

*А.В. Аладов¹, В.П. Валюхов², С.В. Демин³,
А.Л. Закгейм¹, А.Ф. Цацульников³*

¹ Научно-технологический центр микроэлектроники
и субмикронных гетероструктур РАН

² Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

³ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

БЕСПРОВОДНАЯ СЕТЬ УПРАВЛЯЕМЫХ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ОСВЕЩЕНИЯ

Приведены результаты разработки и практической реализации разветвленной сети управляемых светодиодных источников освещения, имеющей архитектуру стандарта IEEE 802.15.4. Сеть содержит физический уровень РНУ в виде радиочастотного трансивера с низкоуровневым механизмом управления и каналный субуровень MAC, обеспечивающий доступ к физическому каналу.

БЕСПРОВОДНАЯ СЕТЬ, IEEE 802.15.4 СТАНДАРТ, ПАКЕТ ДАННЫХ, ТЕСТИРОВАНИЕ, НАСТРОЙКА, УПРАВЛЕНИЕ, ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС.

Введение

Представляемая работа продолжает цикл публикаций, направленных на оптимизацию световой среды для жизнедеятельности человека в жилых и производственных помещениях. В статьях [1, 2] приведены результаты комплексной проработки и оптимизации энергоэффективных, динамически управляемых светодиодных источников освещения (ЭДУСИО) на основе новых технологий освещения и микроэлектронной светодиодной и микроэлектронной базы.

ЭДУСИО обеспечивают излучение белого света со спектрально-цветовыми и яркостными характеристиками, которые можно изменять во времени по заданной программе.

При создании сети ЭДУСИО, которая формирует устройство LR-WPAN (Low-Rate Wireless Personal Area Network), основная задача состоит в передаче сравнительно небольших объемов данных на небольшие расстояния, причем сеть должна иметь минимальное потребление, реализуя необхо-

димые схемы мониторинга и управления при решении светотехнических задач сети.

Наиболее перспективной в этом случае является технология построения ЭДУСИО на основе стандарта IEEE 802.15.4 и его программной надстройки ZigBee, которые описывают разные уровни классической схемы взаимодействия открытых систем.

Стандарт IEEE 802.15.4 описывает только два нижних уровня схемы: физический (РНУ) и каналный (MAC), в то время как спецификация ZigBee – это полный набор из семи уровней, обеспечивающий создание мониторинговых и управленческих сетей на базе стандарта.

Стандарт IEEE 802.15.4, на котором основана программная надстройка [3], оказался удачным, и многие фирмы-изготовители разрабатывают устройства на его основе. Вместе с тем, изделия с использованием технологии ZigBee находятся в стадии разработки и ряда пилотных внедрений. В мировой практике серийно выпускаемые системы с использованием технологии ZigBee встречаются нечасто. Это

обусловлено недостаточной проработкой базовой версии стека протоколов ZigBee, накладывающей ряд ограничений на его применение, в первую очередь, необходимостью стационарного питания промежуточных узлов-ретрансляторов. Кроме того, сертификация для ZigBee не относится к дешевым процессам (тестирование устройства, покупка диапазона MAC адресов и т. п.), что заставляет разработчиков экономить на использовании логотипа ZigBee.

Все вышеизложенное предопределило выбор технологии построения разветвленной сети ЭДУСИО на базе стандарта IEEE 802.15.4.

Архитектура IEEE 802.15.4

Архитектура стандарта IEEE 802.15.4 [4, 5] определяет ряд уровней, каждый из которых ответствен за одну часть стандарта и предоставляет услуги вышележащему уровню.

Устройство LR-WPAN представляет уровень РНУ, включающий радиочастотный (RF) трансивер с низкоуровневым механизмом управления, и субуровень MAC, обеспечивающий доступ к физическому каналу для всех типов передачи.

Физический уровень РНУ предоставляет информационный сервис РНУ и сервис управления, выполняющий контрольные функции и поддерживающий базу данных управляемых объектов, сопряженных с указанным физическим уровнем. Информационный сервис РНУ осуществляет передачу и прием через радиоканал протокольных блоков данных PPDU (Protocol Data Unit).

РНУ в сети ЭДУСИО решает следующие задачи:

- активацию и деактивацию радиотрансивера;
- выбор частоты канала;
- прием и передачу данных;
- оценку занятости канала CCA (Clear Chanel Assessment) для механизмов доступа CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance).

Радиооборудование работает на нелицензируемом частотном диапазоне 2400,0 – 2483,5 МГц, разрешенном для применения в Российской Федерации.

Используется O-QPSK (Offset Quadrature Phase-Shift Keying) модуляция и прямое расширение спектра DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum – метод формирования широкополосного RF-сигнала, при котором исходный двоичный сигнал преобразуется в псевдослучайную последовательность, используемую для модуляции несущей частоты). Это позволяет достичь низких значений отношений сигнал/шум и сигнал/интерференция. Приведем основные характеристики метода: частота – 2,00 Мчип/с, скорость передачи данных – 250 кбит/с, частота символов – 62,5 ксимволов/с, символы 16-агу – ортогональные; средняя частота каналов (F_c)

$$F_c = 2405 + 5(k - 11) \text{ МГц},$$

где k – номер канала, $k = 11 - 26$.

Низкое отношение сигнал/шум позволяет сигналам стандарта успешно сосуществовать с альтернативными источниками излучения на той же частоте (Wi-Fi, Bluetooth). В стандарте также предусмотрены каналы (15, 16, 21, 22), которые не пересекаются по частоте с конкурентами, что позволяет реализовать сеть даже в непосредственной близости от очень мощных источников излучения. Важным обстоятельством стандарта является тот факт, что в активном режиме радиоканал является полудуплексным, и доступ во времени возможен только к одному каналу. Так например, устройство, прослушиваемое на канале 15, не будет прослушиваться на каналах от 11 до 14 и от 16 до 26.

Субуровень MAC предоставляет информационный MAC-сервис и сервис управления MAC-уровнем; он обеспечивает интерфейс управления сетью и поддерживает базу данных объектов управления субуровня MAC. Информационный сервис MAC осуществляет прием и передачу протокольных блоков MAC-уровня (MPDU) с помощью информационного сервиса РНУ.

Модель передачи данных однозначно связана с топологией сети. В сети ЭДУСИО используется топология «звезда» [2], при этом возможны два вида коммуникаций передачи данных: во-первых, координатору (персональный компьютер (ПК)

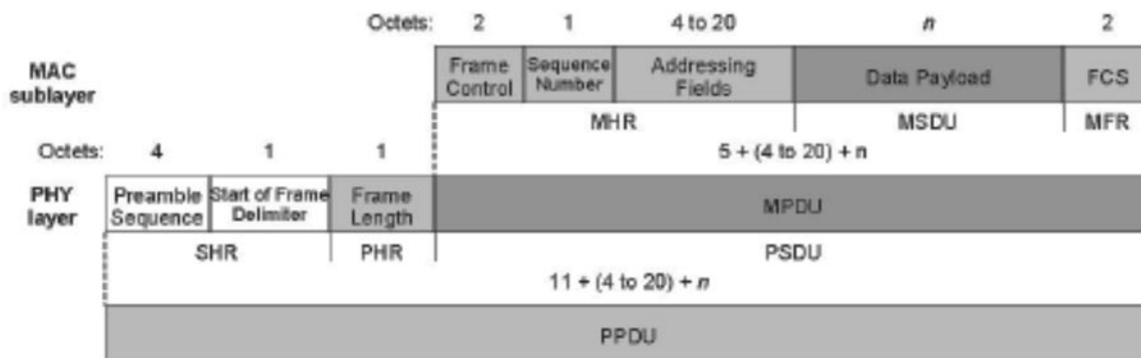


Рис. 1. Пакет данных и кадров физического уровня

или на пульт дистанционного управления (ПДУ)), которому передает информацию сетевое устройство (ЭДУСИО); во-вторых, от координатора к сетевому устройству.

ЭДУСИО представляет собой сеть PAN без поддержки маяков, в ней информационный кадр посылается координатору с использованием бездоменной схемы CSMA-CA.

Формат кадра данных

Структура информационного кадра, формируемого верхними слоями сетевой иерархии, показана на рис. 1.

Поле данных (Data Payload) передается на субуровень MAC и рассматривается как сервисный блок данных MAC MSDU (MAC Service Data Unit). Поле данных MAC имеет префикс MHR (MAC Header), далее следует MFR (MAC Footer). MHR содержит поле управления кадром (Frame Control), порядковый номер данных DSN (Data Sequence Number), адресные поля (Addressing Fields). MHR, MSDU и MFR образуют поле данных MAC кадра MPDU (MAC Protocol Data Unit). MPDU передается на физический уровень в виде PSDU (PHY Service Data Unit), который становится полем данных PHY. PSDU имеет префикс SHR (Synchronization Header), содержащий последовательность преамбулы (Preamble Sequence), поле SFD (Start of Frame Delimiter) и поле PHR (PHY Header), куда записывается длина поля данных PHY в октетах (Frame Length). Поля SHR, PHR и PSDU образуют пакет PHY PPDU (PHY Protocol Data Unit).

Формат PPDU

Каждый пакет PPDU включает в себя следующие элементы:

- заголовок синхронизации SHR, который позволяет принимающему устройству синхронизироваться с потоком бит;

- заголовок PHY (PHR, Frame Length), который содержит данные о длине кадра;

- поле данных PSDU переменной длины, которое несет в себе кадр субуровня MAC MPDU.

Длина полей преамбулы составляет 4 октета. Длина поля SFD для всех PHY несет в себе код 11100101. Длина кадра PHR равна 7 бит, причем зарезервирован 1 бит.

Таким образом, формат данных на уровне физической среды сети ЭДУСИО следующий:

- преамбула – 4 байта 0×00 ;
- стартовый байт $0 \times A7$;
- длина кадра – 1 байт (включая контрольную сумму CRC16);
- данные должны содержать не более 127 байт.

Общий формат кадра MAC формируется полями MHR, полем данных MAC payload и MFR (рис. 2).

Поля MHR следуют в фиксированном порядке, однако адресные поля могут отсутствовать в некоторых кадрах.

Frame control. Это поле управления кадром (его формат показан на рис. 3). Оно имеет 2 октета, содержит информацию, определяющую тип кадра (Frame type), адресные поля Destination addressing mode (режим адреса назначения) и Source addressing mode (режим адреса отправителя),

Octets: 2	1	0/2	0/2/8	0/2	0/2/8	variable	2
Frame control	Sequence number	Destination PAN identifier	Destination address	Source PAN identifier	Source address	Frame payload	FCS
		Addressing fields					
MHR						MAC payload	MFR

Рис. 2. Общий формат кадра MAC

а также другие флаги управления.

Вопросы безопасности в сети ЭДУСИО не рассматриваются, поскольку требование низкой стоимости приводит к ограничениям вычислительной мощности и оперативной памяти. Безопасность связана с избыточностью программного обеспечения и обычно реализуется на более высоких сетевых уровнях.

Frame type. Это субполе типа кадра; оно имеет 3 бита (b_2, b_1, b_0) и принимает значение 001-Data (данные).

Security enabled. Это субполе включения безопасности; оно имеет длину 1 бит и устанавливается равным нулю.

Frame pending. Это субполе выдержки кадра в сети ЭДУСИО; оно содержит нуль при передаче и игнорируется при получении.

Acknowledgment request. Это субполе запроса подтверждения; оно содержит нуль, и получатель не должен посылать подтверждение.

Intra-PAN. Это субполе сжатия PAN-ID; оно равно нулю, и в присутствии адреса отправителя и получателя кадр данных будет содержать поля идентификаторов PAN как

отправителя, так и получателя (Source PAN identifier и Destination PAN identifier).

Destination addressing mode, Source addressing mode. Это субполя режимов адресов назначения и отправителя; они имеют длину 2 бита каждый и содержат значения $b_1, b_2 - 10$ с описанием «Адресное поле содержит 16-битный короткий адрес».

Если все вышеописанные субполя содержат нули, а субполе Frame type принимает значение 001 (Data – данные, вариант ЭДУСИО), то субполя Destination addressing mode и Source addressing mode будут не равны нулю. Это указание на то, что кадр исходит от координатора PAN с идентификаторами, находящимися в поле идентификатора PAN отправителя и в поле идентификатора PAN места назначения соответственно.

Sequence number. Поле порядкового номера (см. рис. 2) имеет размер в 1 октет и определяет порядковый номер кадра DSN.

Destination PAN identifier. Поле PAN-идентификатора места назначения имеет размер 2 октета и характеризует уникальный PAN-идентификатор получателя кадра. Значение $0 \times \text{FFFF}$ в данном поле означает

Bits: 0-2	3	4	5	6	7-9	10-11	12-13	14-15
Frame type	Security enabled	Frame pending	Ack. request	Intra-PAN	Reserved	Dest. addressing mode	Reserved	Source addressing mode

Рис. 3. Формат поля управления кадром (см. пояснения в тексте)

широковещательный PAN-идентификатор, который прослушивается всеми устройствами. Это поле включается в MAC-кадр, если субполе Destination addressing mode поля Frame control не равно нулю.

Destination address. Поле адреса места назначения имеет 2 октета, в соответствии со значением в субполе Destination addressing mode поля Frame control. Оно характеризует адрес получателя кадра. 16-битное значение $0 \times \text{FFFF}$ этого поля означает широковещательный короткий адрес, воспринимаемый всеми устройствами. Это поле включается в MAC-кадр, если субполе режима адреса места назначения в поле управления кадра не равно нулю.

Source PAN identifier. Поле PAN-идентификатора отправителя имеет длину 2 октета и характеризует уникальный идентификатор PAN-устройства, пославшего кадр. Это поле будет включено в MAC-кадр, если субполя Source addressing mode и Intra-PAN не равно нулю и равно нулю в поле Frame control, соответственно.

Source address. Это поле адреса отправителя имеет 2 октета, в соответствии со значением субполя Source addressing mode в поле Frame control и определяет адрес источника кадра. Это поле включается в MAC-кадр, если субполе Source addressing mode не равно нулю.

Frame payload. Это поле данных кадра (см. рис. 2); оно имеет переменную величину и содержит информацию для определенных типов кадра.

Практическая реализация сети ЭДУСИО

Беспроводная сеть ЭДУСИО содержит следующие компоненты:

оконечные устройства (светильники), роль которых выполняют светодиодные источники освещения;

ПДУ, который координирует сеть и управляет ее работой во всех режимах;

ПК, также выполняющий функцию координатора сети при настройке сети и некоторых режимах ее работы.

Сам ЭДУСИО включает в себя следующие устройства:

источник питания для режима ожидания (standby);

основной источник питания мощностью 40 Вт;

драйверы управления питанием светодиодов;

светодиодные линейки с девятью последовательно включенными светодиодами.

В зависимости от требований к качеству белого света число линеек диодов варьируется от 4 до 6.

Анализ всех индексов передачи показывает, что вполне удовлетворительные результаты обеспечивают четырехцветные версии цветосмещения RGBA и RGBW [2]. Для синтеза высококачественного белого света в широком диапазоне температур $T_c = 2500 - 10000$ К оптимальным является набор из пяти спектральных полос полупроводниковых светодиодов. Выбор пятицветного светодиодного модуля обусловлен стремлением повысить и выровнять частные индексы цветопередачи для каждой цветовой температуры T_c и акцентирования некоторых цветов для специальных условий освещения (микроскопия, помещения для хирургии и музеев).

Оптическая схема с элементами, обеспечивающими необходимую диаграмму излучения, требования к охлаждению светильника определяют его конструкцию — стандартный механический модуль — радиатор с вентилятором, площадки которого являются местом размещения печатных плат, оптических элементов, а также деталей корпуса ЭДУСИО. Кроме этих функций, радиатор с вентилятором стабилизирует тепловой режим ЭДУСИО.

Программное обеспечение ЭДУСИО предусматривает возможности аварийного отключения при превышении температуры радиатора, заданной условиями эксплуатации, и регулирования скорости вращения вентилятора (в случае необходимости).

ПДУ выполнен в виде блока, который вставляют в розетку сети электропитания, с цветным TFT-индикатором (размер диагонали — 3,5") и с клавиатурой, состоящей из шести кнопок. ПДУ обеспечивает дискретное задание устанавливаемых цветовых температур, яркости каждой линейки светодиодов, а также режима или времени суток

его изменения. Микроконтроллер имеет в своем составе кварцевые часы.

ПДУ должен обеспечивать управление ЭДУСИО на расстоянии до 35 м. Дальность передачи данных беспроводной сети определяется чувствительностью приемника, мощностью передатчика и наличием помех (препятствия, в том числе стены, и другие источники радиосигнала).

Схемотехника и технические характеристики RF-каналов ПДУ и управляющего микроконтроллера ЭДУСИО полностью идентичны, вследствие применения устройства ZigBit 2,4 ГГц Single chip Wireless Module ATZB-S1-256-3-0-C [6, 7], которое поддерживает стандарт IEEE 802.15.4. Высокая чувствительность приемника (-97 дБм при вероятности ошибки PER = 1 %) и оптимальная выходная мощность передатчика ($+3$ дБм) обеспечивают уникальный бюджет линии (до $100,6$ дБ). Дальность действия радиоканала в открытом пространстве, в зоне прямой видимости, при расположении трансивера на высоте $0,5$ м от уровня земли, составляет $170 - 570$ м. При этом предполагаются различные комбинации ориентации (поляризации) передатчика и приемника и специальные условия при минимальном или полном отсутствии интерференции от других источников. Реальные условия эксплуатации приводят к появлению многолучевых отражений от препятствий, интерференции и других факторов, которые существенно снижают дальность действия радиоканала.

Электропитание ПДУ осуществляется от электросети с потребляемой мощностью в режиме «Программирование» не более 5 Вт, в рабочем режиме — $0,5$ Вт.

Так как управление сетью ЭДУСИО от ПДУ связано с круглосуточным режимом работы, актуальным является уменьшение потребляемой мощности в режиме standby. Проблема решена разработкой блока питания для передатчика с микроконтроллером как для ПДУ, так и для ЭДУСИО; последний в режиме приема потребляет $60 - 80$ мВт, а в режиме standby — $(1 - 5)$ мкВт. Низкие значения энергопотребления обусловлены малыми токами микроконтроллера ATZB-S1-256-3-0-C: они составля-

ют $9,6$ мА, $16,4$ мА и $0,6$ мкА в режимах приема, передачи и standby соответственно. Преобразователь AC/DC ПДУ аналогичен преобразователю standby AC/DC ЭДУСИО, выполнен на микросхеме UPLNK574 и обеспечивает ультрамалое потребление ПДУ при круглосуточной работе.

В сети ЭДУСИО используются три типа укороченных адреса: индивидуальный заводской, ширококвещательный и групповой.

Приведем описание передаваемых сообщений в сети ЭДУСИО.

Поиск устройств сети. Координатор сети (ПК) передает запрос с ширококвещательным адресом места назначения (с идентификатором PAN = $0 \times FFFF$ и адресом устройства $0 \times FFFF$). Адрес источника (ПК) может быть любым. Все ЭДУСИО, получив запрос, посылают пакет данных по адресу координатора сети (ПК) с указанием идентификатора сети (PAN) и индивидуального заводского адреса ЭДУСИО. Передача осуществляется бездоменным механизмом CSMA-CA. В результате поиска получается таблица устройств, находящихся в зоне радиодоступности.

Передача информации по управлению. Координатор сети (ПК) передает информацию, относящуюся к управлению ЭДУСИО, по любому адресу из полученной таблицы. Контроль работы осуществляется визуально (без подтверждения).

Подключение устройства к группе. Каждое устройство, получив по своему заводскому адресу команду подключения к группе, запоминает идентификатор сети (PAN ПК).

Передача управляющей информации по групповому адресу. Данная передача по адресу $0 \times FFFE$ выполняется для всех устройств с выбранным идентификатором сети группы (без подтверждения). Таким образом, число возможных групп независимо управляемых ЭДУСИО составляет $65\,534$ (исключены адреса 0×0000 и $0 \times FFFF$).

Программное обеспечение сети ЭДУСИО

Программное обеспечение (ПО) сети позволяет реализовать следующие режимы работы:

управление, возможное с ПДУ, разветвленной сетью ЭДУСИО по радиоканалу в круглосуточном энергосберегающем режиме;

программирование на стадиях изготовления ПДУ и ЭДУСИО уникального заводского адреса для каждого устройства для формирования сети в процессе эксплуатации;

тестирование ЭДУСИО и настройка сети от ПК, при этом ПДУ заменяется ПК с USB-адаптером фирмы Atmel ATZB-X-233-USB;

программирование режимов работы и установка программы в ПДУ, с подключением ПК через адаптер ATZB-X 233-USB.

Программное обеспечение включает в себя определенный набор программ. Далее представлен их перечень.

1. Управление ЭДУСИО – «RGB_Lamp.c»
2. Управление ПДУ – «PDU.c»
3. Управление мостом USB-радиоканал – «Bridge_USB.c»
4. Формирование файла заводского номера устройства – «PC_Address.exe»
5. Формирование и настройка сети

ЭДУСИО – «PC_Net.exe»

6. Формирование режимов работы ЭДУСИО и запись их в ПДУ – «PC_PDU.exe»

Программно-аппаратный комплекс предназначен для обеспечения совместной работы ПК, ЭДУСИО и ПДУ по их тестированию, настройке и управлению, а также настройке управлению сетью.

Программы управления «PC_PDU.exe», «PC_Address.exe» и «PC_PDU.exe» предназначены для работы на ПК и разработаны на языке С в среде Measurement Studio Lab Windows/CVI 2013 фирмы National Instruments. Каждая программа поставляется в каталогах соответственно cvidistkit_PC_PDU, cvidistkit_PC_Address и cvidistkit_PC_Net. Инсталляция программ осуществляется при запуске программы setup.exe.

Работа с программой PC_Net

Для работы используется PC и адаптер ATZB-X-233-USB. После выбора требуемого COM-порта появляется основное окно (рис. 4), на котором отображаются адреса отправителя (компьютера) и места назначения (ЭДУСИО), а также идентификаторы сети и адреса узла.

При включенных ЭДУСИО в режиме

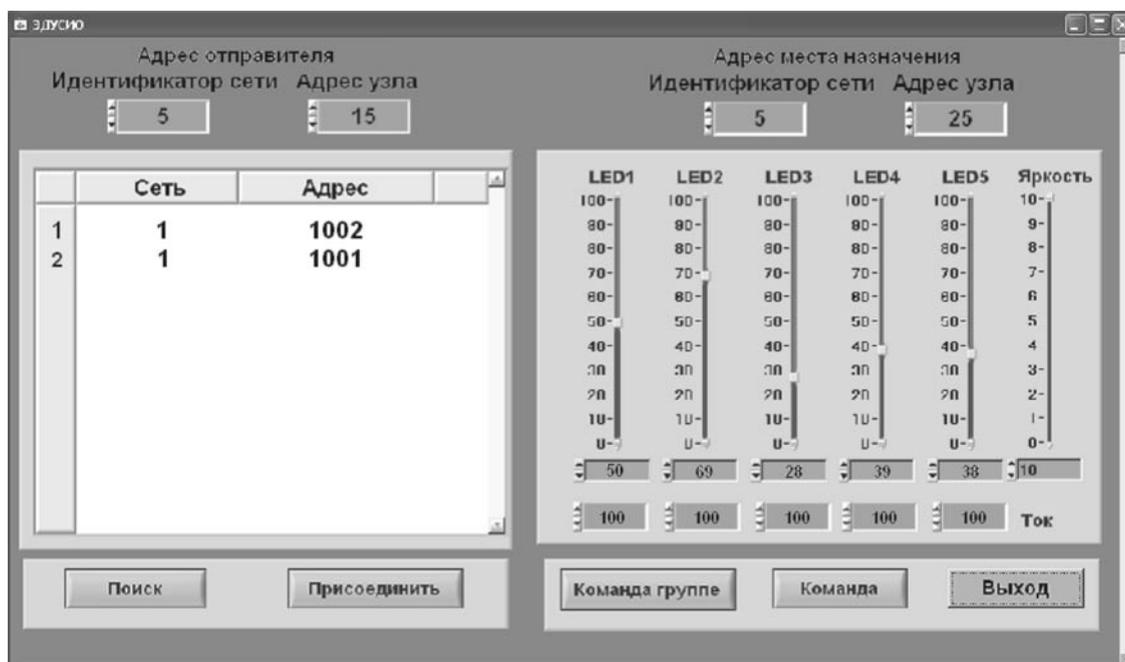


Рис. 4. Основное окно программы PC-Net; (LED 1 – 5) – 5 линеек светодиодов

«Поиск» в левом окне появляется таблица ответивших ЭДУСИО, которые прислали свои сетевые характеристики: 16-разрядный адрес сети, к которой они присоединены и 16-разрядный индивидуальный заводской адрес.

Адрес сети и устройства отображаются в виде 0×0001 и 0×1002 . Все адреса ЭДУСИО начинаются с 0×1000 , ПДУ – с 0×4000 . При выборе требуемого устройства в адресе места назначения появится идентификатор сети и адрес выбранного устройства. В режиме «Команда» устанавливаются значение ШИМ и ток каждой линейки светодиодов (значения идентификатора сети и адрес источника не имеют значения).

При объединении ЭДУСИО в группу, все ЭДУСИО имеют заводской адрес и выполняют команды по групповому адресу $0 \times FFFE$ и выбранному адресу сети. Для присоединения ЭДУСИО к группе необходимо выбрать ЭДУСИО ($PAN_i = 0 \times 0001$, A_i – заводской), установить требуемый адрес группы (PAN-группы) в поле идентификатора сети адреса отправителя, вызвать команду «Присоединить». При равенстве

идентификатора сети источника и установленного адреса группы, все ЭДУСИО будут одновременно выполнять команды в режиме «Команда группе», при этом режим «Команда» остается прежним.

Работа с программой PC_PDU

Программа PC_PDU предназначена для управления ЭДУСИО и записывается в ПДУ с использованием ПК и адаптера ATZB-X-233-USB. После выбора соответствующего COM-порта появляется интерфейс основного окна (рис. 5).

Программа позволяет изменять данные ячеек таблицы диапазона изменения следующих физических величин (см. рис. 5):

- времени (часы, минуты, секунды);
- цветовой температуры (от 2500 до 10000 К с дискретностью 200 К);
- яркости (от 0 до 100 %).

Ячейки «Команда» принимают три варианта:

выключить;

наклон (изменение параметра режима от данной строки до следующей происходит плавно);

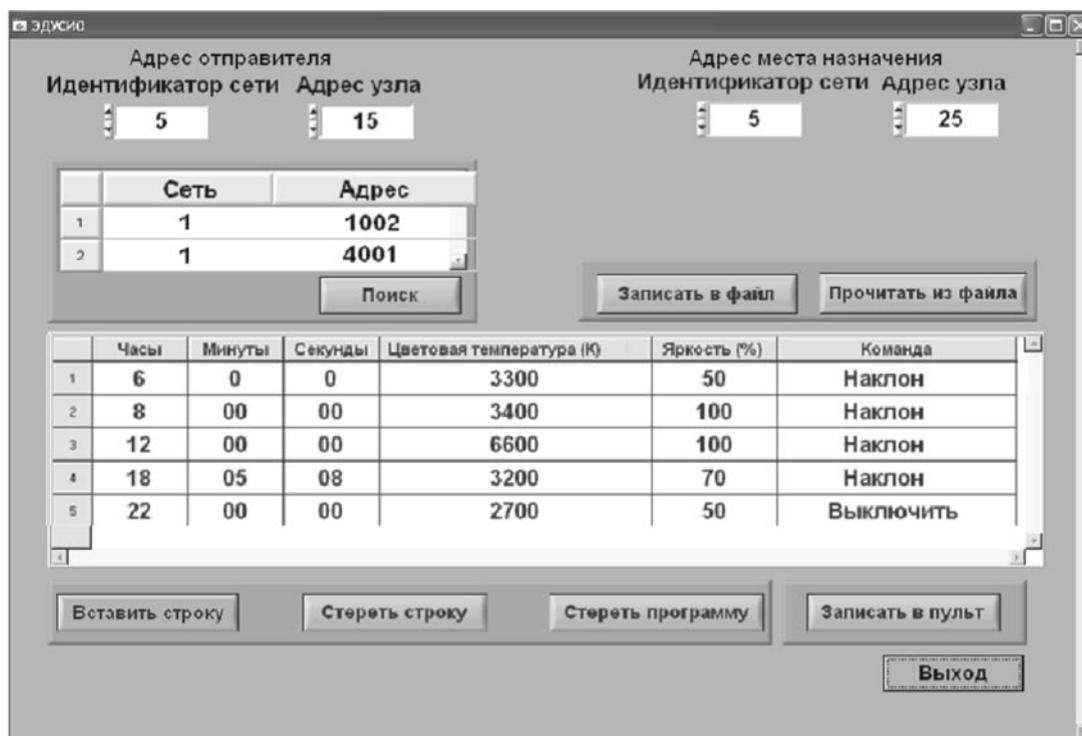


Рис. 5. Основное окно программы

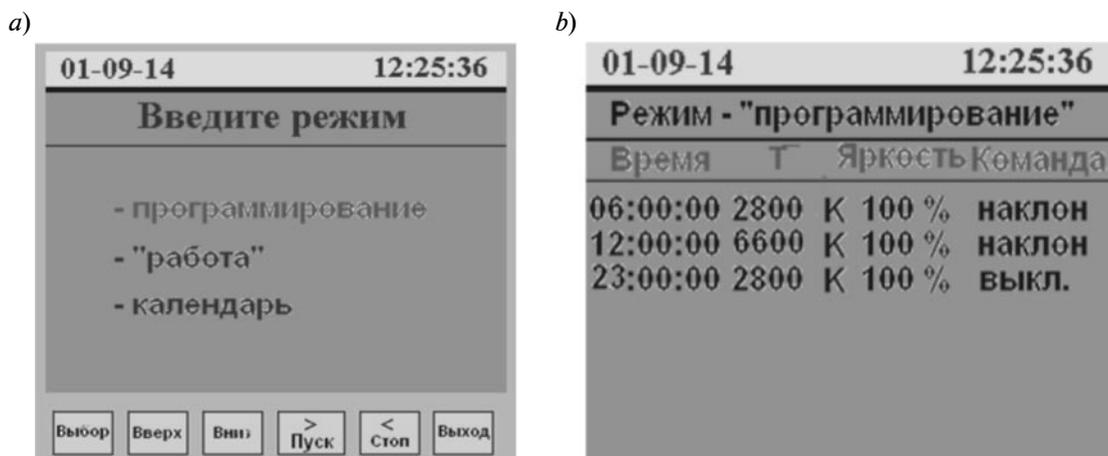


Рис. 6. Экран ПДУ с исходным интерфейсом (a) и в режиме программирования (b)

уровень (изменения параметра режима от данной строки до следующей не происходит, при достижении времени следующей строки режим изменяется скачком).

При записи программы в ПДУ, последний должен находиться в режиме «Программирование». В режиме «Поиск» первая строка соответствует ЭДУСИО, а вторая – ПДУ (адрес начинается с 0x4000). При отметке второй строки адреса ПДУ переписутся в адреса места назначения. В режиме «Записать в пульт» (см. рис. 5) программа появится на экране ПДУ. Программа сохраняется в ПДУ в энергозависимой памяти, и при включении питания ПДУ не стирается.

Работа с программой PC_ Address

Шестнадцатиразрядный уникальный адрес (для ЭДУСИО в диапазоне от 0x1001 до 0x3FFF, для ПДУ – от 0x4001 до 0x4FFF) в режиме «Создать файл» помещается в файле XXXX.hex. Запись адреса в микроконтроллер осуществляется в пакете разработки Atmel Studio 6.2 через адаптер Atmel-ICE фирмы Atmel в пользовательскую сигнатурную область памяти и не изменяется при стирании памяти программы.

Работа с пультом дистанционного управления

Интерфейс ПДУ представлен на рис. 6.

В левом верхнем углу отображается дата, в правом – текущее время внутренних часов. В нижней части пульта расположены шесть кнопок (рис. 6, a). ПДУ обеспечивает три режима работы сети: «Программирование», «Работа» и «Календарь».

В режиме «Работа» отображается время, температура, яркость и значение выполняемой команды (рис. 6, b).

Заключение

В представленной статье рассмотрены вопросы практической реализации разветвленной беспроводной сети энергоэффективных светодиодных источников освещения (ЭДУСИО) на основе стандарта IEEE 802.15.4, который предоставляет сервис пакетной передачи данных физического уровня РНУ и канального МРС-субуровня. Разработан программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий тестирование, настройку и управление сетью в различных режимах работы. Даются практические рекомендации по эксплуатации сети ЭДУСИО.

Предлагаемая разработка открывает новые возможности создания благоприятной для человека световой среды, которая оказывает положительное воздействие на его функциональное состояние.

Исследования выполнены в рамках проекта Минобрнауки (контракт № 02.G2531.0014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Аладов А.В., Аладов В.Н., Валухов В.П., Закгейм А.Л., Цацульников А.Ф. Светозология и новые технологии освещения // Архитектура и строительные науки. 2014. Вып. 1, 2 (18, 19). С. 2–5.
- [2] Аладов А.В., Аладов В.Н., Валухов В.П., Закгейм А.Л., Цацульников А.Ф. Динамически управляемые светодиодные источники света для новых технологий освещения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2014. № 4 (206). С. 38–47.
- [3] Баранова Е. IEEE 802.15.4 и его программная надстройка ZigBee. 2008. Режим доступа: www.telemultimedia.ru/art.php?id=292.
- [4] IEEE 802.15.4 Part 15.4. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY Specification for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). 2003. Режим доступа: user.engineering.uiowa/~mcover/lab/802.15.4-2003.pdf.
- [5] Семенов Ю.А. 4.1.8.7 Беспроводные сети ZigBee и IEEE802.15.4. Yu. Semenov (ИТЕР-МИРТ). Режим доступа: <http://book.iterp.ru/4/41/zigbee.htm>.
- [6] ZigBee Specification. Document 053474r20. Режим доступа: http://www.zigbee.org/en/members_area/documents/ZigBeeSpecifications/1.ZigBee%20Specification/docs-05-3474-20-0csg-zigbee-specification.pdf.
- [7] Atmel ZigBit 2.4.GHz Single chip wireless-module ATZB-S1-256-3-0C [Datasheet]. Режим доступа: http://www.atmel.com/images/atmel-42191-wireless-zigbit-atzb-s1-256-3-0-c_datasheet.pdf.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АЛАДОВ Андрей Вальменович – старший научный сотрудник Научно-технологического центра микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН.
194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
aaladov@mail.ioffe.ru

ВАЛЮХОВ Владимир Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры радиофизики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.
195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
Valyukhov@yandex.ru

ДЕМИН Сергей Васильевич – заведующий лабораторией Научно-технологического центра микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН.
194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
demin@mail.ioffe.ru

ЗАКГЕЙМ Александр Львович – кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе Научно-технологического центра микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН.
194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
zakgeim@mail.ioffe.ru

ЦАЦУЛЬНИКОВ Андрей Федорович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН.
194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
andrew@beam.ioffe.ru

Aladov A.V., Valyukhov V.P., Demin S.V., Zakgeim A.L., Tsatsul'nikov A.F.
THE WIRELESS NETWORK OF CONTROLLED ENERGY-EFFECTIVE LED LIGHTING SOURCES.

This article is the result of works on the treatment and the practical realization of a branching WPAN of the LED controlled energy-efficient light sources having the architecture of the IEEE 802.15.4 Standard (MAC and PHY layers). Either of the two layers provide a means for rendering the data and the management services for the transmission and the reception of the PHY protocol data units. This WPAN comprises an five-color emitting module with a control processor, power drivers, and a controlling part with appropriate

software and a short-range 2.4 GHz radio-frequency channel for information exchange with an emitting module. Star is used as the basis for the network formation. As a coordinator PAN would allow the option of using either PC or the remotely controlled desk. Such a PAN configuration provides to conduct a test mode, installation, a control and micro-program store in the desk or LED light sources. In a round-daily energy-saving mode the PAN operates under a program with the desk. A software development which consists of six programs for all transfer types in the PAN was made.

IEEE 802.15.4, LEDS, WPAN, RF CHANNEL, PHY PROTOCOL DATA UNITS, EMITTING MODULE, POWER DRIVER, DESK, SOFTWARE DEVELOPMENT.

REFERENCES

- [1] **A.V. Aladov, V.N. Aladov, V.P. Valyukhov, A.L. Zakgeim, A.F. Tsatsulnikov**, *Svetoekologiya i novye tekhnologii osveshcheniya [Light ergonomics and new lighting technologies]*, *Arkhitectura I stroitel'nye nauki*. 1, 2 (18, 19) (2014) 2–5.
- [2] **A.V. Aladov, V.P. Valyukhov, A.L. Zakgeim, A.E. Chernyakov, A.F. Tsatsulnikov**, *Type LED dynamically controlled light sources for novel lighting technology*, *St. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*. 4 (206) 2014 38–47.
- [3] **E. Baranova**, *IEEE 802.15.4 i ego programmnaya nadstroika ZigBee [IEEE 802.15.4 and ZigBee specification]*, 2008. Available at: www.telemul-timedia.ru/art.php/?id=292.
- [4] *IEEE 802.15.4 Part 15.4. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*. 2003. Available at: user.engineering.uiowa/~mcover/lab/802.15.4-2003.pdf.
- [5] **Yu. Semenov**, *4.1.8.7 Besprovodnye seti ZigBee i IEEE 802.15.4 [4.1.8.7 wireless ZigBee and IEEE 802.15.4 networks]*. Available at: <http://book.itep.ru/4/41/zigbee.htm>.
- [6] *ZigBee Specification. Document 053474r20*. Available at: http://www.zigbee.org/en/members_area/documents/ZigBeeSpecifications/1.ZigBee%20Specification/docs-05-3474-20-0csg-zigbee-specification.pdf.
- [7] *Atmel ZigBit 2.4.GHz Single chip wireless-module ATZB-S1-256-3-0C [Datasheet]*. Available at: http://www.atmel.com/images/atmel-42191-wireless-zigbit-atzb-s1-256-3-0-c_datasheet.pdf.

THE AUTHORS

ALADOV Andrei V.

Submicron Heterostructures for Microelectronics Research and Engineering Center of the RAS
26 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation
aaladov@mail.ioffe.ru

VALYUKHOV Vladimir P.

St. Petersburg Polytechnic University
29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
Valyukhov@yandex.ru

DEMIN Sergei V.

Submicron Heterostructures for Microelectronics Research and Engineering Center of the RAS
26 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation
demin@mail.ioffe.ru

ZAKGEIM Alexander L.

Submicron Heterostructures for Microelectronics Research and Engineering Center of the RAS
26 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation
zakgeim@mail.ioffe.ru

TSATSULNIKOV Andrei F.

Ioffe Physical-Technical Institute
26 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation
andrew@beam.ioffe.ru