

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВИБРОМОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ZIGBEE

А.Б. Лысак

В статье рассматриваются основные аспекты проектирования и разработки беспроводной системы телеметрии. Приводится обзор программно-аппаратных решений от различных производителей. Описывается общая структура системы и интерфейсы взаимодействия её отдельных частей. Приводятся общие алгоритмы работы узлов системы.

Введение

Системы телеметрии представляют собой программно-аппаратные комплексы для удалённого сбора и передачи информации с целью последующей обработки. Такие системы начали применяться ещё в девятнадцатом столетии, однако основы построения подобных систем остаются неизменными и сегодня. Базовыми частями являются датчики, которые получают данные и преобразуют их в форму, пригодную для передачи, каналы связи, по которым эта передача происходит, и точки сбора, в которых приходящие потоки информации приобретают вид, удобный для представления пользователю или хранения.

В настоящее время системы телеметрии нашли применение во множестве областей. Важную роль они играют в космической отрасли, медицине, сельском хозяйстве, энергетике и множестве других сфер. Система, рассматриваемая в данной статье, предназначена для сбора показателей вибрации с механических агрегатов, таких как промышленные насосы и станки. На основе этих показателей специализированными системами диагностики затем делаются выводы о нарушении работоспособности оборудования, степени изношенности его отдельных частей и необходимости ремонта. Однако изложенное в данной статье с небольшими исключениями или дополнениями может быть применено и к другим телеметрическим системам.

Наиболее значимым вопросом в системах телеметрии является способ передачи собранной информации до места назначения. По этому параметру все подобные системы можно разделить на два больших класса:

- проводные;
- беспроводные.

До недавнего времени подавляющее большинство систем телеметрии использовало проводные каналы связи. Основными причинами их преобладания являлись более высокая надёжность и значительно меньшая стоимость. Однако в настоящее время динамично развивающиеся беспроводные технологии становятся основой все большего числа систем передачи информации. К их достоинствам можно отнести:

- возможность использования в местах, где прокладка проводов невозможна или очень затратна;
- оперативность при развёртывании;
- удобство установки и обслуживания;
- специфические особенности, зависящие от конкретной реализации.

В целом, можно говорить о том, что разработка и применение беспроводных систем телеметрии является в настоящее время более перспективным направлением.

Целью работы, которой посвящена данная статья, была комплексная разработка системы телеметрии на основе подходящей беспроводной технологии.

Для достижения поставленной цели требовалось решение следующих задач:

- 1) выбор наиболее подходящей беспроводной технологии;
- 2) изучение существующей программной и аппаратной базы для построения таких систем;
- 3) проектирование общей структуры системы и её отдельных частей;
- 4) разработка алгоритмов и создание программ для узлов системы.

1. Обоснование выбора технологии ZigBee

Поскольку на практике число датчиков в телеметрической системе может быть достаточно велико, беспроводная технология, их объединяющая, должна быть сетевой. Принимая во внимание недостатки таких топологий сети, как «звезда» и «дерево», можно заключить, что наиболее предпочтительным будет использование в системе телеметрии беспроводной сетевой технологии с поддержкой ячеистой топологии, позволяющей использовать запасные маршруты в случае выхода из строя основного.

Поскольку наиболее обоснованным является использование беспроводных телеметрических сетей там, где прокладка проводных каналов связи затруднена или невозможна, то подача электропитания к узлам по проводным линиям становится проблематичной. Отсюда следует вывод о необходимости использования питания от аккумуляторных батарей. Как следствие, важным становится вопрос об энергопотреблении узлов, а в контексте рассмотрения беспроводной технологии это, в первую очередь, мощность передатчика. С другой стороны,

необходимо, чтобы дальность передачи при этом оставалась на приемлемом уровне. Несмотря на то, что возможность ретрансляции отчасти решает эту проблему, соблюдение баланса между дальностью связи и мощностью передатчика является очень важным.

При построении телеметрических систем, в отличие от сетей передачи мультимедийного трафика, не предъявляются высокие требования к пропускной способности. При этом задержки при передаче сообщений для большинства подобных систем весьма нежелательны, и минимальная пропускная способность должна гарантированно обеспечиваться.

Последним важным требованием к беспроводной технологии для использования в системе телеметрии является низкая цена приёмопередатчика.

Исходя из вышеназванных требований оптимальным для связи узлов телеметрической системы между собой будет применение одной из технологий беспроводных персональных сетей (PAN).

Всем вышеперечисленным критериям удовлетворяет специально созданная для подобных задач технология ZigBee [4], базирующаяся на стандарте IEEE 802.15.4. Многоуровневая иерархическая модель стека протоколов ZigBee представлена на рисунке 1.

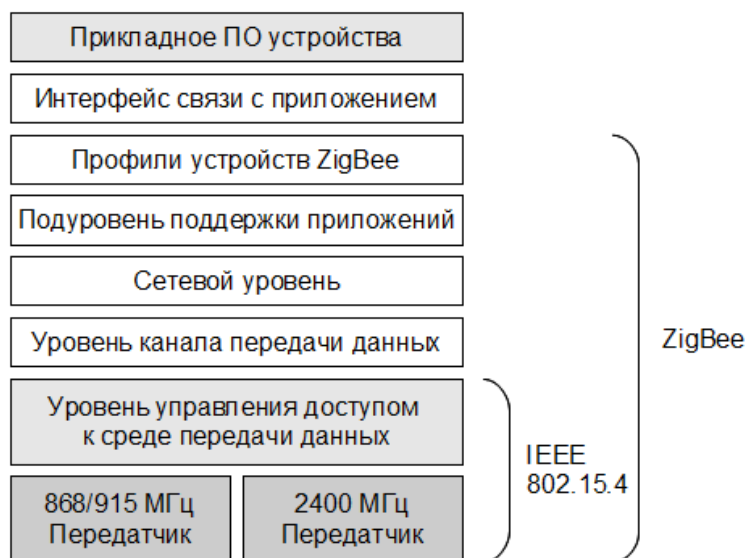


Рис. 1. Многоуровневая модель стека протоколов ZigBee

Нижние два уровня описываются в спецификации IEEE 802.15.4. Они определяют физические параметры приёмопередатчика, структуру радиочастотной посылки, число адресуемых устройств, механизмы проверки и подтверждения целостности принятых данных, процедуры оценки качества канала связи и алгоритмы предотвращения коллизий.

Верхние уровни описываются в документах ZigBee Alliance. Их основными функциями являются маршрутизация и шифрование. Различные профили

ZigBee обеспечивают интеграцию с пользовательскими приложениями [7], описывая формат сообщений и передаваемых данных. Однако поскольку стандартного профиля для интеграции с системами вибромониторинга не существует, необходимо реализовать собственный высокоуровневый протокол обмена сообщениями.

2. Проектирование общей структуры системы

Как уже упоминалось выше, основными частями системы телеметрии являются:

- датчики, преобразующие контролируемые параметры (в данном случае вибрацию) в сигнал, удобный для измерения, передачи и хранения;
- канал связи, по которому будет осуществляться передача сигнала с датчиков к месту обработки или хранения;
- приёмники и передатчики, пригодные для работы с данным каналом связи.

В дальнейшем в данной работе для обозначения устройства, в состав которого входит датчик, будет использоваться термин «конечное устройство». Устройство на другом конце канала связи, куда стекается вся информация, будет обозначаться термином «концентратор».

В большинстве случаев строить целую систему ради сбора информации с одного датчика нецелесообразно. Поэтому число конечных устройств в таких системах значительно больше числа концентраторов, который вполне может существовать в единственном числе при условии достаточной производительности. При таком подходе очевидно преимущество беспроводного канала связи, выражающееся в отсутствии необходимости прокладки дополнительных линий связи для каждого нового конечного устройства, появляющегося в системе.

Часто в системе требуется возможность передачи информации не только от конечных устройств концентратору, но и в обратном направлении. Таким образом становится возможным управление конечными устройствами путём отправки им команд о начале и прекращении измерений, изменении интенсивности и прочем. Выбранная технология связи ZigBee и аппаратные решения, использующие этот стандарт, поддерживают двунаправленную передачу данных, необходимо лишь программно реализовать данную возможность в разрабатываемой системе.

Системы вибромониторинга используются в промышленности для контроля состояния различных механических агрегатов. Самый простой способ виброконтроля — измерение среднеквадратичного значения виброскорости и сравнение его с нормами. Наиболее типичным и распространённым является вычисление значения виброскорости в полосе 10–1000Гц [1, 2].

В качестве датчика в такой системе должен использоваться акселерометр. Значения виброускорения, полученные с датчика, преобразовываются в виброскорость и усредняются на некотором промежутке. Это значит, что помимо

сенсора и приёмопередатчика в состав конечного устройства должен входить микроконтроллер, способный выполнять требуемые математические преобразования.

Конструктивно все элементы схемы конечного устройства, кроме чувствительного элемента, а именно акселерометра, предполагается размещать на одной небольшой печатной плате. Сам датчик предполагается подключать к конечному устройству по проводному соединению. Первой причиной такого решения является гибкость, заключающаяся в возможности использования датчика другого типа с тем же конечным устройством. Второй — негативное влияние вибрации на электронные компоненты устройства и, в особенности, на аккумуляторную батарею.

Концентратор так же, как и конечное устройство, должен базироваться на модуле приёмопередатчика стандарта ZigBee. Так как работа разрабатываемой системы предполагается только в совокупности со специализированной ЭВМ, на которую будут передаваться данные для хранения и обработки информации, отсутствует необходимость в применении микроконтроллеров для обработки получаемых данных или дополнительных модулей памяти в составе концентратора. Обмен данными устройства с целевой ЭВМ предполагается по стандартному последовательному соединению по причине его простоты и распространённости.

Для ЭВМ необходимо написать тестовую программу, позволяющую демонстрировать получаемые данные в приемлемом для пользователя виде и способную осуществлять обмен командами с концентратором.

Учитывая вышесказанное, структурная схема разрабатываемой системы будет выглядеть так, как показано на рисунке 2.

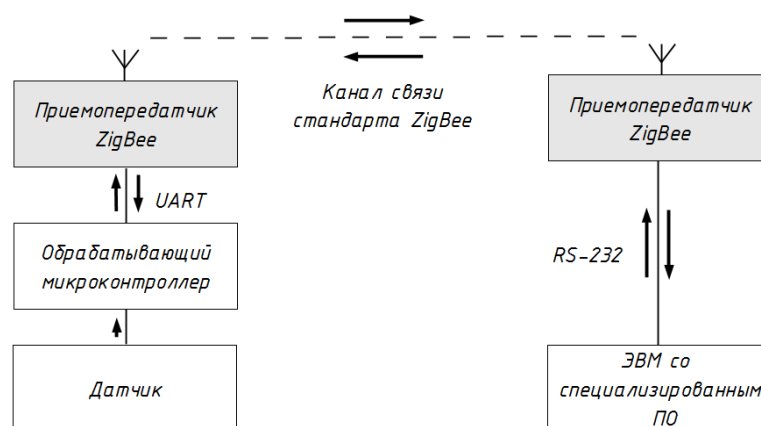


Рис. 2. Структурная схема разрабатываемой системы

Следующим шагом разработки является выбор оптимальной аппаратной базы и создание на основе данной структурной схемы электрических принципиальных схем устройств, входящих в состав системы телеметрии.

3. Программно-аппаратная база

В настоящее время производством микрочипов приёмопередатчиков стандарта ZigBee занимается множество компаний. Наиболее известными из них являются Jennic, Freescale, Ember и Texas Instruments. Большинство решений представляет собой системы на кристалле, включающие в себя модуль беспроводного приёмопередатчика, микропроцессорное ядро и определённый набор периферии. Данный подход очень удобен при разработке малогабаритных устройств с низким энергопотреблением, и, соответственно, был сделан вывод о целесообразности использования подобного решения.

Обзор чипов различных производителей показал, что они имеют следующие примерно одинаковые характеристики [3]:

- частота микропроцессора с RISC-архитектурой составляет 10–20 МГц;
- объем ОЗУ и ПЗУ варьируется в диапазоне от сотни до нескольких сотен килобайт;
- потребление тока от 15 до 40 мА;
- стоимость от 4 до 10 долларов за штуку.

Как уже было сказано выше, для подобных систем очень важное значение также имеет стоимость компонентов. Исходя из этого было решено обратить внимание на недорогую серию микроконтроллеров EM250 от компании Ember. Система на кристалле Ember EM250 включает в себя приёмопередатчик, совместимый со стандартом IEEE 802.15.4, и шестнадцатиразрядный микропроцессор с малораспространённой архитектурой XAP2b. Он имеет 128 кБ встроенной флэш памяти для записи программ и 5 кБ ОЗУ [6].

Для того чтобы обеспечить соответствие строгим временным требованиям, предъявляемым стандартом IEEE 802.15.4, часть функций уровня управления доступом к среде передачи данных интегрировано в аппаратную часть микроконтроллера. Это включает в себя автоматическую генерацию сообщений о подтверждении доставки пакета, вычисление случайного времени задержки перед началом передачи для избежания коллизий, выбор свободного канала для передачи данных.

Микроконтроллер поддерживает обмен данными по интерфейсам SPI, I2C и UART. В распоряжении разработчика также находится семнадцать программируемых линий ввода/вывода общего назначения. Для программирования и отладки используется синхронный последовательный интерфейс SIF, разработанный компанией Cambridge Consultants. Он позволяет внешним устройствам считывать значения регистров микроконтроллера в реальном времени, не оказывая влияния на микропроцессорное ядро XAP2b.

Компания Ember осуществляет продажу систем на кристалле EM250 вместе с ZigBee - совместимым стекком EmberZNet. Стек написан на ассемблере XAP2b, что существенно затрудняет его изучение и модификацию. Однако разработчику предоставляется удобный интерфейс прикладного программирования

с множеством готовых функций для использования при создании собственного приложения.

При вышеназванных особенностях цена EM250 с включённым в комплект поставки стекком EmberZNet составляет около 3–4 долларов, что в настоящее время, несмотря на наличие более мощных ZigBee-микроконтроллеров как от Ember, так и от других производителей, делает его оптимальным решением для задач, не требующих серьёзных ресурсов.

Встроенный в EM250 АЦП не удовлетворяет современным требованиям к точности преобразования виброускорения, в связи с этим было принято решение об использовании в схеме конечного устройства дополнительного обрабатывающего микроконтроллера с низким энергопотреблением и АЦП высокой точности.

Логичным выбором является использование микроконтроллера AduC7061 от компании Analog Devices. Данный микроконтроллер построен на базе микропроцессорного ядра с архитектурой ARM7-TDMI, способного работать на частоте до 10 МГц. Микроконтроллер имеет двадцатичетырёхразрядный АЦП с пятью каналами и частотой преобразования до 8000 кГц. Потребление тока в самом производительном режиме составляет около 10 мА, возможна работа на пониженной до 1 МГц частоте с потреблением тока 2,6 мА [5]. Интерфейсы для обмена данными включают в себя UART, SPI и I2C, все они также поддерживаются EM250. Для программирования и отладки используется JTAG интерфейс.

В качестве датчика было решено использовать акселерометр ADXL001, не требующий калибровки.

После того как на основе данных компонентов были созданы электрические принципиальные схемы конечного устройства и концентратора, необходимо было осуществить разработку и реализацию алгоритмов работы устройств. В качестве среды разработки для микроконтроллеров EM250 использовалась xIDE, предоставляемая компанией Ember, для ADuC7061 — IAR Embedded Workbench for ARM. Для разработки использовался язык C.

4. Разработка программного обеспечения

4.1. Программное обеспечение приёмопередатчиков ZigBee

Программное обеспечение для микроконтроллера Ember EM250 должно позволять концентратору устанавливать связь с несколькими конечными устройствами и обмениваться с ними информацией. Концентратор должен передавать конечным устройствам команды управления, конечные устройства должны посылать концентратору данные, полученные с датчиков, помимо этого все устройства передают друг другу вспомогательные сообщения для поддержания работоспособности сети.

После установления связи между конечным устройством и концентратором, то есть их взаимного добавления в адресные таблицы друг друга, становится возможной передача управляющих команд. Основных команд предполагается

всего три: запрос проверки работоспособности узла и начало/прекращение сбора данных. В случае, если узел, с которому была отдана команда о начале сбора данных не отвечает в течение определённого промежутка времени, он удаляется из адресной таблицы концентратора, и ему высылаётся сообщение о выходе из сети.

Основные сообщения, отсылаемые устройствами, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Краткое описание сообщений

Идентификатор	Адресат	Описание
SINK_REJECT	Конечное устройство	Получены данные от неизвестного устройства
SINK_REBOOT	Конечное устройство	Перезагрузка и реорганизация сети
JOIN_ENABLE	Конечное устройство	Необходимость активации режима обнаружения
SELF_TEST_REQUEST	Конечное устройство	Запрос информации о работоспособности узла
GATHERING_START	Конечное устройство	Сообщение о необходимости начать сбор данных
GATHERING_STOP	Конечное устройство	Сообщение о необходимости закончить сбор данных
DATA	Концентратор	Сообщение с данными
SELF_TEST_RESPONSE	Концентратор	Информация о работоспособности узла
SINK_ADVERTISE	Конечное устройство	Анонс концентратора как сборщика данных остальным узлам системы
SENSOR_SELECT_SINK	Концентратор	Сообщение конечного устройства о выборе сборщика данных
SINK_READY	Конечное устройство	Подтверждение концентратора о включении узла в свою адресную таблицу

Алгоритмы управляющих программ микроконтроллеров Ember EM250 в составе концентратора и в составе конечного устройства схожи. Первоначально происходит инициализация периферии, беспроводных и проводных интерфейсов. Затем с помощью функций стека EmberZNet микроконтроллер в составе концентратора организует беспроводную сеть и начинает широковещательную рассылку, а микроконтроллер в составе конечного устройства пытается присоединиться к существующей беспроводной сети. После установления связи управление передаётся в основной цикл, в котором происходит приём и обработка сообщений, поступивших по проводному и беспроводному интерфейсам.

4.2. Программное обеспечение обрабатывающего микроконтроллера

Программное обеспечение микроконтроллера ADuC7061 должно позволять проводить проверку работоспособности датчика, подключённого к устройству, снимать и оцифровывать данные, на основе полученных данных вычислять среднеквадратичное значение виброскорости и передавать получившийся результат по интерфейсу UART.

Диапазон частот, в котором необходимо считать среднеквадратичное значение виброскорости, составляет от 10 Гц до 1 кГц. В соответствии с теоремой Котельникова, частота выборок должна составлять не менее 2 кГц. Исходя из возможностей АЦП микроконтроллера ADuC7061 было решено установить частоту преобразований в 2666 Гц. Так как память микроконтроллера ограничена 4 кБ, было решено ограничиться числом отсчётов равным 512.

После снятия требуемого числа отсчётов программа должна получить спектр, используя быстрое преобразование Фурье. В результате получается массив амплитуд гармоник с шагом около 5,2 Гц. Поскольку данные на этом этапе имеют размерность напряжения, необходимо преобразовать их последовательно к виброускорению, домножив на коэффициенты из документации к датчику, а затем к виброскорости, проинтегрировав. После вычисления среднеквадратичного значения виброскорости, оно передаётся по интерфейсу UART и процесс повторяется до получения команды о прекращении сбора данных.

В случае получения команды проверки датчика производится единичный замер на входе АЦП, после чего на линию ввода/вывода общего назначения, к которой должен быть подключён тест-вывод датчика, подаётся напряжение. Далее производится ещё один единичный замер, и, если разница между ними превышает пороговое значение, указанное в документации датчика, он считается работоспособным, о чем отправляется команда по последовательному интерфейсу. Соответствующие команды отправляются в случае, если датчик оказался неработоспособным или провести тестирование не удалось в силу активного режима сбора данных.

4.3. Программное обеспечение ЭВМ

Программа для ЭВМ должна обеспечивать соединение с концентратором по последовательному порту и осуществлять двунаправленный обмен командами и данными. Кроме того, она должна обладать удобным интерфейсом пользователя, что и послужило одной из причин выбора инструментария Qt. Библиотека Qt не имеет встроенного инструмента для работы с последовательным портом, по этой причине пришлось воспользоваться сторонней библиотекой QserialDevice, распространяемой по свободной лицензии GPLv2.

Визуально программа представляет собой окно, в котором отображается текущий список датчиков, лог событий, элементы управления, позволяющие устанавливать и разрывать связь с выбранным последовательным портом, а также осуществлять основные функции управления беспроводной сетью. Помимо этого, информация о работоспособности и текущем значении виброскорости с

каждого датчика отображается в отдельном окне.

Заключение

В ходе осуществления проекта, которому посвящена данная статья, была проделана работа по проектированию, разработке и макетированию программно-аппаратной системы. Был проведён анализ современных технологий и электронных компонентов в сфере беспроводной передачи данных. Результаты, полученные в ходе данного анализа, позволили определить аппаратную базу, на основе которой были разработаны электрическая принципиальная схемы будущих устройств.

Было разработано и отлажено программное обеспечение для следующих узлов системы:

- обрабатывающий микроконтроллер с архитектурой ARM;
- микроконтроллеры приёмопередатчиков с архитектурой XAP2b;
- ЭВМ с операционной системой семейства Windows.

Результатом работы стало создание макетного образца беспроводной системы вибромониторинга.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 25364-97. Агрегаты паротурбинные стационарные. Нормы вибрации опор валопроводов и общие требования к проведению измерений.
2. ГОСТ 30576-98. Насосы центробежные питательные тепловых электростанций. Нормы вибрации и общие требования к проведению измерений.
3. КОМПЭЛ. Электронные компоненты и сервисы. URL: <http://catalog.compel.ru> (дата обращения: 29.08.2011).
4. Ю. Незнамов, В. Козаченко Перспективы использования беспроводных ZigBee - интерфейсов в электроприводе // Электронные компоненты. 2008. N. 2. С. 17-24.
5. Analog Devices ADuC7060/ADuC7061/ADuC7062 Datasheet. URL: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADuC7060_7061.pdf (дата обращения: 29.08.2011).
6. EM250 System-on-crystal. URL: http://ember.com/products_zigbee_chips_e250.html (дата обращения: 29.08.2011).
7. ZigBee Alliance. URL: <http://www.zigbee.org> (дата обращения: 29.08.2011).