

# Сеть сбора данных и управления на базе многофункциональных криптозащищённых радиосенсоров

**Александр Елисеев (г. Вильнюс, Литва)**

Порой перед разработчиком встаёт задача создания системы беспроводной передачи данных от удалённых датчиков, измерителей, выключателей и т.д. При этом исполнение должно быть недорогим, а разработка – быстрой. Открытый проект, описанный в статье, представляет собой одну из попыток решения такой задачи с ориентацией на доступность элементной базы.

## ВВЕДЕНИЕ

Как-то у прилавка радиомагазина взгляд автора задержался на малогабаритных модулях для передачи данных на частоте 433,92 МГц, а также недорогих микроконтроллерах ATMEGA8. Микроконтроллеры серии AVR фирмы Atmel, к которым относится и ATMEGA8, имеют простую и легко осваиваемую новичками архитектуру и при этом снабжены доступным и обширным набором инструментов разработки. Эта элементная база, а также цифровые термодатчики DS18S20, которые не требуют калибровки и могут быть объединены в сеть, и послужили основой для создания описываемой системы беспроводного сбора данных с датчиков.

## СОСТАВ, НАЗНАЧЕНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ

Физически радиосеть сбора данных состоит из нескольких (до 8) радиосенсоров, имеющих автономное питание, с подключёнными к ним внешними датчиками, а также одного центрального приёмно-управляющего модуля. Радиосенсоры периодически посыпают пакеты данных, которые принимаются центральным модулем (ЦМ). Центральный модуль может выдавать управляющие сигналы на внешние исполнительные уст-

ройства в соответствии с сигналами от радиосенсоров или по запросу передавать накопленную информацию через проводной последовательный интерфейс на другие устройства или компьютер.

Система может применяться для считывания информации с рядом расположенных (в пределах 100...200 м) подвижных объектов – автомобильных прицепов, машины возле дома, поплавков, контейнеров, конвейеров, датчиков температуры пациентов в больнице и т.д. С другой стороны, система может быть применена для множественного доступа из разных точек к одному исполнительному устройству, например, электрозамку или выключателю освещения.

## РАДИОСЕНСОРЫ

Радиосенсор построен на основе микроконтроллера (МК) ATMEGA8 и модуля передатчика TX433N (см. рис. 1). К радиосенсору может быть подключена локальная проводная сеть датчиков с интерфейсом 1-Wire (в данной версии на шину 1-Wire подключаются цифровые температурные датчики DS18S20 фирмы Maxim Integrated Products, имеющие точность  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  и диапазон измерения  $-55\ldots125^{\circ}\text{C}$ ). Шина 1-Wire может объединять множество датчиков, образуя сеть. В момент включения радиосенсора программа МК способна идентифицировать разнообразные устройства, подключаемые на шину 1-Wire: АЦП, цифровые потенциометры, часы реального времени, различные типы памяти и известные под маркой iButton® электронные ключи (в

текущей версии обрабатываются только данные с температурных датчиков).

Радиосенсор способен также измерять напряжения на встроенных аналоговых входах и передавать их значения. Аналоговые входы рассчитаны на диапазон входного напряжения 0...10 В и входное сопротивление не менее 10 кОм. АЦП, подключенный к аналоговым входам, имеет разрешение 10 бит. Входы могут использоваться для подключения датчиков с аналоговыми и цифровыми выходами по напряжению. Для обеспечения точности измерения радиосенсор снабжён функцией калибровки аналоговых входов.

Для универсальности применения радиосенсоры выполнены так, что могут питаться от внешнего или автономного источника питания с напряжением 3,6...5 В. Для уменьшения потребляемой энергии радиосенсоры считывают информацию с температурных датчиков и аналоговых входов в течение короткого времени через определённые промежутки, находясь всё остальное время в выключенном («спящем») состоянии. Периодичность выхода из выключеного состояния определяется работой внутреннего сторожевого таймера МК.

Поскольку в радиосети может одновременно работать несколько передатчиков, во избежание конфликтов, связанных с одновременной передачей данных радиосенсорами, применён способ случайного генерирования длительности пауз между периодами их активности. Для этого в радиосенсорах применяется программный генератор случайных чисел (ГСЧ). Разное время включения радиосенсоров обеспечивает достаточно хорошую рандомизацию ГСЧ, но для её усиления применён способ формирования начальной комбинации ГСЧ на основе уникального кода первого обнаруженного датчика DS18S20 в сети 1-Wire.

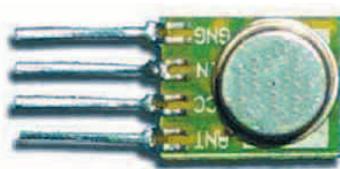


Рис. 1. Модуль передатчика TX433N

Для сосуществования сети радиосенсоров вблизи других аналогичных сетей (например, в многоквартирном доме) реализовано кодирование передаваемых пакетов на основе 4-байтного ключа с помощью криптоалгоритма RC4 (Ron's Code 4). Приёмник одной радиосети, не зная ключа, не может случайно или намеренно принять и расшифровать пакеты, выдаваемые радиосенсорами другой сети.

Целостность передаваемых пакетов контролируется с использованием контрольной суммы, а для уменьшения вероятности ложного приёма применено специальное кодирование преамбулы пакета.

Радиосенсоры в сети идентифицируются по своим номерам, которые передаются в каждом пакете. Номер задаётся перемычками на плате радиосенсора. В сети может работать до восьми радиосенсоров.

Для немедленной активизации в ответ на некоторые события радиосенсоры снабжены двумя цифровыми входными линиями. При спаде сигнала на любой из этих линий ниже 1,5 В радиосенсоры переходят в рабочее состояние и начинают передачу сигнала с информацией о состоянии этих линий. Центральный модуль в ответ на принятое сообщение без задержек способен дать соответствующий сигнал внешнему исполнительному устройству. Используя эту возможность, можно построить,

например, удобную систему управления освещением на беспроводных автономных выключателях.

Ряд параметров радиосенсора может быть изменён с компьютера или другого устройства через встроенный последовательный интерфейс. Параметры можно либо изменить временно (до следующего включения) только в ОЗУ МК радиосенсора, либо сделать изменения постоянными с сохранением их в EEPROM МК.

При редактировании параметров применяется простой протокол командной строки, поддерживаемый многими программами, например HyperTerminal.

При включении радиосенсора программа МК проверяет целостность данных в EEPROM подсчётом контрольной суммы и в случае сбоя возвращает параметры в состояние по умолчанию.

Технические характеристики радиосенсора версии 1.0:

Напряжение питания номинальное	5 В
Ток потребления	
в активном режиме	27 мА
Ток потребления	
в пассивном режиме	.64 мкА
Выходная мощность	
радиопередатчика	10 мВт
Частота работы	
радиопередатчика	.433,92 МГц
Пределы регулировки	
скорости передачи	100...2000 бод

#### Тип модуляции

при передаче пакетов	Манчестер
Длина пакетов (фиксированная)	11 байт
Длина преамбулы	2 байта
Максимальное количество устройств	
на шине 1-Wire	4
Количество аналоговых входов	6
Диапазон напряжения	
на аналоговых входах	0...10 В
Входное сопротивление	
анalogовых входов	10 кОм
Скорость работы последовательного	
интерфейса	115 200 бод
Формат данных последовательного	
интерфейса	8, N, 1
Диапазон номеров радиосенсоров	0...7
Температура эксплуатации	
(оценочно)	-20...+50°C

Регулируемые параметры радиосенсора и их значения по умолчанию приведены в таблице 1. При редактировании параметров радиосенсора через терминал компьютера можно использовать команды, приведённые в таблице 2. Все команды должны заканчиваться нажатием клавиши Enter.

Калибровка АЦП микроконтроллера радиосенсора заключается в том, что в его специальный параметр REF-COD записывается код преобразования АЦП для известного входного напряжения. Например, можно подать на аналоговый вход 1 радиосенсора напряжение 2,5 В. Определить код АЦП можно по команде «^». Код первого входа будет в первой строчке

Таблица 1. Регулируемые параметры радиосенсора и их значения по умолчанию

Мнемоника в протоколе	Значение по умолчанию	Описание
WDTPER	7	Установка предделителя сторожевого таймера (WDT) микроконтроллера ATMEGA8. Определяет, с какой частотой происходит активизация микроконтроллера. Возможные значения задания периода активизации: 0 – 16 мс, 1 – 32 мс, 2 – 65 мс, 3 – 0,13 с, 4 – 0,26 с, 5 – 0,52 с, 6 – 1 с, 7 – 2,1 с
WDTDVC	2	Определяет, какая по счёту активизация сторожевого таймера вызовет процедуру считывания датчиков и посылки радиопакета. После выполнения процедуры считывания-отправки счёт начинается заново. Допускаются значения от 0 до 255
WTDVV	0	Максимальная величина вариации. Вариация – это случайное целое число, добавляемое к WDTDVC после каждой активизации процедуры считывания-отправки при расчёте реального числа активизаций WDT до следующей процедуры считывания-отправки. Допускаются значения от 0 до 255
BTRATE	16000	Величина, определяющая скорость передачи радиопакетов. Равна числу тактов осциллятора, формирующих интервал в половину бита. В версии 1.0 частота осциллятора равна 16 МГц. Допускаются значения от 4000 до 65 535. Величина 16 000 означает скорость передачи 500 бод
SFLAGS	0	Системные флаги. При представлении в двоичном виде, начиная счёт справа налево: 0 бит – единица означает отключение посылки информации о состоянии аналоговых входов; 1 бит – единица означает отключение посылки информации с температурных датчиков; 3 бит – единица означает отключение реакции на цифровые входы; 4 бит – указывает, что вместо кода состояния 1-го аналогового канала будет передаваться калибровочная константа АЦМ
PREAMB	0xD9C2	Код преамбулы. Изменением кода преамбулы можно усилить защиту от влияния соседних сетей. Изменять можно только на специальные рассчитанные значения
REFCOD	999	Калибровочная константа АЦМ
KEYCOD	999	Ключ шифрования для алгоритма RC4. Должен быть идентичен ключу приёмника

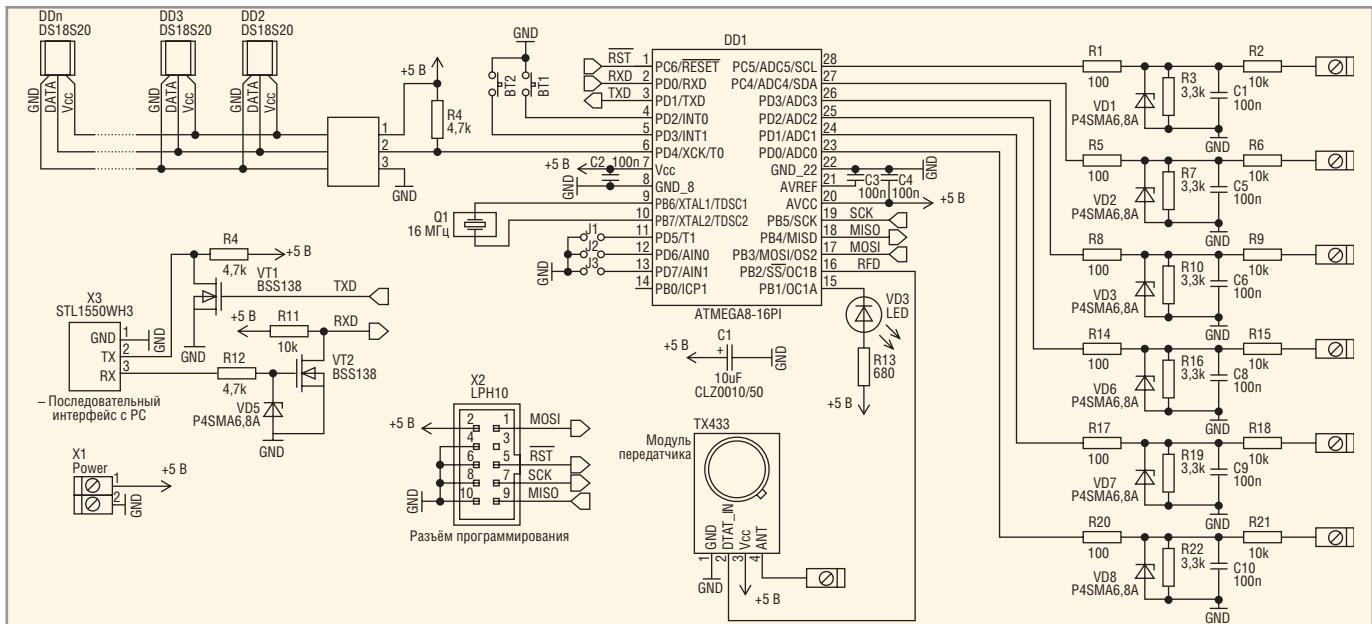


Рис. 2. Схема макета радиосенсора

списка. Необходимо этот код записать в параметр REFCOD. Далее этот код может быть передан в пакете с данными на центральный модуль (см. параметр SFLAGS). Таким образом устройства, принимающие данные от радиосенсоров, могут провести корректировку полученных значений в соответствии с калибровочным кодом каждого радиосенсора.

### Принципиальная схема радиосенсора

На рисунке 2 изображена схема макета радиосенсора. Микроконтроллер DD1 программируется на плате через разъем X2. К разъему X3 через интерфейс RS-232 может подключаться ПС. Большинство настольных компьютеров будет работоспособно с такой схемой.

Кнопки BT1 и BT2 подают сигнал на цифровые входы радиосенсора.

Контакты 23...28 микроконтроллера DD1 служат аналоговыми входами.

Перемычками J1...J3 задаётся номер радиосенсора в сети (они должны различаться).

Светодиод VD4 зажигается в моменты передачи пакетов. В режиме настройки параметров он непрерывно мигает.

Радиосенсор работает от кварцевого резонатора частотой 16 МГц. Такая частота выбрана для технологического удобства. Для улучшения энергетических параметров радиосенсора частота кварцевого резонатора должна быть уменьшена. Этого можно добиться небольшими изменениями в программе. Без значительных трудностей с профайлингом программы на Си можно уменьшить частоту до 4 МГц.

### Оптимизация энергопотребления радиосенсора

Для энергосбережения МК радиосенсора использует возможность выхода из выключеного состояния

по сигналу от сторожевого таймера (WDT).

После подачи питания МК, выполнив начальные процедуры инициализации и отправив первые пакеты с данными, входит в режим Power down. В этом режиме прекращается работа кварцевого генератора и останавливаются тактирование внутреннего процессора и периферии, но продолжает работать внутренний RC-генератор WDT. Энергопотребление радиосенсора в выключенном состоянии (см. рис. 3) в основном и обусловлено током, потребляемым этим генератором.

Через некоторое время WDT выдаёт сигнал, включающий кварцевый генератор и активизирующий процессор. Для стабилизации генератора схема МК отрабатывает задержку около 5 мс. В это время ток потребления радиосенсора значительно увеличивается (см. рис. 4).

Чаще всего радиосенсор должен находиться в выключенном режиме гораздо дольше периода следования сигналов активизации от WDT. Для этого в программе ведётся счётчик включений, по достижении определённого значения которого программа инициирует рабочий цикл радиосенсора; в ином случае программа сразу же переводит МК обратно в режим Power down. Контрольное значение счётчика пересчитывается программой по определённому алгоритму после каждого рабочего цикла.

Длительность рабочего цикла радиосенсора, в течение которого он считывает информацию с темпера-

Таблица 2. Команды редактирования параметров радиосенсора

Символы команды	Описание действия
[Мнемоника]=[новое значение]	Редактирование параметра. Новое значение может быть введено в десятичном или шестнадцатеричном виде (с префиксом 0x)
«?»	Вызов значений всех рабочих параметров из RAM
«+»	Сохранить параметры в EEPROM из RAM
«-»	Восстановить параметры из EEPROM в RAM
«*»	Восстановить параметры по умолчанию в RAM
«#»	Показать номер радиосенсора
«»	Выйти из режима редактирования
«^»	Показать результаты измерения всех аналоговых каналов

\* Все команды должны заканчиваться нажатием клавиши Enter.

турных датчиков и аналоговых входов и посыпает радиопакеты, в основном зависит от их количества и скорости передачи. Один радиопакет имеет длину 104 бита. Для каждого температурного датчика посыпается свой пакет плюс отдельный пакет с информацией об аналоговых входах.

Установкой рабочих параметров можно увеличить скорость передачи пакетов и уменьшить их количество. Но увеличивать скорость выше 1000 бод не рекомендуется из-за возможного ухудшения качества связи.

По экспериментальным данным, при скорости 500 бод и отправке одного пакета длительность рабочего цикла равна 215 мс.

Вклад температурных датчиков DS18S20 в ток потребления в выключенном состоянии – не более 2 мА, а в активном режиме – не более 2 мА (в течение незначительной доли времени рабочего цикла).

Модуль передатчика в выключенном состоянии практически не вносит влияния, а в режиме передачи потребляет 5...8 мА при напряжении питания 3,6...5 В соответственно (см. рис. 5).

Опираясь на представленные данные, легко вычислить необходимую ёмкость элемента питания для автономной работы радиосенсора в течение заданного времени.

Так, например, при напряжении питания 3,6 В и активизации радиосенсора каждые 30 с на время 215 мс ёмкости литиевой батареи фирмы Tadiran размера AA будет достаточно для непрерывной работы радиосенсора в течение 555 дней.

Ещё лучшие энергетические параметры может дать снижение частоты кварцевого резонатора до 4 МГц ( дальнейшее снижение частоты не приводит к существенной экономии, поскольку в этом случае будет доминировать ток радиопередатчика).

## ЦЕНТРАЛЬНЫЙ МОДУЛЬ

Центральный модуль (в дальнейшем ЦМ) построен на основе МК

ATMEGA8 и модуля приёмника RX433 (см. рис. 6). Его задача – непрерывный приём пакетов, поступающих по эфиру от удалённых радиосенсоров, размещение их информационного содержания во внутренней памяти и выдача накопленной информации по запросу внешних устройств через последовательный интерфейс.

В случае поступления пакетов с информацией о состоянии цифровых входов радиосенсоров ЦМ немедленно переключает состояние своих соответствующих цифровых выходов.

Центральный модуль снабжён алфавитно-цифровым ЖКИ (в данной версии приёмника индикатор используется для тестирования).

Как и радиосенсор, некоторые рабочие параметры ЦМ можно модифицировать через последовательный интерфейс с компьютера (см. табл. 3). Как и в радиосенсорах, рабочие параметры имеют значения по умолчанию, восстанавливаемые в случае сбоев во внутреннем EEPROM микроконтроллера.

При редактировании параметров центрального приёмника через терминал компьютера можно использовать команды, перечисленные в таблице 4.

Технические характеристики центрального приемника версии 1.0:

### Напряжение питания

номинальное ..... 5 В

Ток потребления ..... 25 мА

Частота работы

радиоприёмника ..... 433,92 МГц

Пределы регулировки скорости

передачи ..... 100...2000 бод

Тип модуляции при передаче

радиопакетов ..... Манчестер

Длина принимаемых пакетов

(фиксированная) ..... 11 байт

Длина преамбулы ..... 2 байта

Максимальное количество

обслуживаемых радиосенсоров ..... 4

Скорость работы последовательного

интерфейса ..... 115 200 бод

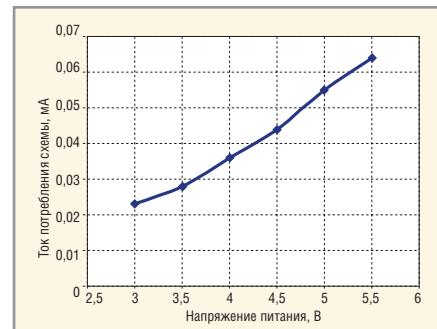


Рис. 3. Результаты измерений тока потребления радиосенсора в выключенном состоянии

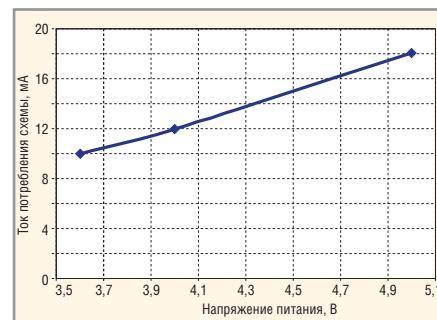


Рис. 4. Результаты измерений тока потребления радиосенсора в момент активизации WDT

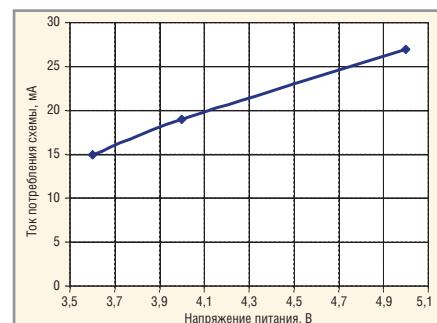


Рис. 5. Результаты измерений тока потребления радиосенсора в рабочем цикле

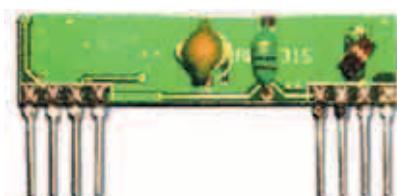


Рис. 6. Модуль приёмника RX433

Формат данных последовательного интерфейса ..... 8, N, 1  
Температура эксплуатации  
(оценочно) ..... -20...+50°C

Таблица 3. Регулируемые параметры ЦМ и их значения по умолчанию

Мнемоника в протоколе	Значение по умолчанию	Описание
BTRAT	16000	Величина, определяющая скорость передачи радиопакетов. Равна числу тактов осциллятора, формирующих интервал в половину бита. В версии 1.0 частота осциллятора равна 16 МГц. Допускаются значения от 4000 до 65 535. Величина 16 000 соответствует скорости передачи 500 бод
PREAMB	0xD9C2	Код преамбулы. Изменением кода преамбулы можно усилить защиту от влияния соседних сетей. Изменять можно только на специальные рассчитанные значения
KEYCOD	999	Ключ шифрования для алгоритма RC4 должен быть идентичен ключу приёмника
DEVADR	1	Адрес устройства в протоколе MODBUS



Рис. 7. Структура пакета, принимаемого ЦМ по протоколу MODBUS в режиме ASCII



Рис. 8. Интерпретация полей блока данных функции 3

Дистанция уверенного приёма центральным модулем сигналов радиосенсоров в прямой видимости по результатам испытаний в городских условиях составила 100...150 м. Напряжение питания приёмника и передатчика при этом равнялось 5 В, а в качестве антенн применялись свободно свисающие отрезки провода длиной 20 см.

Внутри зданий уверенный приём сохранялся в пределах нескольких десятков метров на уровне одного этажа и в пределах 3–4 этажей – по вертикали.

ЦМ взаимодействует с внешними устройствами по сокращённой версии протокола MODBUS в качестве подчинённого устройства в режиме ASCII. Этот протокол канального уровня широко известен в среде разработчиков систем промышленной автоматизации и поддерживается большим количеством различных устройств. Он очень прост в реализации и хорошо описан, а потому логично было использовать его в качестве протокола передачи данных для возможной интеграции ЦМ в существующие системы.

При нормальной работе ЦМ обрабатывает пакеты MODBUS (см. рис. 7), поступающие по последовательному интерфейсу, и в случае приёма сим-

вала ESC (шестнадцатеричное 0x1B), например, из программы HyperTerminal, ЦМ переходит в режим редактирования параметров. Выход из режима также осуществляется по приходу символа ESC.

Описание протокола MODBUS даётся на сайте журнала. ЦМ обрабатывает только одну функцию протокола – 03 (чтение 2-байтных регистров). С помощью этой функции устройство может прочитать содержимое трёх массивов: идентификаторов температурных датчиков DS18S20, значений температуры с них и массива состояний аналоговых входов с радиосенсоров.

Интерпретация полей блока данных при запросе выполнения функции 3 внешним устройством показана на рисунке 8. Первые два символа кодируют тип данных, указывая, элемент какого массива требуется прочитать. Третий и четвёртый символы задают 1-й и 2-й индексы двумерного массива с данными. Первый индекс задаёт номер радиосенсора, а второй – номер температурного датчика или аналогового входа. Индексация начинается с нуля.

Принята следующая кодировка поля типа данных:

- 1 – идентификаторы температурных датчиков;
- 2 – значения температуры;

Таблица 4. Команды редактирования параметров центрального приёмника

Символы команды	Описание действия
[Мнемоника]=[новое значение]	Редактирование параметра. Новое значение может быть введено в десятичном или шестнадцатеричном виде (с префиксом 0x)
«?»	Вызов значений всех рабочих параметров из RAM
«+»	Сохранить параметры в EEPROM из RAM
«–»	Восстановить параметры из EEPROM в RAM
«*»	Восстановить параметры по умолчанию в RAM
«.»	Выйти из режима редактирования

\* Все команды должны заканчиваться нажатием клавиши Enter.

- 3 – значения с аналоговых входов (АЦП) удалённых датчиков.

Поле «количество читаемых регистров» должно содержать 1 при чтении температуры и значений АЦП, поскольку они выражаются 2-байтными величинами, и 3 – при чтении идентификаторов, поскольку они состоят из 6 байт.

Температура представляется в оригинальном формате, в котором она передаётся температурными датчиками, – с младшим байтом впереди.

Значения АЦП представляются также в формате с младшим байтом впереди.

Идентификаторы представлены шестью байтами вместо восьми, которые обычно выдаются 1-Wire-устройствами (отбрасываются коды семейства устройств и контрольная сумма).

#### Принципиальная схема центрального модуля

На рисунке 9 изображена схема макета центрального модуля (ЦМ).

Центральный модуль выполнен на основе микроконтроллера ATMEGA8 и приёмного модуля RX433.

Модуль RX433 построен по 2-транзисторной сверхрегенеративной схеме с компаратором на операционном усилителе LM358. Чувствительность модуля –106 дБм, что приблизительно равно 1 мкВ при 50-Ом антенне. Полоса захвата сигнала – 1 МГц. Экспериментальные измерения показали, что модуль способен принимать данные со скоростью до 10 кбит/с.

Широкая полоса захвата и работа на частоте сигнала, широко используемой различными системами охраны и телеуправления, приводят к тому, что на выходе приёмного модуля постоянно присутствует непрерывно изменяющийся цифровой сигнал.

Микроконтроллер DD1 анализирует цифровой сигнал, поступающий с приёмного модуля, обнаруживает в нём радиопакеты сенсоров, декодирует их и сохраняет информацию во внутренней памяти.

В случае прихода радиопакетов от цифровых входов радиосенсоров МК переключает состояние ключей VT2, VT3 в зависимости от того, бит какого из входов выставлен в единицу (соответствует нажатию кнопок BT1 и BT2 на макете радиосенсора).

Светодиод VD1 зажигается в момент приёма и обрабатывает принятого радиопакета.

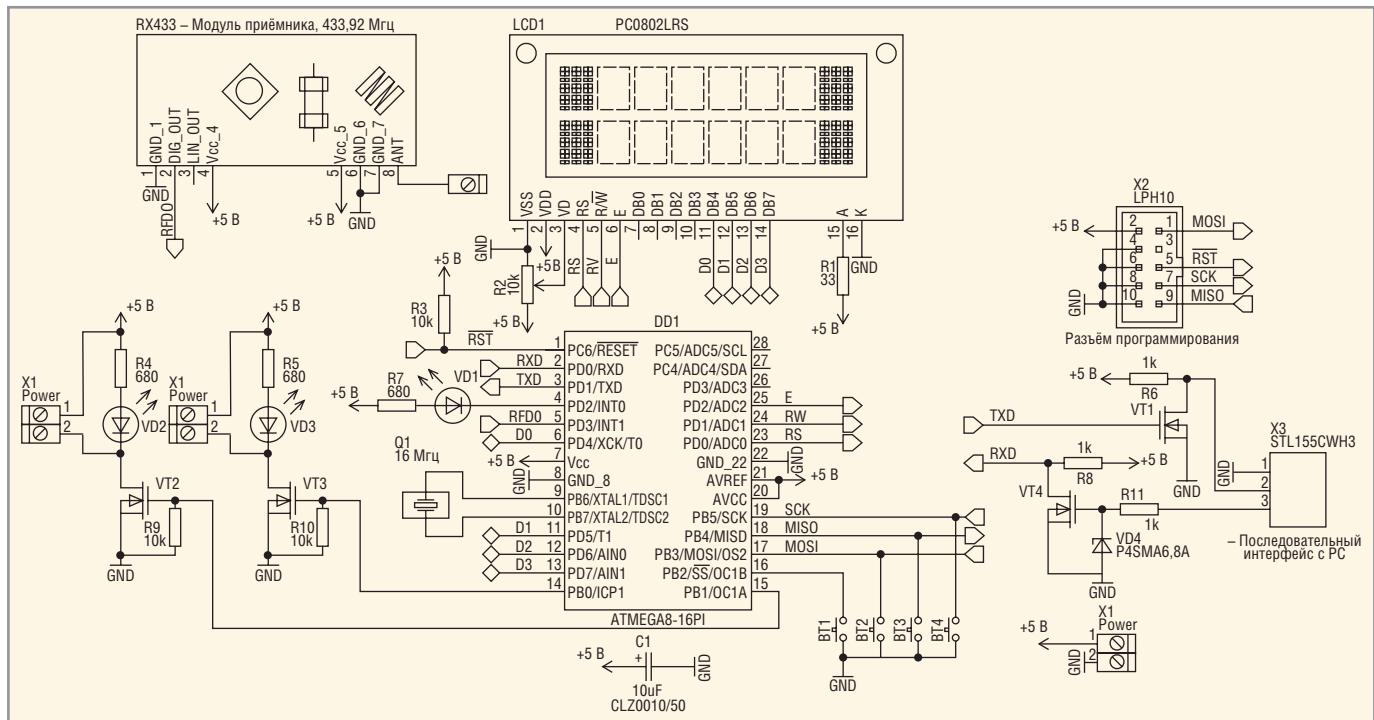


Рис. 9. Схема макета центрального модуля

МК центрального приёмника, так же как и МК радиосенсора, программируется на плате через разъём X2.

### Действие декодера радиопrotокола

Платой за дешевизну модулей передатчика и приёмника (TX433N, RX433) является сильная зашумленность принимаемого сигнала. Специальный радиопротокол, разработанный для этого проекта, позволяет ослабить влияние помех, сопутствующих приёму такого сигнала.

Структура радиопротокола базируется на нескольких принципах:

- пакетная передача с фиксированной длиной;
- обнаружение пакетов и синхронизация на основе кодированной преамбулы;
- манчестерское кодирование информационных битов;
- дополнительная выборка;
- точно известная скорость передачи данных.

Фиксированная длина пакетов и известная скорость передачи упрощают структуру декодера и повышают вероятность декодирования данных.

Манчестерское кодирование удаляет из сигнала постоянную составляющую, что улучшает работу компаратора приёмного модуля. При таком кодировании «1» представляется спадом сигнала, а «0» – подъёмом. Спад или подъём располагаются посередине

некоторого интервала передачи бита, а в начале интервала производится переключение уровня сигнала так, чтобы через полбита можно было выполнить спад или подъём.

Кодированная преамбула позволяет синхронизировать приём и повышает вероятность обнаружения пакетов данных, искажённых помехами, одновременно снижая вероятность ложного обнаружения пакетов при их отсутствии в условиях непрерывного шумового потока. В преамбуле используется NRZ-кодировка; передаётся она со скоростью вдвое большей, чем информационные биты. Преамбула специально вычислена на основе ряда критериев, один из которых – минимальные побочные максимумы автокорреляционной функции, а другой – минимальная кросс-корреляция на всём множестве возможных двоичных кодов с манчестерским кодированием. Вычисления для 16-битной преамбулы легко выполнить прямым перебором.

При дополнительной выборке декодер принимает отсчёты с гораздо большей частотой, чем частота передачи битов информации. Это позволяет применить корреляционные методы при декодировании битов, повышая, таким образом, помехоустойчивость приёма.

На рисунке 10 изображена диаграмма, поясняющая принцип действия декодера радиопротокола. Зе-

мьным цветом обозначен цифровой поток из модуля приёмника RX433. Микроконтроллер ЦП выполняет выборку двоичного сигнала из этого потока со скоростью, в 8 раз превышающей скорость передачи битов. Таким образом, за время передачи одного бита МК принимает 8 отсчётов сигнала, а за время передачи преамбулы – 64 отсчёта.

На начальном этапе в МК ЦП непрерывно выполняется процедура корреляции входного потока отсчётов с 64-битным шаблоном преамбулы. Для двоичного сигнала это сумма значений битов, получившихся после побитной операции сложения по модулю 2 текущего буфера входных отсчётов и битов шаблона.

Если значение корреляции достигает некоторой контрольной границы, МК принимает решение о начале приёма битов данных и запускает процедуру корреляции с шаблоном бита, равного 1. В качестве точки привязки для отсчёта битовых интервалов берётся точка максимума на корреляционной функции преамбулы, после того как она превысила контрольную границу. В конце каждого битового интервала, через каждые 8 отсчётов, МК принимает решение о значении принятого бита. Корреляция больше трёх означает приём «1», в противном случае – «0».

Как видно, при приёме бита возможно искажение значений до трёх из

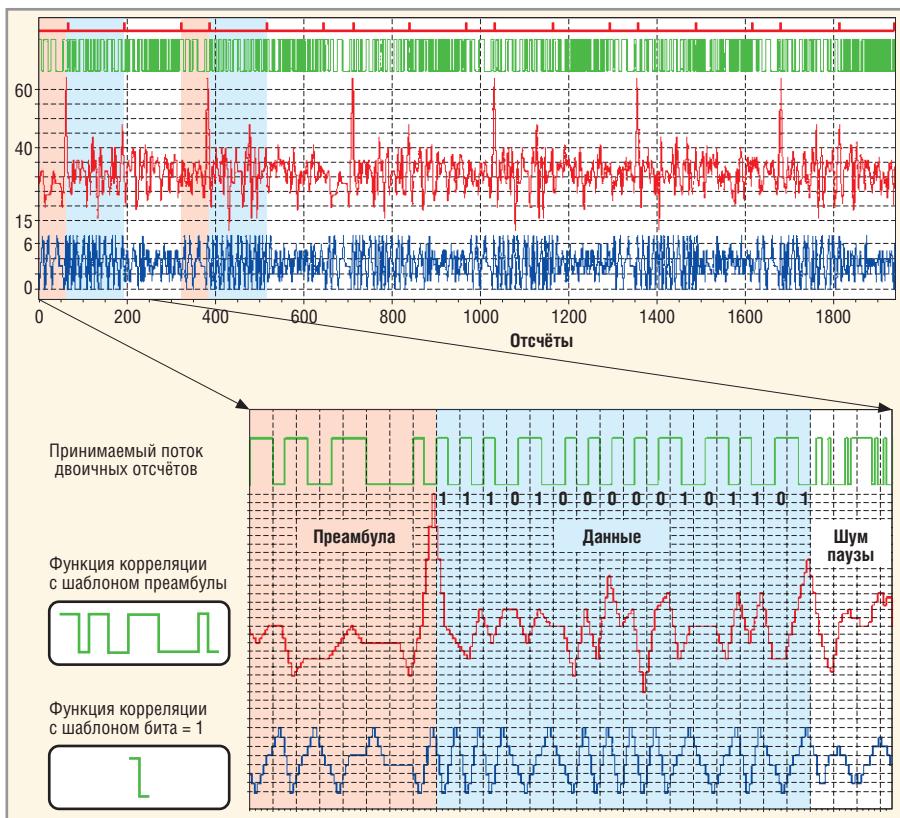


Рис. 10. Диаграмма, поясняющая принцип действия декодера радиопротокола

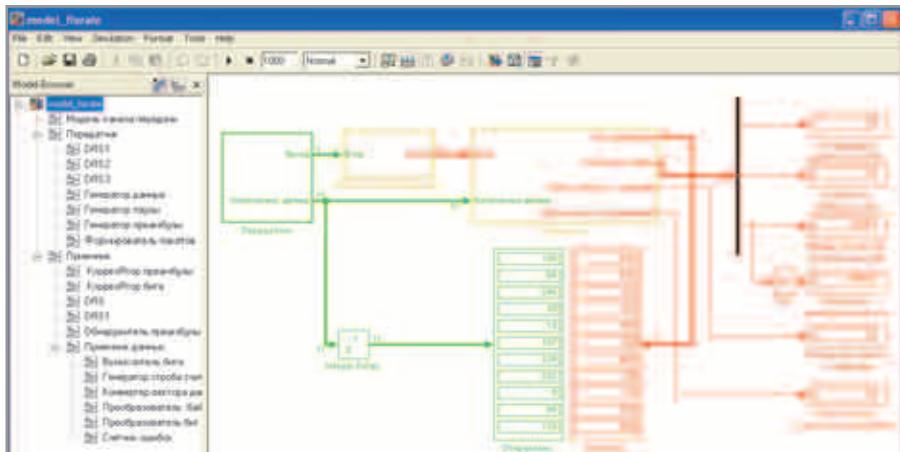


Рис. 11. Модель системы передатчик–радиоканал–приёмник

восьми отсчётов без возникновения ошибки. Относительная доля искажённых значений отсчётов при приёме преамбулы должна быть меньше, поскольку она служит ещё и источником синхронизации. В связи с этим оправданно выбирать граничное значение детектирования преамбулы на 5–6 единиц меньше значения её пика (в данном случае 58–59).

### Моделирование декодера радиопротокола

Для количественной оценки преимуществ, которые даёт описанный выше алгоритм работы декодера, в пакете моделирования SIMULINK для среды MATLAB 7 была разработана

модель (см. рис. 11). Файлы модели можно найти на сайте журнала.

Модель состоит из трёх основных составляющих: моделей передатчика, канала передачи и приёмника.

Модель передатчика формирует поток двоичных данных, по формату повторяющий поток, излучаемый реальным передатчиком. Модель передатчика позволяет легко варьировать такие параметры, как количество байт в пакете, количество формируемых пакетов до завершения работы модели, скорость передачи, код преамбулы. Переисчисленные параметры можно редактировать в рабочем пространстве (Workspace) MATLAB. Модель может выдавать пакеты как со случайными

данными, так и с данными, заданными вручную в подсистеме генератора пакетов.

Поток данных модели передатчика вместе со служебными сигналами и контрольными данными организуется в две шины и передаётся к приёмнику, проходя через модель канала передачи.

В модели канала передачи имитируется шум, наблюдающийся на выходе приёмника в паузах, и несколько меньший шум – во время приёма данных. Вероятности обеих шумовых составляющих можно изменять из рабочего пространства MATLAB.

Модель приёмника восстанавливает из входного двоичного потока пакет данных и выводит его на дисплей рядом с панелью, отображающей контрольный пакет. Попутно в модели приёмника производится сравнение декодированных и контрольных данных, и на дисплей выводится статистика процесса декодирования. Наиболее важные параметры статистики – количества пропущенных пакетов и повреждённых пакетов при заданном общем количестве переданных пакетов.

В модели приёмника самым интересным регулируемым параметром является коэффициент дополнительной выборки (Oversampling), обозначаемый переменной  $k$  в рабочем пространстве MATLAB. Этот коэффициент означает количество отсчётов в приёмнике, приходящихся на один бит данных. От его величины в наибольшей степени зависит помехоустойчивость приёмника. Поскольку от этого коэффициента зависят векторы (в терминологии MATLAB) шаблонов преамбулы и бита данных, а также границы принятия решений, его нежелательно менять непосредственно в рабочем пространстве MATLAB; для этого нужно поменять соответствующее значение в файле initmod.m в директории файлов модели. Указанный файл всегда выполняется при загрузке модели. Он создаёт в рабочем пространстве MATLAB переменные и рассчитывает зависимые параметры. После изменения в нём коэффициента дополнительной выборки в командной строке MATLAB нужно выполнить команду «initmod».

Структура модели приёмника не повторяет структуру программы в МК центрального модуля. Модель приёмника воспроизводит только алгоритм обработки данных в реальном приёмнике и при этом даёт очень важные результаты, влияющие на принятие

тие решений по выбору того или иного варианта радиопротокола.

Для запуска модели нужно сделать текущей директорию с файлами модели и в командной строке MATLAB ввести команду «start\_model\_fixrate».

### Программное обеспечение и программирование МК

Проекты программ радиосенсора и ЦП, находящиеся на сайте, написаны на Си для среды разработки IAR Embedded Workbench, которая включает версию-компилятор IAR C/C++ Compiler for AVR 4.10A/W32.

Для бесплатного скачивания на сайте фирмы IAR помимо прочих доступна 30-дневная оценочная версия среды разработки IAR Embedded Workbench для AVR. Её возможностей хватает, чтобы скомпилировать приведённые проекты.

В среде разработки IAR используются файлы рабочего пространства проектов с расширением «eww» при загрузке проектов. Для радиосенсора и ЦП используются разные файлы рабочего пространства, но с одинаковыми опциями в свойствах проекта:

- General options

- Processor configuration = ATmega8
- Memory model = small
- System configuration = no use dialog
- Library Configuration = CLIB
- Printf formatter = medium
- Scanf formatter = medium
- C/C++ compiler
  - Optimization = Size, High, all optimizations enabled
- Linker
  - Output format = Other, Intel Standard
  - Linker command file = [текущая директория проекта]\lnkm8s.xcl

После компиляции в поддиректории выбранного проекта debug\exe\ появляется HEX-файл Proj.a90 с образом исполняемой программы для загрузки в МК.

Для программирования МК используется программа и простое аппаратное приспособление, описание которого можно найти на сайте [4].

Вид окна программы показан на рисунке 12. При программировании необходимо внимательно следить за установкой конфигурационных бит МК. Они должны быть установлены, как показано на рисунке 12, иначе МК в схеме может оказаться неработоспособным. Биты секретности

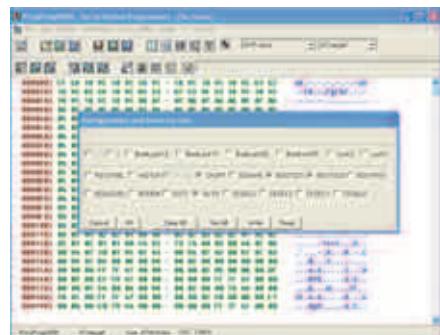


Рис. 12. Внешний вид программы PonyProg и панель установки конфигурационных бит

BootLock12..BootLock01 и Lock2, Lock1 могут выставляться по усмотрению. Установки конфигурационных бит в данной версии радиосенсора и ЦП одинаковы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Heien K.T., Lunder T.A., Torvmark K.H. Oversampling and data decision for the CC400/CC900, www.chipcon.com/files/AN\_008\_Oversampling\_1\_0.pdf.
2. Скляр Б. Цифровая связь. ИД «Вильямс», 2003.
3. Прокис Дж. Цифровая связь. М.: Радио и Связь, 2000.
4. www.LancOS.com.



# DSPA-2006

**Москва**  
29 – 31 марта 2006 г.

8-я Международная Конференция и Выставка  
Цифровая Обработка Сигналов и ее Применение  
Digital Signal Processing and its Applications



**Тематика выставки**

- Новые компоненты различных производителей для цифровой обработки сигналов
- Отечественные и зарубежные изделия на базе DSP
- Новые технические и алгоритмические решения в области цифровой обработки сигналов
- Новые области применения приборов на базе DSP

**AUTEX Ltd.**  
Тел.: (495) 334-7741, 334-9151  
Факс: (495) 234-9991, 334-8729  
e-mail: info@autex.ru http://www.autex.ru

Подробная информация:  
[www.autex.ru](http://www.autex.ru)  
[www.dspa.ru](http://www.dspa.ru)

### Тематика конференции

- Теория сигналов и систем
- Теория и методы цифровой обработки сигналов (ЦОС)
- Цифровая обработка многомерных сигналов
- Цифровая обработка речевых и звуковых сигналов
- Цифровая обработка изображений
- ЦОС в системах телекоммуникаций
- ЦОС в радиотехнических системах
- ЦОС в системах управления
- Цифровая обработка измерительной информации
- Нейрокомпьютерная обработка сигналов и изображений
- Цифровое телерадиовещание
- ЦОС в системах защиты информации
- Проектирование и техническая реализация систем ЦОС
- Проблемы подготовки специалистов в области ЦОС

РНТОРЭС им. А. С. Попова  
Тел.: (495) 921-0610, 921-7108  
Тел./факс: (495) 921-1639  
e-mail: nto.popov@mtu-net.ru  
<http://www.rntores.ru>