиков от необходимости применения специализированных протоколов для снижения энергопотребления, так как эта часть проблемы решается на уровне компонентов. Особенно хорошо это заметно по линейке приемопередатчиков Performance Line. Для многих случаев возможна оптимизация стоимости решений — например, использование на узлах сети только приемников или только передатчиков.

Доступны как проприетарные решения, так и решения, основанные на международных стандартах, потенциально расширяющие возможный рынок потребления конечных устройств и гарантирующие совместимость и совместную работу систем, — в частности, поддержка стандарта 802.15.4 и протокола на его основе ZigBee и 6LoWPAN.

Одна из ключевых особенностей политики компании — всесторонняя поддержка разработчика: документация, свободные средства настройки и тестирования, форумы разработчиков, в том числе и русскоязычные.

Литература

1. Tor-Inge Kvaakrud. Range Measurements in an Open Field Environment. <http://focus.ti.com/lit/an/swra169a/swra169a.pdf>
2. TI Low Power RF. Designer's Guide to LPRF. <http://focus.ti.com/lit/sg/slya020a/slya020a.pdf>
3. Wallace R. Antenna Selection Guide. <http://focus.ti.com/lit/an/swra161b/swra161b.pdf>
4. Wireless Connectivity Guide. <http://focus.ti.com/lit/sg/slab056/slab056.pdf>
5. Low Power Wireless RF Solutions, ZigBee, RFID, RF-IF — TI.com. www.ti.com/lpw
6. CC-6LoWPAN. Texas Instruments Embedded Processors Wiki. <http://processors.wiki.ti.com/index.php/CC-6LoWPAN>
7. Value Line Transceiver. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc110l.pdf>
8. CC113L Value Line Receiver. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc113l.pdf>
9. Value Line Transmitter. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc115l.pdf>
10. High Performance RF Transceiver for Narrowband Systems. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc1120.pdf>