

Татьяна Кривченко, к. т. н.  
tkr@efo.ru

# ZigBee-модемы ETRX2 компании Telegesis: Что нового?

**ZigBee-модемы ETRX2 уже известны на российском рынке. Ранее в [1] рассматривались основные принципы построения беспроводной сети на их основе. Настоящая статья посвящена обсуждению возможности использования ZigBee-модемов без внешнего микроконтроллера и анализу результатов тестирования модемов в энергосберегающих режимах.**

## Особенности модемов ETRX2

ZigBee-модемы ETRX2 (рис. 1) совмещают преимущества передовой технологии Ember построения беспроводных ячеистых сетей ZigBee с простотой использования и богатой функциональностью, которые обеспечиваются дополнительным встроенным программным обеспечением прикладного уровня компании Telegesis.

Важным преимуществом модемов ETRX2 является то, что заложенная в их основу микросхема EM250 объединяет на одном кристалле приемопередатчик ZigBee и микроконтроллер с низким энергопотреблением. Это обстоятельство позволяет модемам ETRX2 иметь рекордно низкие токи потребления в спящем режиме. Например, при «спящих» микроконтроллере и приемопередатчике, но продолжающем работать внутреннем RC-генераторе ток потребления составляет 1 мкА.

В таблице 1 приведены основные технические характеристики для ZigBee-модемов компании Telegesis. Следует отметить, что модемы ETRX2 имеют достаточно высокую мощность передатчи-

ка 3,2 мВт (5 дБм) и хорошую чувствительность, что обеспечивает дальность связи между узлами сети на открытом пространстве до 300 м. Новые модемы ETRX2-PA имеют дополнительный встроенный усилитель мощности, что позволило увеличить их радиус охвата вне помещения до 800 м.

Ядром встроенного программного обеспечения модемов ETRX2 является стек EmberZNET, который обеспечивает возможность построения полноценной ячеистой сети больших размеров с ретрансляцией, автоматической организацией, самовосстановлением и защитой данных, а также с возможностью реализации батарейных и мобильных узлов.

Встроенное программное обеспечение прикладного уровня для модемов ETRX2 уже написано инженерами Telegesis и изначально загружено в каждый модем.

Управление работой модемов ETRX2 организовано при помощи программирования конфигурационных регистров, доступ к которым осуществляется по радиоканалу или по проводному последовательному каналу путем набора несложных, но хорошо продуманных AT-команд, которые подробно рассматривались ранее [1].

Кроме системы AT-команд, инженеры Telegesis предусмотрели набор типовых сценариев работы узла беспроводной сети, которыми разработчик беспроводной системы может пользоваться как готовыми подпрограммами. Эту особенность модемов ETRX2 разработчики Telegesis называют встроенной функциональностью (Built-In Functionality).

Т а б л и ц а 1. Основные технические характеристики для ZigBee-модемов компании Telegesis

Наименование модема	Элементная база	Характеристики радиоканала		Аппаратные ресурсы			Ток потребления в энергосберегающем режиме, мкА	Температурный диапазон, °С
		Макс. мощность передатчика, дБм	Чувствительность приемника, дБм	Количество цифровых выводов/функциональность	Аналоговые входы (кол-во/разрешение, разрядов)	Последовательные каналы/таймеры		
ETRX1	EM2420 + ATMEGA128	0	-94	8 / PWM, IRQ0, IRQ1	2/10	UART/ 8 User Timer	15	-40...+85
ETRX2, ETRX2USB, ETRX2CF	EM250	5	-97	12/ PWM, IRQ0, IRQ1	2/12	UART/ 8 User Timer	1 - при работающем RC-генераторе	-40...+85
ETRX2-PA	EM250 + усилитель	20	-97	12/ PWM, IRQ0, IRQ1, Совместим по выводам с ETRX2	2/12	UART/ 8 User Timer	2	-40...+85



Рис. 1. ZigBee-модемы ETRX2, ETRX2USB, ETRXnCF

Встроенная функциональность модемов ETRX2 является еще одним их преимуществом, так как позволяет использовать их без внешнего микроконтроллера, что значительно облегчает работу с ними.

### Организация работы модема ETRX2 без внешнего микроконтроллера

Узел ZigBee, построенный на базе модема ETRX2, может обладать такой удобной сложной функциональностью. Алгоритм работы модема, а также всего узла сети, как законченного устройства, может задаваться внешним (по отношению к модему ETRX2) микроконтроллером. Однако в большинстве реальных случаев алгоритм работы беспроводного узла можно определить следующим образом: модем выполняет одну или несколько стандартных задач при наступлении какого-либо из стандартных событий.

В документации Telegesis [2] подробно описано около пятидесяти типовых сценариев, которые может выполнять модем, и десять стандартных событий, которые могут вызывать выполнение этих стандартных сценариев.

Событием, инициирующим выполнение какого-либо стандартного сценария, может служить срабатывание одного из восьми пользовательских таймеров модема ETRX2, перепад сигнала на одном из входов прерывания IRQ0/1 или поступление байта по последовательному каналу. Каждому пользовательскому таймеру и каждому входу прерывания сопоставлен конфигурационный регистр, в который предварительно записывается код сценария работы модема после прерывания.

В таблице 2 представлен краткий перечень основных групп типовых сценариев.

Таким образом, модем с заданным интервалом времени или по внешнему сигналу может выполнять передачу отсчетов со своих цифровых и аналоговых входов на центральный узел сбора

Таблица 2. Перечень основных групп типовых сценариев

Код	Описание сценария работы модема
0000	С данным таймером или прерыванием не связано никаких операций
0001 - 0008	Изменение режима энергопотребления
0010 - 0011	Запрос к родительскому узлу о наличии в его буфере сообщений для «проснувшегося» дочернего узла
0012-0013	Представление центрального узла (Sink) сбора данных. (широковещательная рассылка)
0014	Проверить, имеются ли в сети другие узлы. Если нет, то покинуть сеть.
0015	Если модем не является частью сети, то выполнить сканирование, определить какие существуют сети и присоединиться к подходящей сети.
0016	Разрешить присоединение к сети других узлов на 60 секунд.
002x, 003x, 004x, 8xxx, 9xxx, Axxx, Bxxx	Изменение состояния цифровых выводов модема
0100-0113	Посылка отсчетов с цифровых и аналоговых входов или данных из внутренних регистров модема на центральный узел сбора данных (Sink). Возможно датирование отсчетов.
0200, 0201	Отображение на внешних выводах, управляющих светодиодами, статуса модема (присоединен/ не присоединен к сети) и ошибочных состояний.
2000, 400x,-405x	Операции с таймерами: запуск, остановка, пересылка состояния таймера а также текущих отсчетов с цифровых и аналоговых входов на центральный узел сбора данных беспроводной сети.
2001	Пересылка указанного количества байт из последовательного канала на центральный узел сбора данных
3000- 3003	Выполнение AT-команд, предварительно заданных во внутренних регистрах модема

данных сети, датировать эти отсчеты, обновлять состояние своих выводов в соответствии с поступившей по радиоканалу информацией, передавать по радиоканалу данные, поступающие из проводного последовательного канала. Модем может измерять длительность поступающих входных сигналов и посылать результаты измерения на центральный узел сбора данных сети. Наконец, модем может выполнять операции по коррекции своих часов и отображать при помощи внешних светодиодов свое состояние. Описанная встроенная функциональность позволяет во многих случаях построить узел беспроводной сети без использования дополнительного внешнего микроконтроллера.

Также встроенная функциональность ZigBee-модемов ETRX2 полезна, если они используются для оснащения ранее разработанных приборов с последовательным выходом с целью их интеграции в беспроводную сеть. При этом зачастую нет возможности изменять программное обеспечение модернизируемых устройств. В этом случае задание начальных конфигурационных команд для модема ETRX2 можно выполнить при помощи заложенной в него встроенной функциональности.

Встроенная функциональность модемов ETRX2 имеет большое значение и для реализации устройств с батарейным питанием, так как позволяет без дополнительных команд от внешнего микроконтроллера организовать циклическое пробуждение модемов, выполнение заданных функций и переход в режим пониженного энергопотребления.

Таблица 3. Режимы энергопотребления

Режим	FFD, COO			MED, SED, no PAN		
	МК	Радио	Таймеры	МК	Радио	Таймеры
0	Работает	Работает	Определяется пользователем	Работает	«Спит»	Определяется пользователем
1	Холостой ход	Работает	Определяется пользователем	Холостой ход	«Спит»	Определяется пользователем
2	«Спит»	«Спит»	Определяется пользователем	«Спит»	«Спит»	Определяется пользователем
3	«Спит»	«Спит»	Выключены	«Спит»	«Спит»	Выключены

### Использование модемов ETRX2 в энергосберегающих режимах

Модемы ETRX2 построены на базе кристалла EM250, который содержит приемопередатчик ZigBee и 16-разрядный микроконтроллер с пониженным энергопотреблением в «спящем» режиме.

Стремясь максимально использовать преимущества базового кристалла, разработчики Telegesis предусмотрели для модемов ETRX2 четыре режима энергопотребления, которые представлены в таблице 3.

Текущий режим энергопотребления модема задается путем записи номера режима в энергозависимый регистр S29, доступный для чтения и записи по радиоканалу и проводному последовательному каналу. После перезаписи содержимого этого регистра режим энергопотребления модема меняется немедленно. Для управления режимом энергопотребления модем ETRX2 имеет также энергонезависимый регистр S2A, содержимое которого переписывается в регистр S29 каждый раз после сброса. Кроме того, изменение режима энергопотребления возможно при наступлении одного из стандартных событий: сброса процессора, внешнего прерывания, срабатывания таймера или поступления байта по последовательному каналу.

Очень внимательно нужно относиться к использованию режима 3, так как после перехода в этот режим внутренние регистры модема становятся недоступными ни по радиоканалу, ни по проводному каналу, ни по прерыванию от таймера. Вый-



ти из этого режима можно только путем сброса модема или при помощи внешнего прерывания, но только при условии, если заранее в соответствующих регистрах было определено, что в ответ на эти события модем должен «проснуться».

Напомним, что в сети ZigBee могут присутствовать следующие типы устройств: координатор (Coordinator — COO), маршрутизатор (Full Function Device — FFD), конечное засыпающее устройство (Sleepy End Device — SED), мобильное конечное устройство (Mobile End Device — MED). Спецификация ZigBee предполагает, что координатор и маршрутизаторы, которые осуществляют ретрансляцию сообщений в сети, не могут переходить в «спящий» режим, тогда, как конечные устройства могут «засыпать».

При этом если в сети передается сообщение на «спящий» конечный узел, то оно сохраняется в буфере родительского маршрутизатора. Следуя этой логике, координатор и маршрутизаторы никогда не должны переходить в режимы энергопотребления 2 и 3.

Однако инженеры Telegesis сохранили эту возможность. Поэтому разработчик беспроводной системы на базе модемов ETRX2 на уровне своего приложения может синхронно переводить все узлы сети, в том числе и маршрутизаторы, в «спящий» режим.

Если нет необходимости использования энергосберегающих режимов, то маршрутизаторы всегда работают в нулевом режиме и потребляют ток 35,5 мА.

Более сложной задачей является оценка энергопотребления конечных устройств, которые даже в нулевом режиме энергопотребления удерживают приемопередатчик в выключенном состоянии. Ток потребления при этом составляет 9 мА. Конечное устройство включает приемопередатчик только на время приема и передачи сообщений, а также во время сканирования эфира. В эти моменты ток потребления возрастает до 36 мА. Гордостью Ember и Telegesis является малый ток энергопотребления всего модема в «спящем» режиме 2, когда продолжает работать таймер, предназначенный для «пробуждения» модема. Ток потребления в этом режиме зависит от того, какой используется генератор для тактирования дежурного таймера. Если используется внешний часовой кварцевый резонатор, то ток в режиме 2 не превышает 1,5 мкА. При исполь-

зовании внутреннего RC-генератора ток потребления не превышает 1 мкА.

Также для достижения минимального энергопотребления узла специалисты Telegesis дают следующие рекомендации:

- все неиспользуемые входы/выходы модема необходимо сконфигурировать на вывод;
- «подтянуть» входы к линиям питания;
- присоединить вывод SIF\_MOSI через резистор 10 кОм к «земле».

Для оценки среднего энергопотребления конечных устройств и времени жизни их батарей инженеры Telegesis приводят в документации [3] результаты испытаний модемов ETRX2.

Эксперимент заключался в следующем. Модему ETRX2 задавали роль конечного «засыпающего» устройства (SED) и переводили его в режим пониженного энергопотребления 2. Затем циклически модем «просыпался» и выполнял один из стандартных сценариев, а именно осуществлял опрос родительского узла на наличие в его буфере каких-либо сообщений. Ток потребления при этом контролировался путем измерения падения напряжения на внешнем резисторе номиналом 10 Ом. На рис. 2 и 3 показаны осциллограммы данного эксперимента для случаев, когда в буфере родительского узла не было сообщений и когда там было одно сообщение, содержащее кроме служебной информации 30 байт полезных данных и 8 байт адреса. Видно, что весь цикл состоит из нескольких фаз. Сначала модем находится в «глубоком сне». Затем «просыпается» его микроконтроллер (здесь у осциллограммы меняется масштаб), который готовится к тому, чтобы послать сообщение. Затем модем посылает родительскому узлу запрос и сразу снова выключает приемопередатчик. Родительский узел некоторое время обрабатывает запрос и затем посылает свой ответ. Модем заблаговременно включает приемник для получения ответа. В случае получения сообщения некоторое время затрачивается на его обработку, и затем модем снова переходит в режим сна. Длительности и токи потребления для каждой фазы представлены в таблице 4.

Понятно, что средний ток потребления модема зависит от интервала времени между опросами. В таблице 5 приведены значения среднего тока потребления в зависимости от интервала между опросами для двух вариантов эксперимента.

Таблица 4. Длительности и токи потребления

Режим	Ток потребления	Время	
		нет сообщений	одно сообщение
Сон	1 мкА	?	?
Пробуждение МК	9 мА	4,6 мсек	4,6 мсек
Опрос родителя	36 мА	600 мксек	600 мксек
Ожидание	9 мА	4 мсек	4 мсек
Прием ответа	36 мА	4 мсек	32 мсек
Обработка ответа	9 мА	–	20 мсек
Сон	1 мкА	?	?

Таблица 5. Значения среднего тока потребления

Интервал опроса	Средний ток энергопотребления при отсутствии сообщения, мА	Средний ток потребления, при наличии сообщения, мА
0,5 с	0,47	2,55
1 с	0,24	1,35
2 с	0,12	0,70
4 с	0,06	0,35
8 с	0,03	0,18
1 мин	0,005	0,025

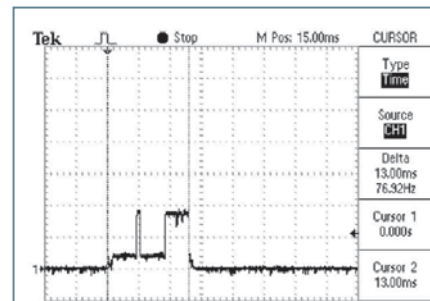


Рис. 2. В буфере родительского узла на момент опроса нет сообщений

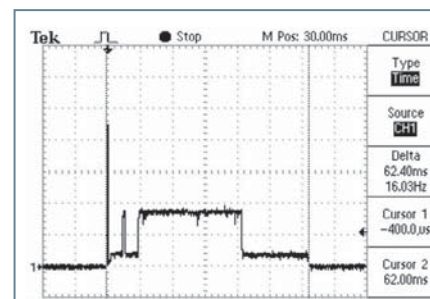


Рис. 3. В буфере родительского узла имеется одно сообщение

Данные результаты показывают, что устройство ZigBee, построенное на модемах ETRX2, большую часть времени находящееся в режиме энергопотребления 2 и просыпающееся один раз в минуту для передачи или получения небольшого сообщения, может работать без смены батареек несколько лет.

Аналогичные эксперименты для режима 3 приводят к похожим результатам за исключением того, что в «спящем» режиме удается экономить дополнительно 0,5 мкА за счет отключения таймера.

Следует отметить, что описанные эксперименты проводились в сети с незначительным трафиком. При расчетах энергопотребления в реальной системе необходимо учитывать, что при увеличении количества узлов в сети энергопотребление каждого узла может возрасти, так как потребуются выполнять дополнительные операции, связанные с обработкой коллизий.

В заключение хочется еще раз подчеркнуть, что модемы ETRX2 обладают всеми преимуществами технологии Ember, то есть позволяют строить полноценные беспроводные сети с малым энергопотреблением. При этом они имеют логичную и несложную для освоения систему AT-команд, которая дает возможность реализовать большинство стандартных алгоритмов работы беспроводного узла. С модемами ETRX2 можно построить простейшую ZigBee-систему за несколько дней без каких-либо затрат на отладочные средства. Б

## Литература

1. ZigBee-модемы ETRX компании Telegesis // Беспроводные технологии. 2006. № 2.
2. ETRX1 and ETRX2 Wireless Mesh Networking Modules. AT-Command Dictionary. Rev.2.09. Telegesis.
3. ETRX2 Wireless Mesh Networking Module. Application Note — Power Consumption.
4. [www.efo.ru/cgi-bin/go?2509](http://www.efo.ru/cgi-bin/go?2509).