

# КМОП-СИСТЕМА-НА-ЧИПЕ НА ДИАПАЗОН ЧАСТОТ 300-1000 МГц ПОЛНОСТЬЮ ФУНКЦИОНАЛЬНО ЗАКОНЧЕННЫЙ ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИК

С.Добрусенко

Изделия для беспроводных систем связи должны быть дешевыми и потреблять малую мощность для того, чтобы обеспечивать достаточно длительный срок службы батареи. Немаловажное значение имеют и их габариты. Традиционно микросхемы для таких применений выполняются по БиКМОП- или GaAs-технологии. Однако как показал опыт фирмы Chipcon (Норвегия), современная КМОП-технология с субмикронными топологическими нормами вполне пригодна для изготовления маломощных ВЧ-микросхем. К тому же она позволяет объединять на одном чипе аналоговые ВЧ-блоки со сложными цифровыми устройствами и тем самым получать реальные системы-на-чипе. Эти выводы подтверждает КМОП-микросхема CC1010 фирмы Chipcon, первая, по утверждению ее специалистов, истинная ВЧ-система-на-чипе на диапазон частот 300–1000 МГц, объединяющая ВЧ-приемопередатчик и микроконтроллерное ядро, сопоставимое с микроконтроллером 8051. А поскольку эта технология дешевле в сравнении с другими, ее можно рассматривать как ключевую при разработке маломощных дешевых микросхем для беспроводных систем, таких как беспроводные персональные сети, домашние системы автоматизации, дистанционное измерительное оборудование, промышленные средства управления/мониторинга, интеллектуальные игрушки и игры.

## ОБЩИЕ ДАННЫЕ

Как показывает анализ современного рынка ВЧ-микросхем для систем беспроводной связи, КМОП-устройства представлены на нем достаточно слабо в сравнении с приборами, выполненными по БиКМОП-, биполярной или GaAs-технологии. Компоненты систем, работающих на более низких частотах, также большей частью реализованы по БиКМОП-технологии. Но с ростом популярности систем стандарта Bluetooth, а также распространением дешевых, так называемых систем автоматизации дома потребность в КМОП ВЧ-микросхемах на диапазон частот 2,4 ГГц будет расти. Уже сегодня на рынке можно найти ВЧ-приемопередатчики, работающие в стан-

Chipcon AS ([www.chipcon.com](http://www.chipcon.com)) – молодая, стремительно развивающаяся норвежская компания, разработчик и изготовитель высококачественных и высокопроизводительных стандартных ВЧ-микросхем для разнообразных беспроводных устройств, выполняемых по КМОП- и БиКМОП-технологиям. Компания была основана в марте 1996 года учеными и исследователями Норвежского технического прикладного научно-исследовательского института (SINTEF) с целью освоения производства коммерческих ВЧ- и аналогово-цифровых полупроводниковых приборов на базе исследований, проводимых в институте. Компания начала работать как центр по проектированию специализированных ASIC приборов с акцентом на аналого-цифровые и аналоговые приборы. В 1997 году было организовано подразделение проектирования цифровых устройств, в задачи которого входила поддержка возрастающего спроса на микросхемы систем-на-кристалле (SoC). В 1998 году Chipcon изменила внутрифирменную стратегию, став полноценной "производящей" полупроводниковой компанией, берущей на себя ответственность за выпускаемые изделия и их соответствие проектным спецификациям, за проведение полных производственных испытаний и за самостоятельную отгрузку конечным заказчикам. Стратегия Chipcon направлена на обеспечение изготовителей беспроводных систем связи на короткие расстояния новыми поколениями микросхем с тем, чтобы ее заказчики могли встретить во всеоружии требования рынка по проектированию интеллектуальных изделий и своевременно выпустить новые изделия на рынок.

Компания также включила в программу отгрузок специализированные ASSP-микросхемы для систем беспроводной связи на короткие расстояния. В сентябре 1999 года фирма получила заказ на поставку ВЧ-приемопередатчика CC400, созданного на основе базовой технологии SmartRF 01. 2000 год стал одной из вех в развитии фирмы и началом ее быстрого роста. Доход компании увеличился на 135%, численность занятых – на 50%. Появилась усовершенствованная базовая технология SmartRF 02, ставшая основой для производства высокопроизводительных КМОП-изделий. А уже в конце 2001 года было выпущено первое изделие на основе этой технологии – ВЧ-приемопередатчик CC1000. В 2002-м запущены в производство и другие уникальные изделия, основанные на этой технологии.

Сегодня компания, выполняющая проектирование и производство различных ASIC приборов для систем с большим объемом производства, в результате активной деятельности по привлечению партнеров и заключению дистрибьюторских соглашений имеет представительства в 21 стране.



дарте Bluetooth, фирм Cambridge Silicon Radio, BroadCom, National Semiconductor, Zeevo, Oki и др. Наблюдается и тенденция к применению КМОП-микросхем в GSM-системах. Здесь интерес представляет микросхема приемопередатчика типа Aero Si4200 фирмы Silicon Laboratories с высоким уровнем интеграции и малыми габаритами.

Особый интерес представляет микросхема CC1010 фирмы Chipcon – первый промышленный однокристалльный КМОП-приемопередатчик с встроенным микроконтроллером на диапазон частот 300–1000 МГц. Предназначена микросхема, прежде всего, для систем с ЧМн, работающих в диапазонах 315, 433, 868 и 915 МГц, отведенных для промышленных/научных/медицинских систем и радиостанций ближней связи (ISM/SRD), но она легко может быть запрограммирована для работы и на любой частоте в диапазоне 300–1000 МГц. Помимо микромощных беспроводных ВЧ-приемопередатчиков, работающих в указанных диапазонах частот, CC1010 находит применение в домашних системах автоматизации и безопасности, системах автоматического считывания данных измерительного оборудования, дистанционно управляемых замках, телеметрических системах и контроллерах электронных игр и игрушек.

Чип CC1010 выполнен на базе ранее выпущенного фирмой и нашедшего широкое применение полудуплексного ВЧ-приемопередатчика CC1000 и микроконтроллерного ядра, сопоставимого с популярным 8-бит микроконтроллером 8051 фирмы Intel. Наиболее ценно в CC1010 – наличие блока программного управления потребляемой мощностью как в активном, так и пассивном режимах, встроенной флэш-памяти, развитой периферии и всех элементов, необходимых для построения полностью законченной ВЧ-системы на одном чипе (рис. 1). Следует отметить следующие ключевые характеристики микросхемы CC1010:

Характеристики	Минимальное значение	Максимальное значение
Рабочее напряжение, В	2,7	3,6
Рабочая температура, °С	-40	+85
Частота задающего генератора, МГц	3	24
<b>Характеристики ВЧ-приемопередатчика</b>		
Диапазон рабочих частот, МГц	300	1000
Скорость передачи данных, Кбит/с	0,8	76,8
Выходная мощность (программируемая) в режиме передачи, дБм	-20	10/4
Разнос каналов при ЧМн, кГц	0	65
	Среднее значение	
<b>Чувствительность приемника</b>		
при скорости передачи 1,2 Кбит/с, дБм	-107/-106	
<b>Потребляемый ток, мА</b>		
приемника	9,1/11,9	
передатчика при выходной мощности		
-20 дБм	5,3/8,6	
-5 дБм	8,9/13,8	
0 дБм	10,4/17,0	
4 дБм	24,8/23,5	
10 дБм	26,6	
<b>Характеристики микроконтроллера</b>		
Ток в активном режиме		
(тактовая частота 14,7456 МГц), мА	14,8	
Ток в экономном режиме		
(тактовая частота 32 кГц), мкА	29	
Ток в нерабочем режиме, мкА		
		0,2

Изготовлена микросхема CC1010 по запатентованной фирмой Chipcon базовой КМОП-технологии SmartRF 02 с 0,35-мкм топологическими нормами. Поставляется в плоском 64-выводном корпусе TQFP по цене 3,6 долл. при закупке партии в 1 млн. шт.

Рассмотрим основные блоки микросхемы.

## МИКРОКОНТРОЛЛЕРНОЕ ЯДРО

Как уже указывалось, 24-МГц микроконтроллерное ядро чипа CC1010 выполнено на основе Гарвардской архитектуры 8-бит микроконтроллера 8051. Основное отличие ядра CC1010 от оригинального микроконтроллера – большее, в среднем в 2,5 раза, быстрое действие благодаря тому, что время выполнения команды занимает четыре цикла тактового сигнала. Предусмотрена возможность работы микроконтроллера в экономном и нерабочем режимах, а также схемная поддержка кодирования/декодирования в стандарте DES. Тактовый сигнал микроконтроллера может подаваться от внешнего источника или встроенного основного кристаллического генератора на диапазон частот 3–24 МГц. Но поскольку частота этого генератора используется как опорная для установления "стандартной" скорости передачи данных, ее желательно устанавливать в диапазоне 3–4, 6–8 или 9–24 МГц. Кристаллический генератор с регулируемой амплитудой рассчитан на параллельный режим работы. Его время включения и потребляемый ток малы, уровень возбуждения минимален – 4 мкВт на частоте 3 МГц. Генератор нечувствителен к изменениям эффективного последовательного сопротивления входящих в его схему конденсаторов.

Микроконтроллерное ядро содержит четыре банка регистров по восемь 8-бит регистров в каждом. Помимо основных регистров сюда входят сумматор накапливающего типа, указатель стека и двойные регистры указателя данных. Память данных (СОЗУ) разделена на внутреннюю (емкостью 128 байт) и "внешнюю" (емкостью 2 Кбайт) память. Термин "внешняя" условный, поскольку все СОЗУ расположено на чипе CC1010, а различие между внешней и внутренней оперативной памятью заключается в том, что доступ к внешней СОЗУ имеет лишь несколько команд. Поэтому часто используемые переменные, а также стек должны храниться во внутреннем СОЗУ. Кроме регистров, присущих микроконтроллеру 8051, в области внутренней памяти расположены 119 регистров специальных функций (Special Function Registers – SFR), управляющих периферийными устройствами чипа (рис. 2).

Память программ представляет собой 32-Кбайт флэш со страничной организацией – 256 страниц объемом 128 байт каждая. Данные записываются или стираются через последовательный SPI-интерфейс или постранично под управлением микроконтроллерного ядра. При управляемой микроконтроллерным ядром постраничной записи данных во флэш-память, позволяющей программировать ее в системе, ядро должно быть установлено в нерабочий режим, поскольку при операции записи доступа к памяти программ нет. Ресурс флэш-памяти в среднем составляет  $2 \cdot 10^4$  циклов записи/стирания. Для защиты программного обеспечения от несанкционированного копирования, а также для предотвращения случайного внесения нежелательных изменений в отдельные области флэш-памяти, например загрузчиком операционной системы, предусмотрена возможность установки через SPI-интерфейс соответствующих разрядов защиты, блокирующих дальнейшую запись/считывание памяти. При этом загрузчик может продолжать корректировать другие, незащищенные области флэш-памяти. Для разблокировки необходимо полностью очистить память.

При установке в исходное состояние модуль флэш-памяти всегда активен и потребляет ток, равный ~2,5 мА (при номинальном режиме эксплуатации). Потребляемую мощность можно снизить, установив экономный режим потребления между операциями выполнения команд в активном режиме, а также в нерабочем или экономном режиме. В результате можно уменьшить ток, потребляемый в активном режиме, на 1,5 мА, а в нерабочем режиме – на 2,5 мА.

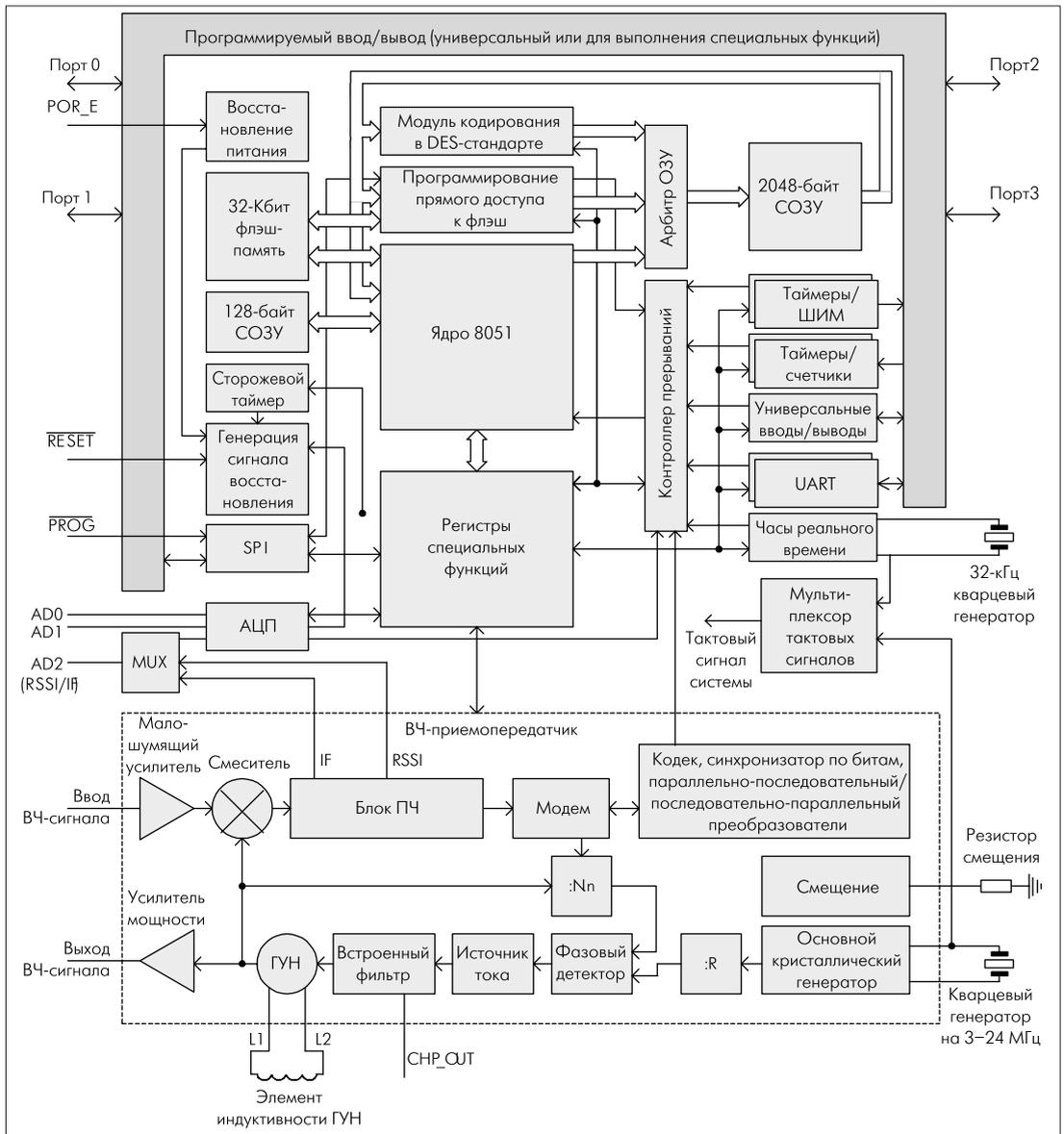
Система команд микросхемы поддерживает прямой и косвенный режимы, а также режим регистровой адресации памяти. Все команды прямой адресации могут использоваться и для получения доступа к SFR, хотя предусмотрен и доступ с помощью косвенной адресации. Возможна индексная адресация памяти программ. По системе команд ядро совместимо с контроллером 8051, но имеет дополнительную команду TRAP, позволяющую выполнять внутрисхемную отладку.

**ПЕРИФЕРИЙНЫЕ**

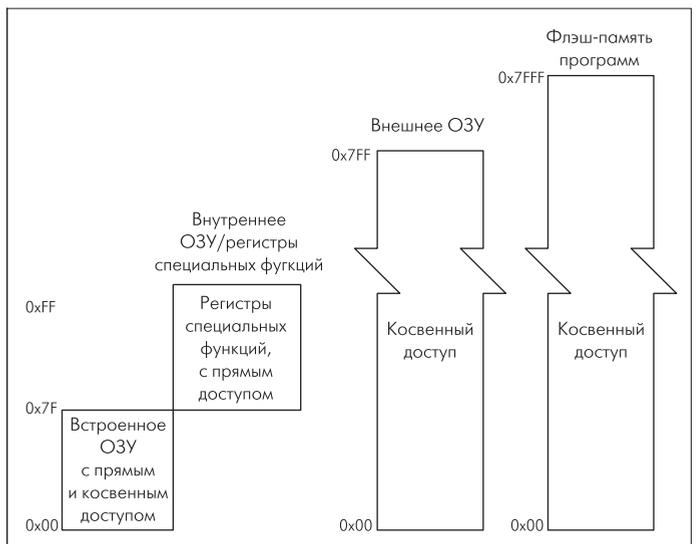
**УСТРОЙСТВА**

Как уже отмечалось, микросхема CC1010 содержит развитую, управляемую микроконтроллерным ядром периферию. Это:

- трехканальный 10-бит АЦП с максимальной скоростью дискретизации 24 Квыборок/с и однополярным выходным напряжением с минимальными и максимальными значениями 0 и 1,25 В соответственно. Тактовая частота АЦП составляет 32 кГц при работе с кристаллическим генератором часов реального времени или 250 кГц при работе через делитель с основным кристаллическим генератором микросхемы. Каждая выборка занимает 11 циклов тактового сигнала АЦП;
- программируемый 8-бит сторожевой таймер (рис.3). Время возврата в исходное состояние в зависимости от коэффициента деления тактовой частоты составляет 175–1400 и 21,8–175 мс при исходном значении тактовой частоты 3 и 24 МГц, соответственно;
- часы реального времени, генерирующие команды прерывания с интервалом 1–127 с. Часы работают со встроенным кристаллическим генератором на частоту 32 кГц;
- четыре таймера, два из которых представляют собой стандартные таймеры/счетчики микроконтроллера 8051, каждый с 16-бит регистром. Таймер может быть индивидуально запрограммирован для работы в одном из четырех режимов: 13- или 16-бит таймера/счетчика, 8-бит таймера/счетчика с автоперезагрузкой и двух 8-бит таймеров/счетчиков. Два других таймера имеют ШИМ-выходы. Они могут индивидуально устанавливаться в режим таймера или ШИМ;

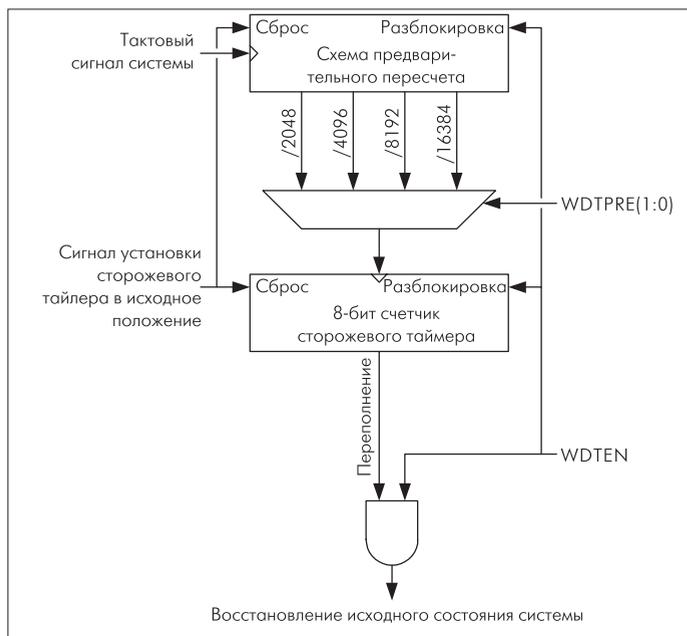


**Рис.1. Блок-схема трансивера CC1010**



**Рис.2. Схема распределения памяти**

- два программируемых последовательных UART-порта, оба из которых обеспечивают последовательную передачу данных, причем один из них в основном предназначен для связи модуля



**Рис.3. Блок-схема сторожевого таймера**

с отладочным ПК с тем, чтобы не вызывать конфликты при использовании главного последовательного SPI-интерфейса для других прикладных задач. Возможны четыре режима последовательной передачи данных: полудуплексный, стандартный асинхронный дуплексный с использованием 10 бит, и два асинхронных дуплексных с 11 битами и различными скоростями передачи;

- главный SPI-интерфейс для связи с внешними периферийными устройствами, например с последовательным интерфейсом ЭСРПЗУ. Скорость программируемой передачи данных достигает 3 МГц;
- схемный модуль кодирования/декодирования в DES-стандарте. Для кодирования блока данных объемом 1–256 байт за одну операцию используется 56-бит ключ шифрования, что обеспечивает средний уровень защиты данных. Если нужен более высокий уровень защиты, алгоритм шифрования может выполняться последовательно три раза с применением трех различных 56-бит ключей. Ключи хранятся во "внешнем" СОЗУ. Для обработки слов, длина которых не кратна 8 байтам, рекомендуется работать в режиме шифрованной обратной связи, обеспечивающем достаточно высокий уровень защиты;
- четыре порта ввода/вывода общего назначения с 26 реконфигурируемыми выводами. В отличие от портов стандартного микроконтроллера 8051 в портах микросхемы CC1010 не предусмотрена возможность повышения/понижения напряжения на выходе, в регистрах направления каждого порта хранятся специальные биты направления и на всех выходах устанавливается сигнал КМОП-уровня;
- схемный блок генератора случайных чисел, используемых как ключи шифрования, как начальное число программного генератора псевдослучайных чисел и т.п. Поток случайных чисел генерируется за счет усиления шума ВЧ-приемного канала. При отпирании генератора на более чем 1 с в относительно белом спектре случайных чисел появляются тональные сигналы.

## ВЧ-ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИК

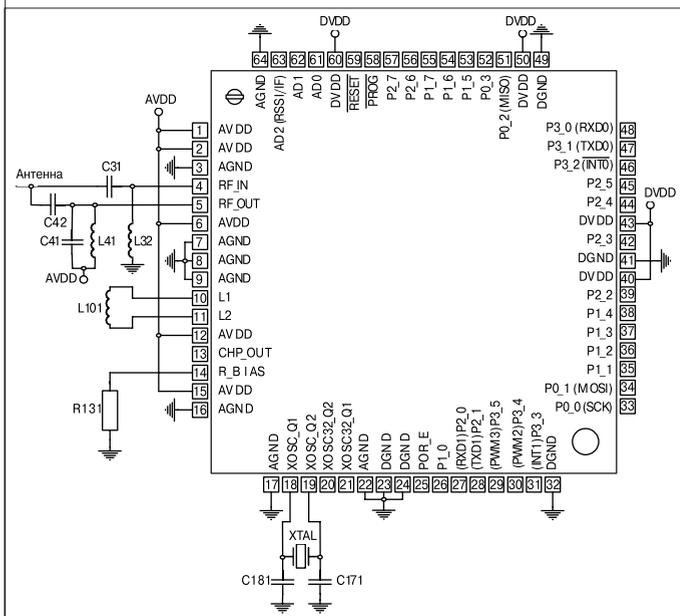
ВЧ-приемопередатчик микросхемы CC1010 предназначен для маломощных устройств, функционирующих при очень низких напря-

жениях. Он рассчитан, как указывалось выше, для работы в ЧМн-режиме в диапазоне частот 300–1000 МГц. Приемный блок представляет собой традиционный супергетеродинный приемник. Блок передатчика также традиционен. Встроенный блок переключения режимов передачи/приема облегчает сопряжение и согласование схемы с антенной, не требуя большого числа внешних компонентов. Для работы ВЧ-приемопередатчика не нужны внешний ВЧ-переключатель или фильтр ПЧ, и число используемых внешних пассивных компонентов невелико. Для опорного генератора синтезатора частоты нужен внешний кристаллический генератор, а для генератора, управляемого напряжением (ГУН), – внешний индуктивный элемент (рис.4), который следует размещать на печатной плате как можно ближе к чипу и симметрично входным выводам. Для уменьшения токов утечки необходимо, чтобы взаимодействие между элементом индуктивности и согласующей схемой было небольшим. Поэтому элемент индуктивности помещают на тыльной стороне печатной платы.

Регистры специальных функций позволяют задавать следующие режимы и ключевые параметры приемопередатчика:

- режим приема/передачи;
- уровень выходной мощности;
- основные характеристики синтезатора частоты – частота выходного сигнала, частотное разделение (девиация частоты) ЧМн-сигнала, частота опорного генератора;
- режим включения/снижения энергопотребления;
- скорость передачи и формат данных (кодированные методом без возврата к нулю, манчестерским кодом, прозрачный или UART-интерфейс) ;
- режим индикации блокировки синтезатора частоты;
- дополнительный (устанавливаемый по усмотрению разработчика) вывод данных индикатора уровня принимаемого сигнала или внешнего сигнала ПЧ.

Фирма Chipcon поставляет заказчикам CC1010 Windows-приложение – SmartRF Studio, генерирующее все установочные параметры требуемой конфигурации, а также значения параметров компонентов, необходимых для блока согласования входа/выхода микросхемы и внешнего элемента индуктивности для ГУН. Благодаря этому CC1010 приемопередатчик весьма гибок и прост в применении.



**Рис.4. Типичная схема применения CC1010**

В специальном регистре хранятся отдельные биты, управляющие приемным и передающим блоками, синтезатором частоты и кристаллическим генератором, что позволяет устанавливать наименьший для конкретного применения потребляемый ток.

Приемопередатчик может работать в четырех программируемых режимах приема/передачи данных, отличающихся способами кодирования данных, методами приема и передачи входящих и исходящих данных, а также тем, выполняется или нет ресинхронизация потока разрядов. Фирма Chipcon рекомендует работать в режимах синхронного бинарного кодирования без возврата к нулю (NRZ) и синхронного манчестерского кодирования, обеспечивающих передачу и прием данных с заданной скоростью двоичной передачи. В двух других режимах (транспарантном и UART) происходит обмен данными между ЧМн-модемом, регистром и UART-интерфейсом, позволяющий заказчику устанавливать необходимую ему скорость передачи и метод кодирования данных. При этом не поддерживается побайтовый режим передачи и не используются схемы выбора данных. Транспарантный режим предназначен только для тестирования.

Благодаря высоким характеристикам ФАПЧ CC1010 весьма перспективен для применения в системах со скачкообразной перестройкой частоты, позволяя в зависимости от скорости передачи и объема пересылаемых данных изменять частоту со скоростью

10–1000 скачков/с. При этом "следующая" частота может записываться в соответствующий регистр при работе на "текущей". Постановления Федеральной комиссии связи США при использовании скачкообразной перестройки частоты и выполнении определенных требований допускают выходную мощность передатчика до 1 Вт.

### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Фирма Chipcon поставляет и обширные программные средства поддержки микросхемы CC1010. Это – библиотека абстрактных представлений аппаратных средств (Hardware Abstraction Library – HAL) и библиотека утилит фирмы Chipcon (Chipcon Utility Library – CUL). Первая содержит легко выполнимые функции и макросы для доступа к схемным блокам CC1010 без непосредственного обращения к SFR. Она также содержит функции, необходимые для выполнения простых подпрограмм ВЧ-связи. Во второй можно найти более сложные подпрограммы ВЧ-связи и средства поддержки операций контроля с помощью циклического избыточного кода, автоматического уведомления об успешном приеме данных и повторной передаче.

Поставляемые фирмой средства проектирования CC1010DK значительно облегчают пользователю оценку ВЧ-характеристик микросхемы и разработку прикладных программ (рис.5). В эти средства входят оценочная плата и два оценочных модуля с микросхемой CC1010. Оценочная

плата имеет два последовательных порта, параллельный интерфейс, разнообразные клавиши, СИД, стабилизатор напряжения, переключки и соединители, что обеспечивает сопряжение CC1010 с интегрированной средой разработки, приложением SmartRF Studio и разнообразным тестовым оборудованием. Она также служит материнской платой для оценочных модулей. Последние могут функционировать и самостоятельно. В средства проектирования также входит оценочная версия mVision 2C компилятора фирмы Keil с ограничением по размеру кода 2 Кбайт.

### ДРУГИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ ФИРМЫ

Для большинства применений полоса частот 2,400–2,4835 ГГц в мире доступна без лицензирования, что делает ее очень привлекательной для систем беспроводной связи на короткие расстояния. Вот почему такой интерес вызывает разработанная фирмой Chipcon 0,18-мкм КМОП-платформа SmartRF 03 BlueLine, позволяющая реализовывать с высокой плотностью упаковки элементов высо-

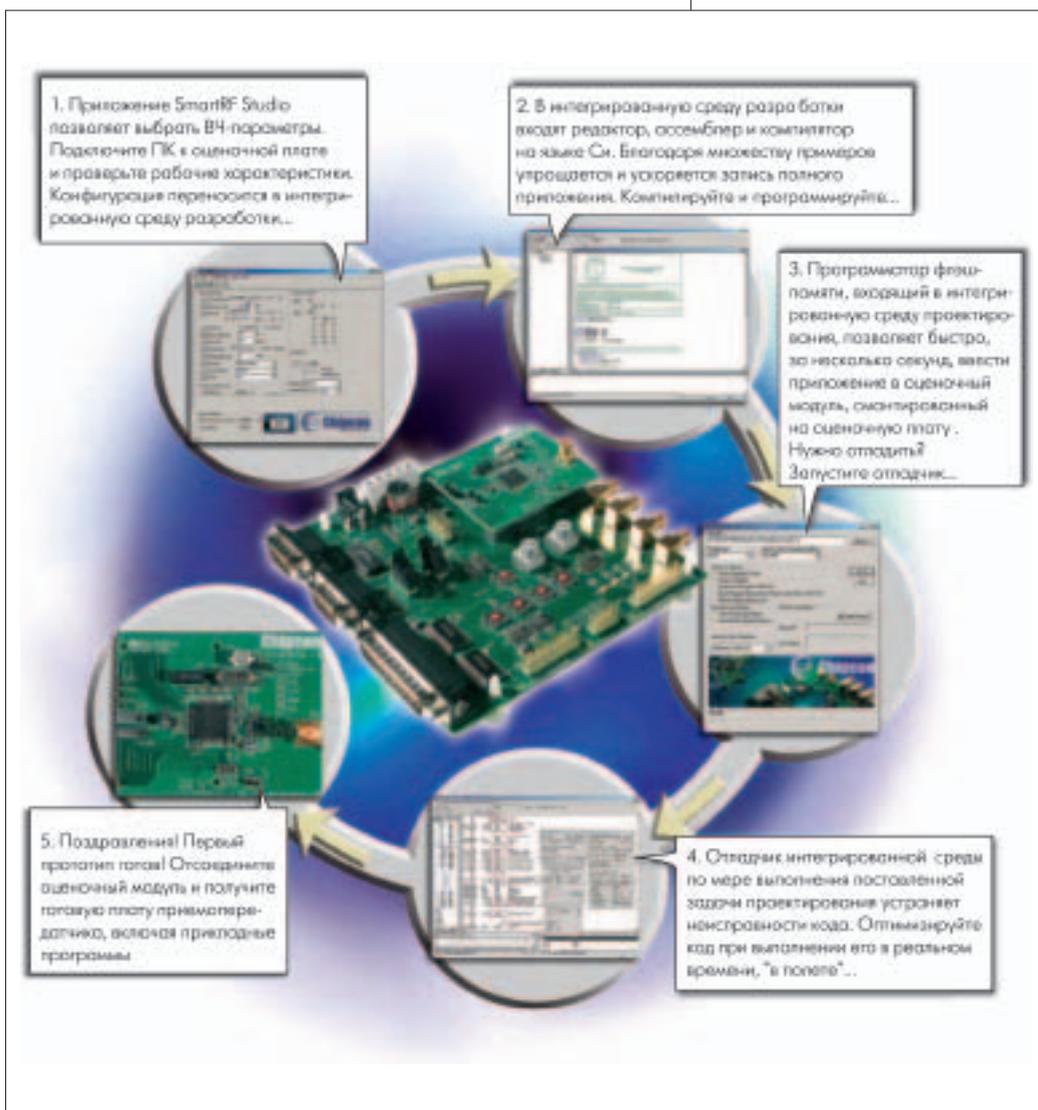
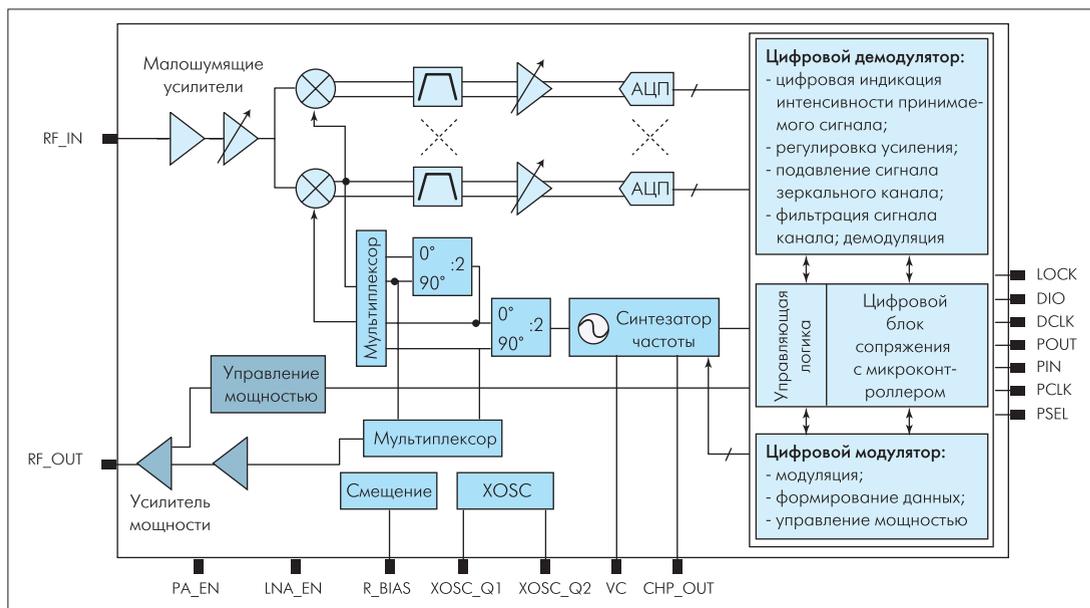


Рис.5. Средства проектирования CC1010DK. От идеи к прототипу



расстояния (SRD), но может быть запрограммирована на любую частоту диапазона 424–470 и 848–940 МГц. При этом она может функционировать в системах с разносом каналов 12,5 кГц (в соответствии с японским стандартом ARIB STD-T67) и 25 кГц (в соответствии с европейским стандартом EN 300 220). Это означает, что микросхема отвечает высоким требованиям, предъявляемым к стабильности частоты, мощности соседних каналов и ширине полосы передатчика и к чувствительности соседних

**Рис.6. Упрощенная блок-схема CC1020**

качественные ВЧ-модули и цифровые схемы на этот диапазон частот и предоставляющая больше возможностей для оптимизации архитектуры ВЧ-приемопередатчика, чем платформа SmartRF 02. Но и для некоторых ВЧ-микросхем, рассчитанных на частоты менее 1 ГГц, эта платформа также интересна, особенно для изделий с высоким уровнем интеграции и большим числом цифровых блоков. Разработка платформы SmartRF 03 BlueLine отвечает целям фирмы Chipson по созданию как можно более дешевого быстродействующего ВЧ-приемопередатчика с весьма малой потребляемой мощностью для систем Bluetooth-стандарта. Первый прибор, который должен быть реализован по новой технологии, – это однокристалльный ВЧ-приемопередатчик CC2400 на диапазон 2,4 ГГц, полностью отвечающий требованиям версии 1.1. стандарта BluetoothT. Он содержит все блоки, необходимые для выполнения функций передачи и приема данных, включая встроенный синтезатор частоты. Напряжение питания приемопередатчика равно всего 1,8 В, потребляемый ток также мал. По утверждению разработчиков, CC2400 благодаря низкой стоимости, малой потребляемой мощности при высоких характеристиках и гибкости проектирования сможет успешно конкурировать на рынке изделий для ВЧ-систем стандарта Bluetooth. К тому же, гибкость и запас прочности разрабатываемого приемопередатчика позволят "бесшовно" интегрировать его в другие Bluetooth-изделия как модуль интеллектуальной собственности. Микросхема может также использоваться в системах стандарта ZigBee/IEEE 802.15.4 (WPAN).

Нельзя не отметить и выпущенную в конце 2002 года и уже хорошо себя зарекомендовавшую новую КМОП-микросхему первого в мире однокристалльного узкополосного ВЧ-приемопередатчика, работающего в режиме ЧМн/АМн и отвечающего жестким требованиям многоканальных узкополосных систем связи. Фирма сумела объединить в микросхеме все внешние ВЧ-фильтры, требуемые для работы в очень узкой полосе частот. Таким образом, CC1020 – первое коммерческое ВЧ-изделие, заменившее дорогие и "жаждущие" большого числа дискретных компонентов устройства (рис.6).

Микросхема, выполненная по SmartRF 02 технологии с 0,35-мкм нормами, рассчитана на работу на частотах 426, 429, 433, 868 и 915 МГц, отведенных для промышленного, научного и медицинского оборудования (ISM) и систем связи на короткие

каналов и подавлению помех по зеркальному каналу приемного блока. Программируемая скорость передачи данных CC1020 достигает 153,6 Кбод. Чувствительность приемопередатчика при разносе каналов 12,5 кГц составляет -121 дБм. Ток приемника – 17,3 мА, напряжение питания – 2,3–3,6 В. Поставляется CC1020 в 32-выводном QFN-корпусе по цене 2,6 долл. при закупке партии в 1 млн. шт. и более.

