

А. П. Мощевикин
С. А. Кипрушкин
Е. Д. Жиганов

БЕСПРОВОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
СИСТЕМАХ



Министерство образования и науки РФ
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 681.324
ББК 32.973.202
М876

А. П. Мощевикин
С. А. Кипрушкин
Е. Д. Жиганов

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Петрозаводского государственного университета

**БЕСПРОВОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
СИСТЕМАХ**

Рецензенты:

канд. физ.-мат. наук, доцент
канд. техн. наук, доцент

Н. Ю. Ершова
К. Н. Спиридонов

Учебно-методическое пособие

Петрозаводск
Издательство ПетрГУ
2011

ISBN 978-5-8021-1247-2

© Мощевикин А. П., Кипрушкин С. А.,
Жиганов Е. Д., 2011
© Петрозаводский государственный
университет, 2011

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
БЕСПРОВОДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ	6
МЕСТО БЕСПРОВОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СТРУКТУРЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ	6
АРХИТЕКТУРА БЕСПРОВОДНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ	12
МЕТОДЫ ДОСТУПА К СРЕДЕ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ	14
СТАНДАРТ NANONET (IEEE 802.15.4A)	16
Линейно-частотное кодирование	16
ПРИМЕР АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЕТИ ДАТЧИКОВ	19
ПРОБЛЕМЫ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ И СПОСОБЫ ИХ РЕШЕНИЯ	25
РЕГУЛИРОВКА МОЩНОСТИ ПЕРЕДАТЧИКА	25
ИСТОЩЕНИЕ БАТАРЕЙ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ РЕТРАНСЛЯТОРОВ	26
ПРОБЛЕМА СКРЫТОГО УЗЛА	27
РАДИОМОДУЛЬ СТАНДАРТА NANONET С ИНТЕРФЕЙСОМ USB	29
Принцип работы радиомодуля	31
ПРОГРАММИРОВАНИЕ РАДИОМОДУЛЯ USB-NANONET	32
РАСПОЛОЖЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ НА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ	33
ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ	35
ЗАДАНИЯ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ ПО КУРСУ "БЕСПРОВОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"	39
ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ	39

Введение

Усложнение технических устройств приводит к необходимости в процессе их разработки, производства и эксплуатации контролировать и измерять сотни, тысячи, иногда десятки тысяч параметров и характеристик. Для управления такими сложными объектами используют автоматизированные системы.

Рассматривая историю развития автоматизированных информационно-измерительных систем, следует отметить, что **первоначально** многие из них создавались как **автоматизированные системы для контроля параметров и включения/выключения управляющих механизмов**. Функции измерения контролируемых величин были упрощены до попадания в требуемый диапазон, не требовалось достижения высокой точности измерений, а логика управления сводилась к операциям включения/выключения исполнительных устройств.

Следующим этапом развития стало использование в автоматизированных системах достаточно точных измерительных приборов, позволяющих фиксировать измеряемые величины с требуемой для их физического интерпретирования точностью. Собственно с этого момента они и становятся информационно-измерительными, то есть измеряемые параметры могут не только применяться для принятия оперативных решений по управлению системой, но и накапливаться в базах данных, анализироваться и использоваться для дальнейшего совершенствования работы самой системы или получения информации об объектах, с которыми система взаимодействует.

Отличительной характеристикой данного этапа стало массовое использование стандартизированных интерфейсов и магистрально-модульных систем. Наборы универсальных модулей со стандартными соединениями под управлением компьютерных или микропроцессорных блоков позволили не только достаточно быстро создавать новые системы с требуемыми характеристиками, но и путем перепрограммирования существенно изменять их функциональность на этапе эксплуатации. Безусловно, это обеспечивалось определенной избыточностью в ресурсах у таких систем. Но в случае массового производства однотипных модулей при их использовании в разных по назначению автоматизированных системах экономические потери окупались гибкостью при их эксплуатации.

В настоящее время мы наблюдаем **очередной этап развития, который характеризуется глобализацией автоматизированных информационно-измерительных систем**. Системы становятся распределенными, охватывая огромные территории и функционируя продолжительные временные периоды. При этом обеспечивается связанность системы и централизация управления. Существенным является возможность распределенных систем функционировать при отсутствии прямых механических или электрических связей между частями системы. Какие технологии, методы и способы организации обеспечили качественно новый этап развития? В предлагаемом вашему вниманию пособии раскрыта их часть, относящаяся к организации беспроводной связи. Более подробно изложена теория и представлены практические задания по одной из самых современных и быстроразвивающихся технологий nanoNET.

Беспроводные информационно-измерительные системы

Место беспроводных технологий в структуре автоматизированных информационно-измерительных систем

Основными функциями автоматизированной информационно-измерительной системы (АИИС) являются измерение характеристик объекта, сбор, обработка и визуализация информации, а также управление объектом или процессом исследований на основе анализа полученных данных. АИИС, соответственно, содержит управляющую, регистрирующую и информационную подсистемы, которые могут быть доступны оператору (см. рис. 1).

Стрелками на рис. 1 показаны направления потоков информации или проводимых воздействий. В некоторых случаях потоки могут быть двунаправленными, например: оператор принимает решение изменить состояние всей системы, при этом ее управляющая компонента проектируется с возможностью извещать человека о выполненных изменениях; или: накопление объема полученных данных приводит к тому,



Рис. 1. Автоматизированная информационно-измерительная система

что оператору достаточно запросить информацию и получить ответ, не запуская цикл измерений.

Современные технологии беспроводной связи постепенно вытесняют проводные способы соединения модулей в единый измерительно-управляющий комплекс как в сфере бытовых приборов, так и для организации доступа к уникальному физическому оборудованию. В качестве среды передачи используется либо оптическое излучение (например, в инфракрасном диапазоне), либо радиосигнал. Так как по сравнению с оптическими излучателями-приемниками антенны, как правило, обладают большей изотропностью, для создания территориально распределенных сетей сбора информации и управления чаще применяются технологии с использованием радиосигналов.

Чаще всего измерение физических параметров объектов ведется с использованием проводных систем (на рис. 1 это действие обозначено стрелкой 3), то же наблюдается и для каналов 2 и 2'. Связано это с тем, что подсистемы регистрации и управления обычно располагаются как можно ближе к объекту, чтобы уменьшить шумовые составляющие сигналов и избежать излишних тепловых потерь при передаче электроэнергией исполнительным механизмам.

Информационные каналы 1, 4 и 5 (а иногда и остальные) могут быть спроектированы с использованием беспроводных технологий. При этом также стоит отметить выгоду использования их именно на направлении 4, поскольку это серьезно облегчает процесс монтажа системы.

Как уже было отмечено, современные АИИС строятся по модульному принципу и носят распределенный характер. Связи 1, 4 и 5 могут быть реализованы с использованием глобальных сетей, часть сегментов в которых ориентирована на беспроводную передачу.

Рассматривая структуру распределенной автоматизированной информационно-измерительной системы, следует выделять несколько уровней, обычно пространственно локализованных.

I уровень – "уровень шаговой доступности", когда все оборудование располагается компактно в одном месте и практически не существует ограничений по использованию технологий для объединения в единую систему. Здесь можно обеспечить сколь угодно большие скорости передачи информации.

В современных системах релейно-контактные схемы управления, собранные на дискретных компонентах (реле, таймерах, счетчиках, элементах жесткой логики), заменены программируемыми логическими контроллерами (ПЛК). Принципиальное отличие ПЛК от релейных схем заключается в том, что в нем все алгоритмы управления реализованы программно. При этом надежность работы схемы не зависит от ее сложности. ПЛК представляют собой микропроцессорные устройства, предназначенные для выполнения алгоритмов управления. Принцип работы ПЛК заключается в сборе и обработке данных по прикладной программе пользователя с выдачей управляющих сигналов на исполнительные устройства. В некоторых случаях ПЛК создаются на базе универсальных компьютеров.

Понятно, что в случае взаимного перемещения частей системы для связи ПЛК с датчиками и исполнительными механизмами имеет смысл использовать беспроводные технологии. Этот класс сетей в литературе называется BAN (Body Area Network) или PAN (Personal Area Network). К ним можно отнести Bluetooth, ZigBee, nanoNET, RFID и другие технологии малого радиуса действия.

Для управления сложными объектами масштаба здания или группы зданий ПЛК обычно объединяют с помощью универсальных локальных вычислительных сетей (ЛВС или Local Area Network – LAN). Это II уровень локализации.

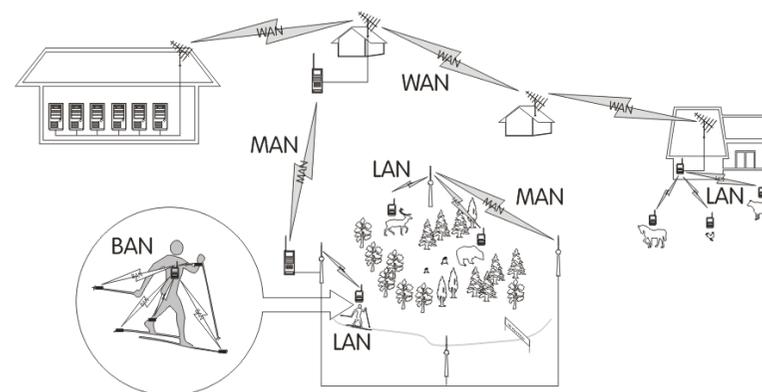


Рис. 2. Использование беспроводных технологий для связи объектов на разных расстояниях

ЛВС – это высоконадежная и высокоскоростная система передачи данных, которая обеспечивает взаимосвязь различных устройств обработки информации и управления равноправным или подчиненным способом, либо комбинацией обоих способов в пределах определенной ограниченной площади. Целью объединения ПЛК в такие сети является размещение их непосредственно в зоне управляемого объекта, а также разделение выполняемых им функций на ряд слабо связанных между собой функций и их распределение между несколькими устройствами. Это позволяет осуществлять так называемое динамическое делегирование функций во время эксплуатации всей системы автоматизации. В результате повышается пропускная способность и живучесть системы управления, увеличивается ее гибкость, а также возникает возможность на этапе эксплуатации системы по мере необходимости наращивать управляюще-вычислительные мощности и возлагать на систему управления дополнительные функции.

Конструктивно локальные вычислительные сети представляют собой каналы различной конфигурации с ветвями и узлами. Узлами таких сетей могут быть и ПЛК, и другие устройства обработки информации, применяющиеся для целей автоматизации (например, персональные компьютеры, устройства ЧПУ, микропроцессорные комплекты, датчики со встроенным интерфейсом). ЛВС создает возможность объединения в единую систему автоматизации таких достаточно разнородных компонентов. Здесь также активно применяются беспроводные технологии связи компонентов автоматизированной системы: WiFi, WiMAX, nanoNET и др.

III уровень локализации охватывает распределенные системы масштаба города – городская вычислительная сеть MAN (Metropolitan Area Network). MAN позволяет автоматизировать сильно распределенные объекты. Примерами могут служить системы контроля, учета и управления потреблением электроэнергии крупными предприятиями или автоматизация торговой деятельности сети магазинов. По сравнению с ЛВС каналы обмена информацией в таких сетях являются значительно более протяженными, а следовательно, менее скоростными и надежными. Это приводит к изменению технологии обмена информацией, когда узлы системы используют не постоянное соединение между собой, а метод обмена сообщениями. И в данных системах активно используются беспроводные технологии: транкинговые сети, WiMAX, GSM/GPRS и их потомки.

IV уровень – глобальная сеть, которая объединяет воедино огромное количество LAN и MAN на большой географической территории (Wide Area Network – WAN). Современное состояние Интернета позволяет организовывать глобальные системы, например для контроля погоды. Основным преимуществом каналов связи через Интернет является минимизация финансовых затрат на создание, поддержку и развитие сети по сравнению с любыми другими способами организации связи. Наиболее характерным примером беспроводных технологий для глобальных линий связи является спутниковый Интернет.

Проблема частотного диапазона является одной из важных для построения беспроводных линий связи. Большой интерес представляют диапазоны частот, выделенные для безлицензионного использования. Государственной комиссией по радиочастотам (ГКРЧ) и аналогичными организациями в других странах зарезервирован диапазон для безлицензионного использования, называемый ISM (Industry, Science, Medicine) диапазон. Спектр частот от 2.4 до 2.4835 ГГц частично доступен во всем мире. Однако законодательство разных стран по-разному регламентирует использование частот и ширины диапазона (см. табл. 1).

Таблица 1

Стандарт	IEEE 802.15.4 ZigBee IEEE 802.15.4a nanoNET	Bluetooth	IEEE 802.11 WiFi
Диапазон частот	2.402–2.480 ГГц (Сев. Америка, 20 каналов, 1000 мВт/МГц)	2.402–2.480 ГГц (Сев. Америка и Европа, 79 каналов)	2.41–2.462 ГГц (Сев. Америка, 12 каналов, 1000 мВт/ МГц)
	2.412–2.472 ГГц (Европа, 15 каналов, 100 мВт/МГц)	2.447–2.473 ГГц (Испания) 2.448–2.482 ГГц (Франция)	2.412–2.472 ГГц (Европа, 13 каналов, 100 мВт/ МГц)
	2.483–2.495 ГГц (Япония, 5 каналов, 10 мВт/МГц)	2.473–2.495 ГГц (Япония)	2.483–2.495 ГГц (Япония, 1 канал, 10 мВт/ МГц)
	2.4–2.4835 ГГц (Россия, 100 мВт)	2.4–2.4835 ГГц (Россия)	2.4–2.4835 ГГц (Россия, 100 мВт)

Таблица 2

Стандарт	802.15.4 ZigBee Ember	802.15.4a nanoNET	WiFi WIZnet	Wireless USB Cypress	Трансивер ATR2406 Atmel	Bluetooth Multi Tech	
Скорость передачи данных, Кбит/с	250	2000	1000 2000 5500 11000	64	1152	1000	
Дальность, на открытом пространстве, макс., м	70	900	200	300	160	100	
Ток	передача, мА	19,7	55–78	600	69,1	57	70
	прием, мА	17,4	40	н.д.	57,7	42	45
	спящий режим, мкА	1	1	–	1	<1	2000
Выходная мощность, макс., мВт	1	8	100	1	6	100	

В диапазоне ISM, в зависимости от желания заказчика, условий "видимости", расстояний, наличия помех, выбор разработчика АИИС может быть остановлен на той или иной стандартизированной технологии передачи данных, например Bluetooth, WiFi, WiMax, ZigBee, nanoNET и др.

В табл. 2 приведены характеристики приемопередатчиков различных производителей, выпускающих чипы для радиосвязи.

По соотношению энергозатрат на передачу одного бита лидером является немецкая фирма Nanotron Technologies GmbH, выпускающая продукцию для сетей nanoNET (трансиверы nanoPAN). Именно этот параметр (затраты электроэнергии на передачу порции информации) является определяющим в выборе технологии при разработке сетей датчиков, большинство из которых питается от батарей или аккумуляторов.

Архитектура беспроводных информационно-измерительных сетей

Если упустить из рассмотрения создание соединений точка – точка и простых одноранговых сетей (один – ко многим), то обычно подразумевается наличие трех типов узлов.

Первый условно называется мастером, в англоязычной литературе часто используется термин "sink" (сток, пункт сбора информации, место, куда стекается информация с датчиков) или "base station" (базовая станция). В каждой сети может быть только один узел-сток. Второй тип узлов – датчик ("sensor"), таких узлов может быть достаточно много (от нескольких единиц до сотен тысяч), их количество зависит от требуемой зоны покрытия, радиуса действия связи, конфигурации и режима работы сети, периода опроса датчиков, специфики решаемой задачи и других факторов. Третий тип узла – ретранслятор ("router", маршрутизатор). Возможно также существование узлов смешанных типов (мастер-датчик и ретранслятор-датчик).

Узлы определенного типа выполняют свою специфическую задачу. Узел-датчик измеряет некоторый физический параметр (температуру, давление, влажность, параметры вибраций различных механизмов, освещенность и т.д.) и передает эту информацию в пакетном режиме узлу-стоку либо напрямую, либо через цепочку ретрансляторов, соединения между которыми формируют остов сети ("backbone"). В задачу ретранслятора входит перенаправление пакетов с данными от источников до узла-стока (возможно, с использованием компрессии или агрегации данных).

При этом, как правило, пункт сбора подключен к компьютеру, на котором может осуществляться обработка данных, требующая значительных вычислительных мощностей, а также их визуализация, накопление и передача через глобальные сети конечным пользователям сети датчиков. В состав узла-датчика входят 4 компонента – источник питания, собственно датчик в связке с преобразователем сигнала в цифровую форму, вычислительный блок (микроконтроллер) и приемопередатчик. Иногда в состав узла-датчика может быть включен модуль определения географических координат (например, GPS), а также специфические модули, например модуль, позволяющий датчику перемещаться в пространстве ("mobilizer").

При проектировании информационно-измерительных систем на основе беспроводных сетей датчиков нужно учитывать ряд их особенностей.

Во-первых, зачастую топология сети и местоположение датчиков не являются детерминированными. Например, датчики могут быть сброшены с самолета. Во-вторых, датчики, маршрутизаторы и пункт сбора могут быть мобильными.

Эти два обстоятельства приводят к требованию наличия механизмов самоконфигурирования (самоорганизации) сети, в частности необходимо, как минимум, находить маршруты от датчиков к пункту сбора в условиях изменения количества узлов, их положений и т.п. Под маршрутом понимается совокупность маршрутизаторов, через которые данные от того или иного датчика приходят на пункт сбора информации.

В-третьих, более остро, по сравнению с проводными сетями, стоит проблема организации доступа к среде передачи: если на узел приходят одновременно два сигнала от двух других узлов (коллизия сигналов), то в большинстве случаев этот узел не сможет принять ни тот, ни другой сигнал. Кроме того, в случае беспроводных сетей возрастает вредоносное влияние помех, проявляющееся в уменьшении вероятности безошибочного приема сигнала. Таким образом, устройства должны самостоятельно определять, когда они имеют право начать передачу.

Наконец, существенное влияние на выбор аппаратуры, алгоритмов маршрутизации и т.п. при разработке беспроводных сетей датчиков оказывает то обстоятельство, что узлы могут быть сильно ограничены в ресурсах, что и имеет место на практике в подавляющем большинстве случаев. Среди этих ресурсов первым по значимости, пожалуй, является запас энергии. Поэтому в аппаратуре сети и алгоритмах ее функционирования должны быть предусмотрены механизмы экономии энергии. Например, можно предусмотреть подпитку от преобразователей световой энергии в электрическую. Также можно, если позволяет решаемая задача, предусмотреть периоды, когда датчики находятся в неактивном состоянии, то есть у них выключены и приемопередатчик, и вычислительное устройство.

Далее, узлы-датчики не могут быть дорогими – в противном случае потеряется экономия на реализации проводной инфраструктуры. Поэтому микроконтроллеры, входящие в состав узла, обладают более чем

скромными вычислительными мощностями. Так, для программного кода доступно порядка нескольких десятков килобайт флэш-памяти, а для данных – порядка 0.5–4 килобайт ОЗУ (имеются в виду микроконтроллеры с так называемой "гарвардской" архитектурой, например семейство AVR от Atmel). Понятно, что такие ограничения по ресурсам не могут не сказываться на функциональных возможностях узлов – следует тщательно отбирать алгоритмы работы узлов и оптимизировать код.

Методы доступа к среде в беспроводных сетях

1. Доступ с разделением по времени (TDMA, Time Division Multiple Access).

При использовании этого способа узлы сети работают на передачу только в отведенное им время, так что коллизии (наложение сигналов разных узлов) исключены. Для осуществления данного алгоритма все узлы оснащены часами и предусмотрены специальные синхропакеты.

2. Доступ с обнаружением несущей (CSMA, Carrier Sensing Multiple Access).

В этом случае узел имеет право работать на передачу только тогда, когда не "слышит" никаких сигналов от других узлов. Определение занятости среды может быть основано либо на текущем значении уровня сигнала, либо на факте обнаружения символов (битов) данных.

На рис. 3 изображена временная схема приема-передачи кадра в режиме CSMA.

После получения трансивером команды начать передачу он должен выдержать фиксированную паузу для проверки среды на незанятость

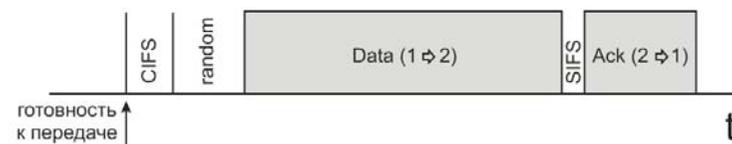


Рис. 3. Метод доступа к среде передачи CSMA

Стандарт nanoNET (IEEE 802.15.4a)

(CIFS, Carrier Sense InterFrame Space), а затем подождать еще некоторое время, определяемое генератором случайных чисел (на рис. 3 обозначено *gandom*, от 0 до 7 временных интервалов для первой попытки отослать кадр). Введение элемента случайности и последовательное увеличение диапазона генерации интервала ожидания для повторных попыток эффективно позволяет избегать коллизий. После окончания передачи информационного кадра (Data) приемная сторона должна через несколько микросекунд (SIFS, Switching InterFrame Space) послать в эфир кадр подтверждения Ack.

Следует отметить, что данный алгоритм не исключает возможность возникновения коллизий, поскольку вероятность одновременного начала передачи сигнала в эфир не равна нулю. Например, в ситуации при одновременной готовности к передаче два узла в сети могут сгенерировать одинаковое число *gandom* и начать передачу почти в один момент.

Технология nanoNET разрабатывается компанией Nanotron Technologies GmbH (<http://www.nanotron.com/>) и позиционируется на рынке как беспроводная сеть "последней мили", которая может быть применена, в частности, для сбора информации с различного рода датчиков и устройств. Максимальная заявленная битовая скорость составляет 2 Мбит/сек, однако в некоторых случаях для увеличения дальности и повышения надежности передачи данных имеет смысл использовать скорости 1 Мбит/сек и 500 Кбит/сек.

Несущая частота составляет 2.4 ГГц, ширина спектра сигнала – 80 МГц.

Для адресации узлов сети используются 6-байтовые числа (MAC-адреса), которые могут назначаться как централизованно, так и разработчиком приложений этой технологии; возможна также широковещательная рассылка кадров в сети.

Для передачи символов данных (бит) используются электромагнитные сигналы с плавно изменяющейся частотой (CSS-модуляция, Chirp Spread Spectrum). При этом для передачи двоичного символа может использоваться сигнал с увеличивающейся частотой, сигнал с уменьшающейся частотой и/или отсутствие сигнала. Также стандарт предусматривает возможность кодирования символов в четверичной (а не двоичной) системе счисления – в этом случае для кодирования нуля, единицы, двойки и тройки используются отсутствие сигнала, сигнал с увеличивающейся частотой, сигнал с уменьшающейся частотой и смешанный сигнал соответственно.

Передача одного символа (то есть одного бита информации для случая двоичной системы счисления и двух бит для случая четверичной) длится 1 мкс; таким образом, предельная скорость передачи составляет 1 Мбит/с для двоичной и 2 Мбит/с для четверичной систем счисления соответственно; имеется также режим передачи на скорости 500 Кбит/с.

Линейно-частотное кодирование

Технология nanoNet базируется на использовании линейно-частотной модуляции. Такое кодирование обладает рядом уникальных характери-

стик и применяется в основном в эхолокации (электромагнитной и акустической). Оно также используется и в природе, например дельфинами и летучими мышами для определения своего местоположения относительно других объектов.

Стандарт IEEE 802.15.4a использует два простых сигнала для обработки и передачи символов: чирп и синк (chirp, sync). Первый в течение длительности импульса (1 микросекунда) наполняется возрастающей или понижающей частотой. Длительность второго намного меньше, а форма напоминает всплеск. Необходимо отметить, что оба сигнала обладают частично дополняющими свойствами и имеют особый признак – у них одинаковый спектр (см. рис. 4).

Преобразование одного сигнала в другой происходит в дисперсионной линии задержки (ДЛЗ, см. рис. 5). Такая линия обладает способностью задерживать на разное время сигнал на разных частотах. Таким образом, если, например, на ДЛЗ поступает чирп-импульс с повышающейся частотой (сначала низкие, потом высокие), а ДЛЗ лучше задерживает более низкие частоты, то получится, что на выходе кристалла все частотные компоненты сигнала придут в одно время, что сформирует гигантский сфазированный импульс – синк-сигнал.

Именно благодаря этому автокорреляционному свойству приемопередатчики nanoNET обладают очень высокой чувствительностью и стойкостью к внешним электромагнитным помехам (см. рис. 6).

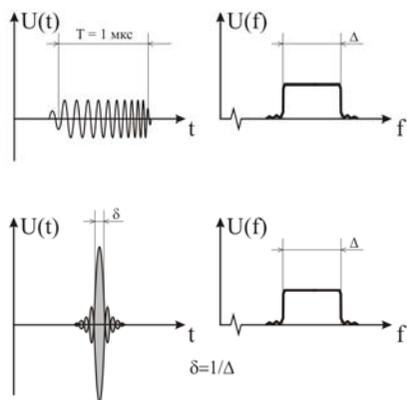


Рис. 4. Chirp-импульс (верхний) и Sync-импульс (нижний) и их спектр

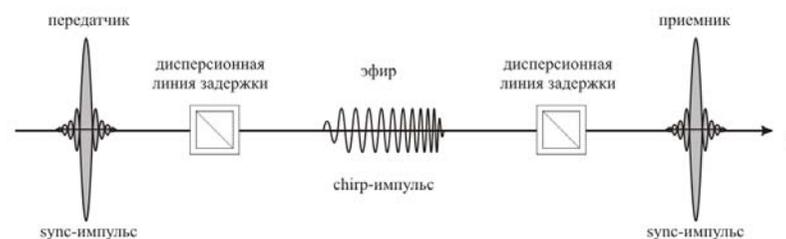


Рис. 5. Формирование Chirp- и Sync-импульсов

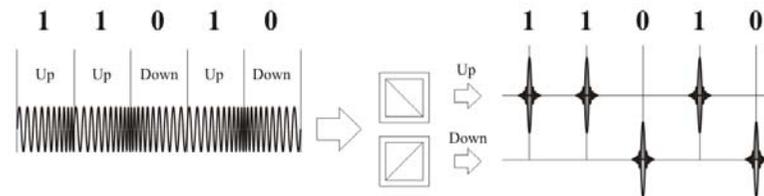


Рис. 6. Битовая передача в nanoNET

Пример алгоритма функционирования сети датчиков

В качестве описанного ниже алгоритма маршрутизации используется разновидность класса алгоритмов, основанных на "градиентах" (англ. "gradient based routing")*. Предлагаемый алгоритм ориентирован на применение в задачах мониторинга окружающей среды и подобных ей.

Сеть состоит из одного главного узла (пункта сбора информации, стока) и некоторого количества узлов-датчиков и узлов-маршрутизаторов. Функционирование сети происходит в три стадии. Расписание стадий заранее оговаривается.

Первая стадия – установление связей между узлами. На этом этапе сток посылает в эфир широкоэвещательный пакет (все остальные узлы находятся в режиме приема). Будем называть такой пакет "SAP" (от "sink announcement packet"), то есть пакет, свидетельствующий о наличии пункта сбора данных. Пакет содержит временную метку (time beacon), а также информацию, необходимую для построения маршрутов. В качестве такой информации используется счетчик числа транзитных пунктов – "скачков" (hop count). Узел-сток устанавливает этот счетчик в нуль. По получению SAP-пакета узлы-ретрансляторы пересылают его, увеличивая при этом счетчик числа скачков на единицу. Кроме того, каждый узел (датчик или ретранслятор) при получении такого пакета синхронизирует свой внутренний таймер и обновляет таблицу близлежащих ретрансляторов. Для определения оптимального маршрута могут быть использованы и другие метрики, например запас энергии на ретрансляторах, мощность принимаемого сигнала. Тогда датчики и ретрансляторы смогут выбирать из нескольких соседних (отстоящих от узла-стока на одинаковое количество "скачков") ретрансляторов тот, который имеет наибольший запас энергии, что позволит более равномерно загрузить ретрансляторы, или тот, сила сигнала от которого максимальна, что повысит надежность функционирования сети.

* Жиганов Е. Д., Мошевикин А. П. Беспроводные сети датчиков на основе технологии nanoNET // Информационные технологии. 2007. № 11. С. 28–35.

Если датчик получает более чем одно сообщение о "существовании пункта сбора данных", он может сформировать у себя в оперативной или долговременной памяти таблицу близлежащих ретрансляторов, а также один из маршрутов промаркировать как маршрут по умолчанию на основании той или иной метрики. Если ретранслятор, который находится на расстоянии n транзитных связей от узла-стока, получает SAP-пакет от другого ретранслятора со значением числа скачков, превышающим n , он игнорирует это сообщение и не обновляет свою таблицу маршрутизации.

Максимальное количество "скачков", очевидно, должно быть ограничено с целью уменьшения времени установления связей в сети. Если какой-нибудь ретранслятор получает пакет с этим максимальным значением счетчика скачков, он обновляет свою таблицу, но SAP-пакет не ретранслирует. Устанавливать максимальное значение счетчика скачков (глубины сети) можно или жестко, исходя из требуемой зоны покрытия, или динамически; в последнем случае эту величину задает узел-сток, указывая его в SAP-пакете.

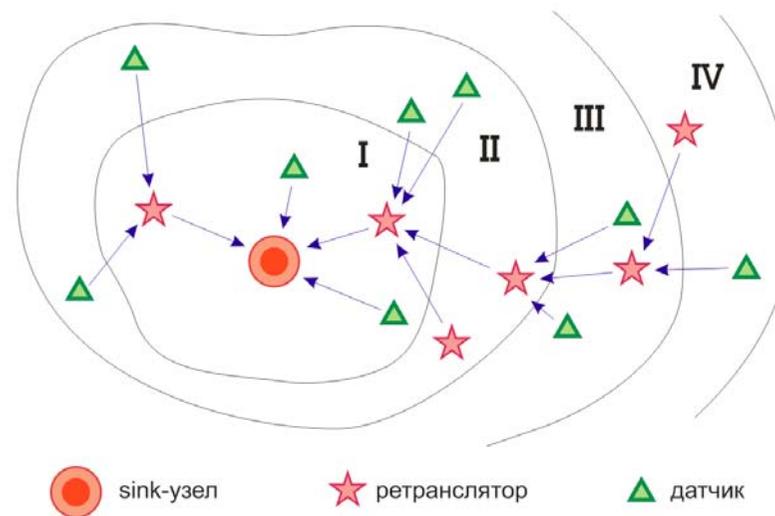


Рис. 7. Схема беспроводной сети сбора информации с датчиков

После этапа установления связей будут сформированы зоны удаленности от узла-стока (I, II, III, IV на рис. 7). При возникновении необходимости послать информацию по направлению к узлу-стоку датчик или ретранслятор зоны n должны передать ее ретранслятору в зоне $n - 1$ или непосредственно узлу-стоку, если $n = 1$.

Вторая стадия соответствует сбору данных с датчиков (передачи информации на пункт сбора). Здесь возможны несколько различных алгоритмов выделения определенной полосы пропускания (времени) конечным узлам и ретрансляторам для связи с более высокими иерархическими узлами. Например, можно использовать расписание, основанное на номере зоны. В первую очередь (в первый тайм-слот) на основании информации, полученной на этапе установления связей, передачу начинают вести датчики и ретрансляторы зоны I, во второй тайм-слот – датчики и ретрансляторы зоны II, в третий – зоны III и т.д. Право начать передачу может определяться на основе конкуренции (с использованием алгоритма CSMA/CA), в режиме заранее оговоренного расписания или смешанным способом.

В простейшем случае ретрансляторы прослушивают среду постоянно (питание либо от стационарной электросети, либо от емких аккумуляторов), узлы-датчики между передачами переходят в режим сна для уменьшения потребления энергии.

Во время **второй стадии** ретрансляторы также периодически рассылают в широкоэмитальном режиме пакеты "присутствия" (RAP, "router announcement packet"), один раз в несколько секунд или десятков секунд. Это необходимо для того, чтобы датчики, просыпаясь время от времени, всегда знали о наличии действующего пути к узлу-стоку. Кроме того, это необходимо для корректного включения нового узла в сеть или "перерегистрации" его в случае построения сети мобильных датчиков.

Третья стадия – установление более точного расписания передач пакетов. После того как узел-сток узнает состав и распределение конечных узлов по зонам (т.к. каждый ретранслятор хранит базу данных подключенных к нему датчиков), он может сгенерировать график работы всех узлов и разослать им соответствующие рекомендации по временным меткам начала передачи, сна, включения режима прослушивания среды и т.д. Этот этап требует затрат достаточно больших процессорных ресурсов, которые, по-видимому, не могут быть прове-

дены микроконтроллерным ядром. Поэтому третья стадия возможна только при подключении узла-стока к компьютеру, выполняющему основные расчетные операции и выделяющему массивы памяти для хранения текущей конфигурации сети.

Необходимо также отметить, что для обеспечения стабильности работы сети узел-мастер должен иногда самостоятельно инициировать первую и вторую стадии. Это позволит поддерживать синхронизацию по времени всех устройств, а также корректно разрешать нештатные ситуации, например выход датчиков из сети вследствие истощения аккумуляторных батарей.

В случае, если электропитание ретрансляторов производится от аккумуляторов, нагрузка на ретрансляторы будет тем больше, чем ближе они к узлу-стоку, поскольку ближайшим к стоку ретрансляторам придется передавать пакеты от всех датчиков (кроме тех, которые передают данные узлу-стоку напрямую). Поэтому при практической реализации описанной сети нужно либо предусмотреть для сильно загруженных ретрансляторов более емкие аккумуляторы, либо проектировать повышенную плотность ретрансляторов в ближней к узлу-стоку зоне.

Приведем оценки длительности описанных стадий для случая использования технологии nanoNET (скорость передачи – 2 Мбит/сек). Для других технологий радиопередачи результаты будут немного отличными вследствие разных битовых скоростей, форматов кадров, мощностей передатчиков, других аппаратных особенностей.

В случае, если плотность расположения ретрансляторов на местности не очень велика, можно считать, что коллизии сигнала возникать не будут и нижнюю границу времени установления связей ($T1$) можно оценить следующим образом:

$$T1 = T_s + N(T_p + T_t),$$

где T_s – время, которое узел-сток затрачивает на подготовку SAP-пакета, N – максимальное количество транзитных связей, T_p – время обработки поступившего кадра ретранслятором (синхронизация по единому времени, обновление таблиц маршрутизации, подготовка следующего кадра), T_t – время передачи кадра time beacon.

Время передачи одного символа информации в сетях стандарта nanoNET равно 1 мкс. Для сетей небольшого масштаба временем на задержки распространения сигнала можно пренебречь, поэтому

длительность передачи SAP-пакета (не более 40–50 байт), используемого на стадии установления связей, не превышает 400 микросекунд. Если учесть время обработки пакетов, то в среднем можно считать, что каждый ретранслятор затрачивает 1 миллисекунду на прием кадра, подготовку следующего кадра к отправке и старт передачи.

Пусть $T_s \sim 1\text{--}2$ мс, $N = 16$, $T_r + T_t \sim 1$ мс, тогда $T_1 \sim 20$ мс.

В реальных условиях T_1 будет больше вследствие существования коллизий и помех от внешних электромагнитных сигналов и необходимой в этом случае повторной передачи.

Исходя из этого, имеет смысл повторять процедуры первой стадии не чаще чем раз в несколько секунд или даже несколько десятков секунд, оставляя большую долю времени для передачи данных с удаленных датчиков.

Далее приводятся алгоритмы функционирования всех трех типов узлов.

Алгоритм работы узла-стока:

1. Подготовить и передать широкоэмитательный SAP-пакет со значением числа скачков, равным нулю.
2. Слушать среду передачи и принимать пакеты с данными, передавать их на компьютер для обработки, сохранения в базе данных и последующей визуализации.
3. Перейти к шагу 1.

Алгоритм работы узла-ретранслятора (в случае стационарного электропитания):

1. Ожидать поступления SAP (от узла-стока или от другого ретранслятора).
2. В случае получения SAP-пакета:
 - а) если значение числа скачков больше, чем в ранее полученных пакетах, текущий пакет игнорируется, иначе необходимо внести изменения в таблицу маршрутизации, переход на шаг 3;

б) если значение числа скачков равно максимально возможному, необходимо в некоторых случаях запомнить адрес источника, таблица маршрутизации остается неизменной, переход на шаг 4.

3. Увеличить значение числа скачков на единицу и передать пакет далее, переход на шаг 2.
4. После окончания первой стадии перейти в режим получения пакетов с данными от узлов-датчиков и ретрансляции их узлу-стоку в соответствии с построенной таблицей маршрутизации. Ретранслируемый пакет может содержать MAC-адрес узла-источника.
5. Периодически рассылать RAP-пакеты, свидетельствующие о присутствии ретранслятора.

Алгоритм работы узла-датчика 1 (простейший):

1. После включения питания слушать среду передачи, ожидая SAP-пакеты или RAP-пакеты, запоминая MAC-адрес узла источника этих пакетов с минимальным значением числа скачков.
2. Через некоторое время начать посылать данные на запомненный MAC-адрес, периодически переходя в режим сохранения энергии.

Алгоритм работы узла-датчика 2 (расписание на основе установленных иерархических зон):

1. После включения питания слушать среду передачи, ожидая SAP-пакеты или RAP-пакеты, запоминая MAC-адрес узла источника этих пакетов с минимальным значением числа скачков.
2. Перейти в состояние сохранения энергии (режим сна, трансмиттер выключен) до момента $T_w = T_1 + T_z (PR - 1)$, где T_1 – длительность стадии 1, T_z – время, в течение которого узлы каждой зоны имеют право передавать пакеты (может зависеть от номера зоны), PR – номер зоны (количество транзитных пунктов "по пути" до узла-стока).
3. Выйти из режима сна и провести попытки послать данные.
4. Войти в режим сна до момента $T_w = T_1 + T_z \cdot \text{MaxHopCount}$.
5. Повторить предыдущие шаги, если требуется.
6. Перейти на шаг 1.

Проблемы в беспроводных сетях и способы их решения

Регулировка мощности передатчика

Зачастую теоретический анализ алгоритмов функционирования беспроводных сетей датчиков подразумевает, что мощность, расходуемая узлом-датчиком при работе на передачу, регулируется в зависимости от расстояния до узла-получателя пакета. Такое регулирование можно осуществить несколькими способами.

Во-первых, можно заложить в программный код вычислительных систем узлов априорное знание о расстояниях до других узлов. Недостатком этого подхода является неудобство в обслуживании и настройке таких систем, выражающееся в необходимости предварительного замера расстояний и индивидуального программирования каждого узла.

Во-вторых, для определения расстояний можно использовать или системы глобального позиционирования, или какие-либо методы триангуляции. Этот подход чреват значительным удорожанием и усложнением сети датчиков, что может оказаться нецелесообразным.

В-третьих, можно воспользоваться встроенной в чипы приемо-передатчиков возможностью определять расстояние между двумя узлами на основе временной задержки распространения сигнала (на примере технологии NanoLOC, анонсированной в октябре 2006 года компанией Nanotron Technologies GmbH).

Наконец, можно вообще обойтись без определения расстояний, а вместо этого реализовать какой-либо алгоритм поиска такого минимального уровня выходной мощности, при котором связь с получателем все еще стабильна.

Приведенная на рис. 8 ситуация иллюстрирует сказанное выше. Узел-датчик S3, находясь в пределах слышимости обоих ретрансляторов R1 и R2, выбирает R1 в качестве кратчайшего пути к узлу-стоку, основываясь либо на лучшем качестве сигнала от R1, либо на желании сэкономить электроэнергию.

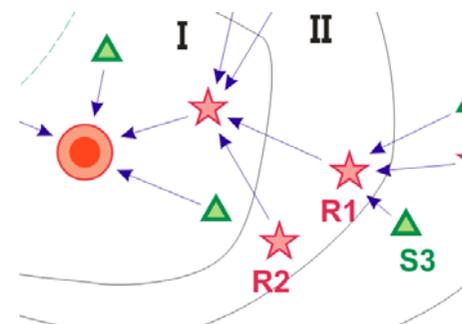


Рис. 8. Выбор ретранслятора. Агрегация данных

Однако (но не в случае с NanoLOC) получение априорной информации о качестве связи требует предварительной посылки множества тестовых пакетов, что может свести на нет экономию энергии, получаемую за счет того, что для передачи пакетов на более близкие узлы расходуется меньше энергии, чем для пересылки на более удаленные. Кроме того, отношение мощностей, потребляемых узлом-датчиком при максимально возможной и минимально возможной выходных мощностях, может составлять величину, не сильно превышающую единицу, поэтому усложнения, связанные с подстройкой выходной мощности, могут оказаться неразумными. Последнее рассуждение особенно верно для сетей nanoNET в условиях наличия помех в диапазоне 2.4 ГГц (ток, потребляемый передатчиком, меняется в пределах 55–78 мА, а устойчивая радиосвязь, как показал опыт, возможна только при значениях, близких к максимальным).

Истощение батарей электропитания ретрансляторов

Как уже было сказано, в сетях централизованного сбора информации ретрансляторы, находящиеся ближе (в зоне с меньшим номером) к узлу-стоку, вынуждены чаще передавать кадры данных, а следовательно, расходовать больше энергии. Для повышения эффективности использования беспроводных каналов связи ретрансляторы могут агрегировать несколько пакетов, собирая из них один для отправки далее.

На рис. 8 ретрансляторы R1 и R2 зоны II каждый в отведенное ему время, либо в режиме TDMA, либо CSMA, передают пакеты ретранслятору зоны I. Часто бывает, что объем полезной информации в каж-

дом пакете составляет лишь десяток байт, в таком случае ретранслятор зоны I может объединить полученные пакеты в один, сопроводив полезные данные небольшим дополнением, например информацией об адресах узлов, приславших пакеты с данными.

Проблема скрытого узла

Условия недетерминированного по времени начала передачи (отсутствие предварительного расписания) приводят к возникновению так называемой "проблемы скрытого узла" (см. рис. 9). Ретранслятор может получить сигнал от обоих узлов-датчиков S1 и S2, однако они сами не подозревают о существовании друг друга (скрытые узлы). Причиной этого может быть либо особенность местоположения узлов, как, например, на рис. 9, либо наличие какого-либо препятствия между ними. Поскольку узлы-датчики "не слышат" друг друга, то вполне вероятно, что они начнут передавать данные ретранслятору одновременно, в результате чего он не получит данных ни от узла S1, ни от узла S2.

Для уменьшения вероятности коллизий разработаны модификации алгоритма CSMA, например CSMA/CA, то есть Carrier Sensing Multiple Access with Collision Avoidance. Эта модификация подразумевает, что перед тем как начать передачу (при условии незанятости среды, разумеется), узел посылает короткий запрос (RTS, request to send) тому узлу, которому нужно передать данные. Если узел-адресат в этот момент не принимает никаких данных, то он отвечает коротким ответом (CTS,

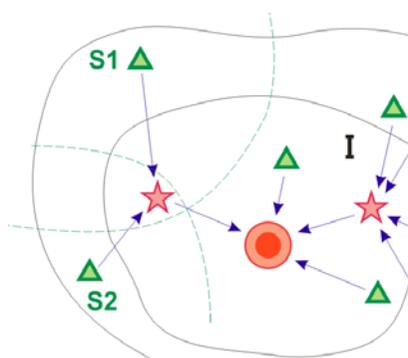


Рис. 9. Проблема скрытого узла

clear to send), о чем узнает узел-источник и начинает передачу данных. Для рассмотренного выше примера это означает следующее. Хотя узел S1 "не слышит" узла S2, он "услышит" ответ ретранслятора узлу S2 и отложит передачу. Безусловно, такая и ей подобные модификации CSMA не сводят вероятность коллизий до нуля. Например, узел S2 может послать ретранслятору пакет RTS в тот момент, когда тот принимает данные от узла S1. Тогда процесс текущей передачи данных нарушится и его придется повторить, что, естественно, весьма нежелательно.

Рассмотрим теперь способы, которые применяются для детектирования занятости среды на примере приемопередатчиков nanoNET в случае использования режима CSMA. Приемопередатчики, работающие по этой технологии, отслеживают состояние среды передачи двояким образом, физически и логически. При этом физическое отслеживание возможно как по уровню сигнала, так и по детектированию символов (битов), то есть сигналов, промодулированных таким образом, как это предполагается в этом стандарте (Chirp Spread Spectrum Modulation, линейно-частотное кодирование). Опыт показывает, что определение занятости среды на основе только уровня сигнала можно использовать в условиях, когда уровень помех несуществен.

Алгоритм логического определения доступности среды передачи (Network Allocation Vector, NAV) работает следующим образом. Если при прослушивании эфира узел принимает какой-либо пакет, то, исходя из информации, содержащейся в его заголовке (длина пакета), он определяет, сколько времени будет еще длиться данная передача, и устанавливает таймер. Следующее прослушивание среды будет производиться только по истечении интервала времени, отсчитанного этим таймером.

Радиомодуль стандарта nanoNET с интерфейсом USB

Радиомодуль nanoNET используется в качестве приемного или передающего устройства для осуществления беспроводной передачи данных. Программирование и настройка радиомодуля производится по интерфейсу SPI.



Рис. 10. Радиомодуль nanoNET

Устройство подключается к компьютеру по интерфейсу USB и состоит из следующих блоков:

- управляющий микроконтроллер (ATmega32L);
- трансивер стандарта nanoNET (nanoPAN 5361);
- контроллер шины USB (FT245RL).

На рис. 11 приведена функциональная блок-схема устройства (расположение блоков слева направо обратно по отношению к порядку на принципиальной схеме, рис. 12).

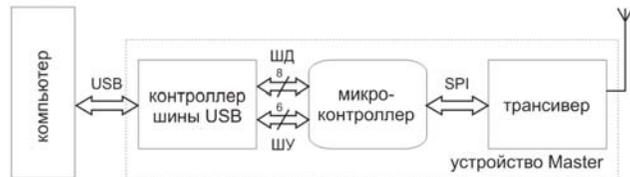


Рис. 11. Блок-схема радиомодуля nanoNET

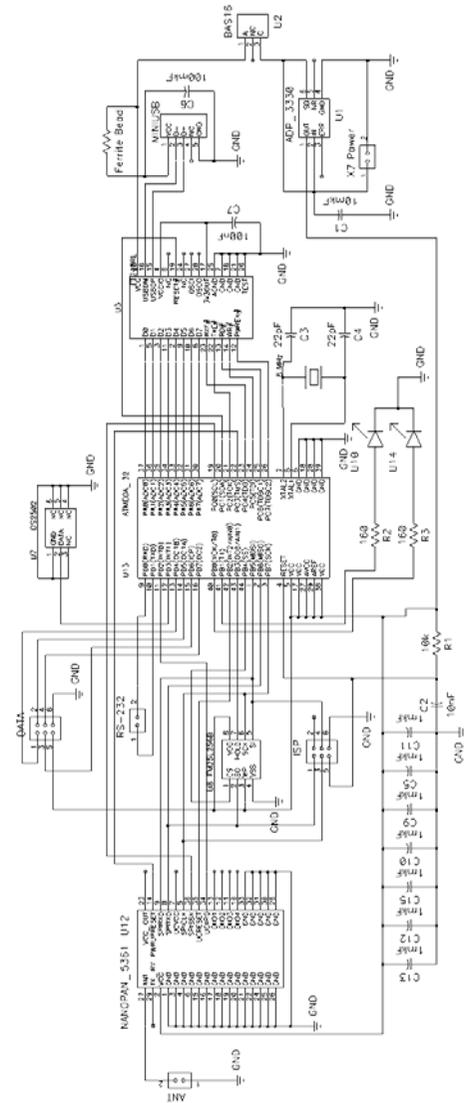


Рис. 12. Принципиальная схема радиомодуля nanoNET

Принцип работы радиомодуля

Питание устройства осуществляется по шине USB (+5 В) стабилизатором ADP3330 (U1), формирующим шину с напряжением +3 В (для питания ATmega32L и папо PAN5361). Кроме этого, возможно подключение внешнего питания (не более +5...6 В) к разъему X7 (например, в режиме программирования микроконтроллера ATmega32L).

Не следует подключать одновременно оба источника питания (через шину USB и через разъем X7), это может вызвать выход из строя устройства.

Конденсаторы C5, C9, C10, C11, C12, C13, C15 емкостью 0.1...1 мкФ – блокировочные. Ферритовое кольцо (Ferrite_Bead) и конденсатор C6 образуют LC-цепочку и необходимы для уменьшения проникновения высокочастотных наводок в компьютер по шине USB.

Управляющий микроконтроллер ATmega32L (U13) тактируется с помощью цепи из кварцевого резонатора на 8 МГц (8 MHz) и двух возбуждающих колебания конденсаторов C3 и C4 емкостью по 22 пФ. RC-цепочка (R1 номиналом 10 кОм, C2 номиналом 10 нФ) формирует импульс сброса в момент включения питания для корректного запуска микроконтроллера.

Светодиоды U10, U14 (рядом с ограничивающими ток резисторами R2, R3) можно использовать, например, для индикации режима приема-передачи устройства или обозначения факта обмена данными по шине USB. (Внимание: светодиоды могут отсутствовать на вашей плате или быть подключены к общей шине, на принципиальной схеме они подключены к шине питания).

Линии PC0, PC3, PB2, PB5, PB6, PB7, PD2 формируют шину управления/данных, связывающую микроконтроллер ATmega32L и трансивер nanoPAN 5361 (линии SPISSN, PWRUPRESET, UCRESET, SPIRXD, SPITXD, SPICLK, UCIRQ соответственно). В данной модификации программного обеспечения, поставляемого с устройством, линия PD2 (прерывание от трансивера) не используется; осуществлен программный опрос готовности приемо-передатчика.

Линии PB5, PB6, PB7, RESET, GND также выведены на разъем ISP для внешнего программирования ATmega32L по интерфейсу SPI (линия RESET в этом случае выступает в качестве SPISSN).

Интерфейс RS-232 (и соответствующий разъем) служит для отладочных целей. Следует отметить, что для подключения к компьютеру необходимо использовать дополнительную микросхему формирователя уровней, например MAX232, или воспользоваться формирователем, встроенным в некоторые программаторы (например, STK-500).

8 цифровых линий порта А (шина данных ШД 8 на блок-схеме) и 6 линий порта С (все, кроме PC0 и PC3, ШУ 6 на блок-схеме) используются для обмена данными с микросхемой контроллера шины USB FT245RL, питающейся непосредственно от шины USB через упомянутую LC-цепь.

FT245RL (производитель FTDI chip) представляет собой практически законченный модуль для сопряжения с микроконтроллером с преобразованием данных из формата USB в параллельный формат.

Программирование радиомодуля USB-nanoNET

Программирование радиомодуля осуществляется с помощью внешнего программатора по интерфейсу SPI. Удобно использовать отладочный комплект STK-500 (см. рис. 13), поскольку контакты разъема ISP6PIN (STK-500, с краю платы посередине длинной верхней стороны на рисунке) полностью совпадают по расположению с контактами разъема ISP на радиомодуле.

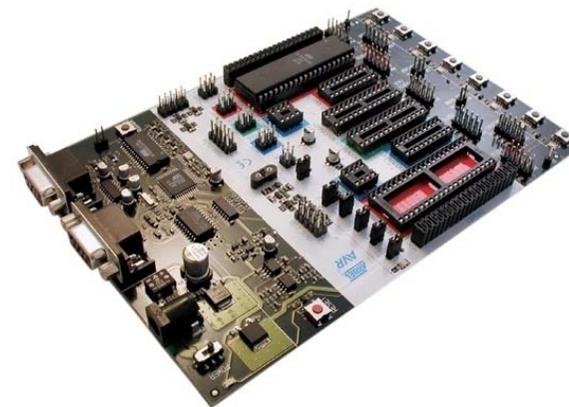


Рис. 13. Отладочный комплект STK-500

Процедура программирования радиомодуля USB-nanoNET:

1. Отладить и откомпилировать исходный код программы (в результате сгенерируется hex-файл).
2. Отключить питание от радиомодуля.
3. Подключить радиомодуль к программатору (например, шлейфом из 6 проводов).
4. Подключить внешнее питание через разъем X7 Power, соблюдая полярность (питание от шины USB отключено). Несоблюдение полярности чаще всего приводит к выходу из строя стабилизатора ADP3330.
5. Оpoznать программным обеспечением микроконтроллер (ATmega32L или ATmega32) и убедиться, что логические переключки (fuses) выставлены **правильно** (запуск от внешнего кварцевого резонатора высокой частоты и отключение интерфейса JTAG, поскольку линии порта В используются для взаимодействия с чипом FT245RL).
6. Запрограммировать радиомодуль.
7. Отключить питание через разъем X7 Power, если модуль планируется подключать к шине USB.

Если ATmega32L программируется с ошибками, попробуйте уменьшить тактовую частоту ISP до 115 кбод и ниже (например, параметр ISP Freq во вкладке Board окна программирования в AVRStudio 4).

Расположение компонентов на печатной плате

Внимание! Плата и/или расположение элементов на ней может немного отличаться от представленного на рис. 14. Например, не установлены светодиоды U10 и U14 и токоограничивающие резисторы R2 и R3, или светодиоды U10, U14 могут быть подключены не на общую шину (земля), а к шине питания (на рис. 14 они подключены к общей шине, правая часть светодиодов заземлена).

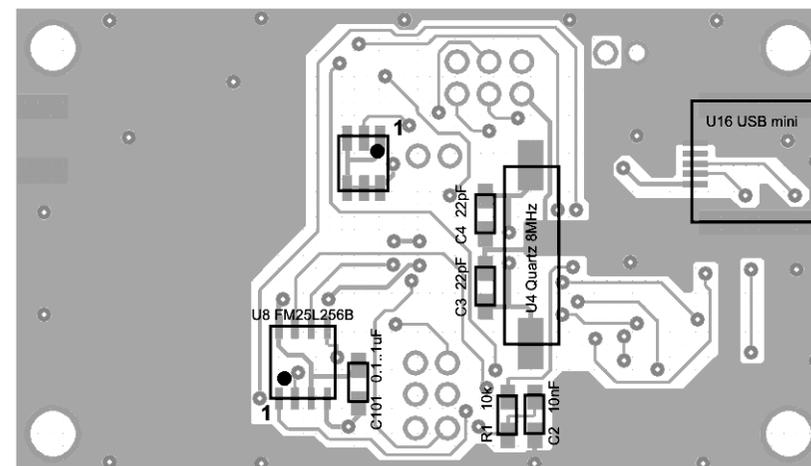
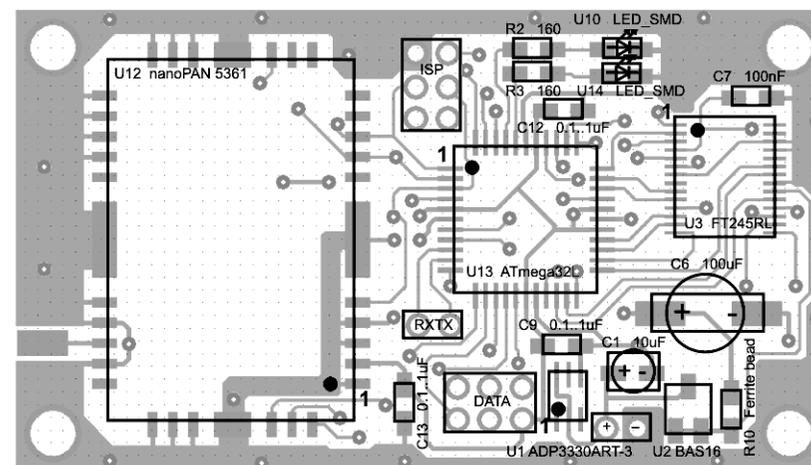


Рис. 14. Монтажная схема радиомодуля nanoNET

Программное обеспечение

Общие вопросы компиляции проекта

Программное обеспечение создается в среде AVRStudio 4 с предустановленным пакетом WinAVR (компилятор avr-gcc и другие утилиты). Оно построено на основе демонстрационного драйвера TRXdd2.01 для системы nanoNET.

В проект входят следующие файлы:

appl_functions.c	Высокоуровневые функции
cchirpseq.c	Массив инициализации для формирования чирп-импульсов
dilcom.c	Описание структур
ft245_functions.c	Функции для работы с шиной USB
parallel_port_access.c	Низкоуровневые аппаратно-зависимые функции
nnreset.c	Сброс трансивера
nnspi.c	Функции транзакций по шине SPI
nn_usb_link_test.c	Файл, содержащий main()
ntrxinit.c	Инициализационные таблицы констант и функции
ntrxdil.c	Функции работы с трансивером
ntrxutil.c	Таблицы констант и утилиты для работы с трансивером

Кроме этого, в подкаталоге /h содержатся заголовочные файлы.

Для перенаправления ввода-вывода в avr-gcc используется стандартный для языка C подход. В файле nn_usb_link_test.c определен новый поток

```
static FILE mystdout = FDEV_SETUP_STREAM(put_char, NULL,
_FDEV_SETUP_WRITE)
```

и новая функция put_char(), в которой и происходит выбор устройства вывода.

Необходимо отметить, что в библиотеке функций для FT245RL есть два варианта функций: с блокирующим и неблокирующим выводом. В случае блокирующего вывода микроконтроллер будет ожидать от USB-чипа момента разрешения начала цикла отсылки данных.

Программа проверки качества связи

Для тестирования радиосвязи по стандарту nanoNET (IEEE 802.15.4a) необходимы два модуля, условно обозначенные MASTER и SLAVE.

В начале цикла измерений MASTER в течение 1 секунды посылает узлу SLAVE кадры длиной 128 байт на максимальной выходной мощности. Микроконтроллер формирует распределение кадров по номеру попытки, с которой осуществилась передача (attempts, максимальное количество ретрансмиссий – 3). Программа написана таким образом, что во многих случаях к числу неуспешных попыток будет добавлена 1, хотя на самом деле передача была успешной.

После этого узел MASTER последовательно посылает узлу SLAVE кадры, постепенно уменьшая амплитуду сигнала со значения 63 до 0, одновременно фиксируя количество ретрансмиссий. Если счетчик попыток передачи пакета для текущей мощности сигнала равняется трем, это означает, что пакет так и не был доставлен адресату (узлу SLAVE). Пакеты подтверждения о приеме посылаются всегда на максимальной мощности (63).

Типичная запись в log-файле эксперимента (на экране) может выглядеть следующим образом:

```
<RTC: 000000381CBF
Packets/second distribution, 3 attempts - max:
1 attempt:      695
2 attempt:       0
3 attempt:       0
Unsuccess:      1
TOTAL           :   696

                                121  2333333333
                                    33333333333
                                        2 1 1  333333333
87654322110099988877776666555554444433333322222211111100000
```

```
<RTC: 00000059C549
Packets/second distribution, 3 attempts - max:
1 attempt:      348
2 attempt:       62
3 attempt:       43
Unsuccess:      75
TOTAL           :   528
                1 33 33 3333333
1 3333 3 3312 133
2333 21 333 2132
87654322110099988877776666555554444433333322222211111100000
```

RTC: 000000381CBF – временная метка регистрации данных (аппаратная поддержка в трансиверах nanoNET).

Строчка 8765432211009998...1100000 содержит набор цифр, каждая из которых обозначает уровень мощности отправленного информационного кадра. Всего 19 градаций – от 18 (написана только восьмерка, единица для компактности в записи в log-файле опущена) до 0.

Предыдущие три строки соответствуют однотипным сериям отправки кадров с уменьшающейся силой сигнала.

Каждый символ в этих строчках обозначает количество ретрансмиссий, которое требуется для подтвержденной передачи. Если их не потребовалось, то есть кадр был передан с первой попытки, вставляется пробел. Если в серии посылки кадров с уменьшающейся амплитудой сигнала накапливается более 30 ретрансмиссий, серия обрывается. Например (см. пример из log-файла выше): в первой серии кадры с уровнем мощности 18, 17, 16 и т.д. до 3 включительно отсылались с первой попытки. А вот при уровне сигнала в 2 условные единицы потребовались одна или две дополнительные ретрансмиссии; далее на первом уровне мощности вообще не было зарегистрировано безошибочных передач.

Другими словами, пока сигнал узла-мастера был достаточно сильным, узел SLAVE подтверждал прием каждого пакета. Как только уровень мощности стал равным 2, начали появляться проблемы с приемом. А для уровней сигнала от 1 до 0 вообще не было зарегистрировано ни одной успешной передачи. То есть: чем хуже были условия приема-передачи, тем ближе к началу третьей строки возникали цифры 1, 2 и 3 (см. вторую запись в приведенном выше log-файле).

Выбор конфигурации проекта (MASTER или SLAVE)

Выбор условий компиляции проекта для устройств MASTER или SLAVE проводится определением

```
#define MASTER
```

в файле nn_usb_link_test.c. В случае выбора конфигурации SLAVE эту строчку необходимо закомментировать (`//#define MASTER`).

Выбор конфигурации проекта

(устройство вывода информации USB или USART)

Выбор устройства вывода проводится соответствующим присвоением значения переменной `poutput`:

```
//poutput=USART; // USART|USB  
poutput=USB; // USART|USB
```

В случае выбора конфигурации MASTER + USB после подключения модуля к шине USB (включения питания радиомодуля) и старта терминальной программы (ее не запустить до момента подключения модуля, поскольку виртуальный COM-порт на тот момент еще не существует), программное обеспечение в ATmega32L (радиомодуль) будет ожидать нажатия любой клавиши на клавиатуре компьютера, и только после этого начнется очередной цикл измерения.

Выбор режимов работы трансиверов

Также необходимо отметить, что выбор режимов работы обоих трансиверов лучше проводить при выключенном приемнике. Для этих целей служит блок в функции `main()`, ограниченный `остановом` и `повторным запуском ресивера` (первая и последняя строчки кода):

```
NTRXSetRegister(TRX_RX_STOP, TRUE);  
NTRXSetRegister(TRX_TX_ARQ_MAX, 0x02);  
NTRXSetRegister(TRX_TX_ARQ, TRUE);  
NTRXSetRegister(TRX_RX_ARQ_MODE, arqModeCrc2);  
// NTRXSetRegister(TRX_TX_ARQ_MAX, 0x00);  
// NTRXSetRegister(TRX_TX_ARQ, FALSE);  
// NTRXSetRegister(TRX_RX_ARQ_MODE, arqModeNone);  
temp=63; // power = MAX for Ack, Req2S and Clr2S  
NTRXSetIndexReg(0);  
transSPI(WRITE_CMD, SRfTxOutputPower1_O, &temp, 1);  
transSPI(WRITE_CMD, SRfTxOutputPower0_O, &temp, 1);  
NTRXSetRegister(TRX_MOD_ARRAY, mod4ary);  
// NTRXSetRegister(TRX_MOD_ARRAY, mod2ary);  
// NTRXSetRegister(TRX_RX_ADDR_MATCH, FALSE);  
NTRXSetRegister(TRX_RX_START, TRUE);
```

Настройка RS-232

Настройка USART производится в функции `InitPorts()` (файл `aprl_functions.c`). По умолчанию выставляются следующие значения: 8 бит данных, 1 стоп-бит, без бита четности, 38400 бод.

Задания для самостоятельной работы

1. Рассчитать величину тока, протекающего через светодиод U10 при подаче логической единицы на соответствующий вывод микроконтроллера.
2. Рассчитать постоянную времени RC-цепочки, состоящей из резистора R1 и конденсатора C2.
3. Чем определяется величина номиналов блокировочных конденсаторов? Сформулировать принципы размещения блокировочных конденсаторов на плате устройства.
4. Определить минимальное входное напряжение, подаваемое на стабилизатор ADP3330ART-3 через разъем X7, которое обеспечивает стабилизацию по напряжению для штатного режима функционирования модуля (передача кадров в эфир).
5. Что значит выражение "инверсная логика" при рассмотрении вопросов передачи сигналов по линиям связи? Как обозначаются на схемах такие сигналы?
6. Рассчитать минимальную емкость конденсатора C1, руководствуясь тем, чтобы его заряда хватило для работы трансивера на время передачи одного кадра в эфир.
7. Рассчитать примерные габариты полуволновой штыревой антенны для диапазона 2.4 ГГц.
8. Привести примеры интерфейсов, построенных на таких же принципах, что и взаимодействие микроконтроллера Atmega32L и чипа USB FT245RL.
9. Изучить схему подключения устройств по шине SPI и назначение сигнальных линий.
10. Изучить принципы работы встроенного в микроконтроллер Atmega32L SPI-контроллера.
11. Изучить принципы работы с портами микроконтроллера (глава про порты ввода-вывода из документации на ATmega32L, термины Tri-state, Input, Output, Pull-up).

Задания к практическим занятиям

Внимание! Для всех экспериментов обязательно проводить статистическую обработку результатов.

1. На основе зависимости уменьшения мощности сигнала от расстояния построить диаграммы направленности антенн по вариантам (эксперимент проводить на открытой местности):
 - а) для штыревой полуволновой антенны,
 - б) для многовитковой спиральной антенны,
 - в) для штыревой антенны наружного исполнения.
2. Используя данные RSSI (регистр 0x59), создать программное обеспечение двух модулей MASTER и SLAVE, посылающих кадры друг другу. Построить зону покрытия радиосети с отметками количества подтвержденных кадров и силой входного сигнала в каждой точке зоны для двух мощностей выходного сигнала 0 dBm и 8 dBm. Провести статистическую обработку результатов.
3. Исследовать взаимовлияние беспроводных технологий друг на друга (WiFi, nanoNET).
4. Исследовать параметры дальности и устойчивости связи между трансиверами nanoNET в различных режимах по вариантам (1 и 2 Мбит/сек, включение/выключение разных способов физического кодирования сигнала).
5. Разработать программу-маршрутизатор, ретранслирующую кадры между двумя трансиверами, которые находятся вне зоны взаимной слышимости.
6. Подключить к одному из радиомодулей датчик температуры (например, DS1820) и добиться передачи показаний с него на другой радиомодуль.
7. Используя FEC (регистры 0x39, 0x57 и 0x58), создать программное обеспечение двух модулей MASTER и SLAVE, посылающих кадры друг другу. Провести эксперимент, устанавливающий зависимость количества ошибок при передаче (FEC) от расстояния и от мощности выходного сигнала (от минимальной до максимальной) на открытом пространстве.

8. Создать программное обеспечение двух модулей MASTER и SLAVE, посылающих кадры друг другу. Провести эксперимент, устанавливающий зависимость скорости передачи данных от расстояния и от мощности выходного сигнала (от минимальной до максимальной) на открытом пространстве.
9. Провести эксперимент с целью узнать, что будет, если в TXPower писать недопустимые (незарезервированные) значения (0-63).
10. Написать программу установки уровня сигнала, при которой передача все еще устойчивая, но энергопотребление минимальное.
11. Написать программу, переводящую на некоторое время модуль SLAVE в режим пониженного энергопотребления. Доказать факт перевода экспериментально.
12. Передавать в эфир текущее значение напряжения батарей.
13. Написать программу sniffер кадров в эфире.



Благодарности

Авторы выражают благодарность рецензентам за полезные советы, Куроптевой Ирине Ивановне за помощь при редактировании пособия и Мошевикиной Виктории Валериевне за оформление обложки.

Издание подготовлено в рамках проекта "Научно-образовательный центр по фундаментальным проблемам приложений физики низкотемпературной плазмы" (RUX0-013-PZ-06), поддерживаемого Министерством образования и науки РФ, Американским фондом гражданских исследований и развития (CRDF) и Правительством Республики Карелия.

Учебное издание

МОЩЕВИКИН Алексей Петрович
КИПРУШКИН Сергей Альбертович
ЖИГАНОВ Евгений Денисович

БЕСПРОВОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Учебно-методическое пособие

Редактор *И. И. Куроптева*

Компьютерная верстка – *А. П. Мощевикин*

Подписано в печать 16.03.11. Формат 60 x 84 1/16. Бумага офсетная.
Уч.-изд. л. 2. Тираж 100 экз. Изд. № 31

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Отпечатано в типографии Издательства ПетрГУ

185910, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33

Мощевикин, А. П.

М876 Беспроводные технологии в информационно-измерительных системах : учебно-метод. пособие / А. П. Мощевикин, А. С. Кипрушкин, Е. Д. Жиганов. – Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2011. – 42 с.

ISBN 978-5-8021-1247-2

В предлагаемом пособии рассматриваются беспроводные информационно-измерительные системы. При этом более подробно изложена теория и представлены практические задания по одной из самых современных и быстроразвивающихся технологий nanoNET/nanoLOC. Издание адресовано студентам физико-технического факультета, обучающимся по программам бакалавриата и магистратуры.

УДК 681.324
ББК 32.973.202