**Низкая стоимость, высоко масштабируемое беспроводное сетевое решение для обеспечения "умного" управления светодиодным освещением в "зеленых" зданиях**

Сокращение спроса на энергию в жилых и промышленных секторах является важной задачей во всем мире. В частности, освещение составляет значительную часть общего потребления энергии, и, к сожалению, огромное количество этой энергии теряется. Диодные (светодиодные) лампы используются для освещения офисов, домов, промышленных или сельскохозяйственных объектов более эффективно, чем традиционные лампы. Кроме того, системы управления светом вводятся на текущие рынки, поскольку установленные системы освещения устарели и энергонеэффективны. Однако из-за высоких затрат, проблем с установкой и сложности обслуживания существующие системы управления светом не применяются к домашним, офисным и промышленным зданиям. В этом документе предлагается недорогая, беспроводная, простая в установке, адаптируемая и интеллектуальная система светодиодного освещения для автоматической регулировки интенсивности света для экономии энергии и поддержания удовлетворенности пользователей. Система объединяет датчики движения и световые датчики в маломощном беспроводном решении с использованием связи Zigbee. В настоящем документе представлен дизайн и внедрение предлагаемой системы в реальном развертывании. Для проверки эффективности и экономии электроэнергии в нескольких сценариях погодных условий были проведены измерения общего энергопотребления в течение непрерывного шестимесячного периода (зима-лето) занятого офиса. Предлагаемая интеллектуальная система освещения уменьшает общее потребление энергии в сценарии применения на 55% в течение шести месяцев и до 69% в весенние месяцы. Эти цифры также учитывают индивидуальные предпочтения пользователя.

Индексные термины - сети наложения, беспроводные сенсорные сети, силовая электроника, светодиодное освещение, управление питанием, энергоэффективность.

Рукопись получена 5 августа 2014 года; пересмотрен 26 ноября 2014 года; принята 2 декабря 2014 года. Дата публикации 22 декабря 2014 года; дата текущей версии 1 апреля 2015 года. Ассоциированным редактором, координирующим рассмотрение этого документа и одобряющим его для публикации, был доктор Виктор Грюев.

М. Магно и Л. Бенини находятся в Отделе электротехники, электронной и информационной инженерии, Болонский университет, Болонья 40126, Италия, а также Швейцарский федеральный технологический институт Цюрих, Цюрих 8092, Швейцария (электронная почта: michele. magno@iis.ee.ethz.ch; luca.benini@unibo.it).

Т. Полонелли работает в отделе электротехники, электроники и информатики Университета Болоньи, Болонья 40126, Италия (e-mail: tommaso.polonelli@studio.unibo.it).

Э. Поповичи - отдел электротехники и электроники, Университетский колледж Корк, Корк, Ирландия (e-mail: e.popovici@ucc.ie).

Цветовые версии одной или нескольких фигур в этой статье доступны в Интернете по адресу http://ieeexplore.ieee.org.

Цифровой идентификатор объекта 10.1109 / JSEN.2014.2383996

1. **Вступление**

Энергетическая экономия и экологическая осведомленность - горячая тема в текущих исследованиях. Фактически, выбросы углекислого газа (CO2) сильно связаны с потреблением энергии, это происходит от сжигания углеводородов (нефти, природного газа и угля) либо напрямую (транспорт и отопление), либо от выработки электроэнергии на электростанциях [1]. Системы освещения являются основным источником потребления электроэнергии в мире. В Европе объем электроэнергии, потребляемой для освещения зданий значителен и составляет около 40%, и приводит к примерно 35% выбросов углекислого газа [2]. В последние годы Евросоюз ЕС активно продвигал политические кампании в направлении повышения энергоэффективности. В то время как предыдущие исследования и промышленные работы показали, что простые средства управления освещением, использующие датчики движения, такие как датчики PyorelectricInfraRed (PIR), эффективны для уменьшения количества электрической энергии, используемой для освещения зданий, передовые стратегии управления освещением имеют потенциал для достижения еще большей энергоэкономичности, лучшего качества обслуживания и предлагают множество преимуществ по сравнению с простым управлением вкл / выкл. Однако до настоящего времени более эффективные стратегии управления, такие как уменьшение яркости в соответствии с дневным освещением или сбросом нагрузки, которые требуют более системного подхода, были менее успешными. Это особенно связано с высокой стоимостью установки и обслуживания и невозможностью дооснащения [3].

С технологической стороны светоизлучающий диод (LED) быстро становится широко используемой твердотельной технологией источника света в общем освещении. Это связано с его более длительным сроком службы, сниженным потреблением энергии и отсутствием содержания ядовитой ртути по сравнению с обычными люминесцентными лампами [4], [5]. Кроме того, регулирование яркости часто требуется для регулирования уровней освещения для индивидуальных потребностей человека или предпочтений, а также для достижения экономии энергии. Новые драйверные системы улучшают функции регулировки яркости для достижения этой цели и становятся все более коммерчески доступными. Эта новая технология повышает интерес к управлению светом для снижения энергопотребления. Рынок средств контроля освещения в жилых и коммерческих зданиях вступил в период драматической трансформации. Требование как для беспроводных, так и для местных органов управления, таких как датчики занятости; фото датчики; и сетевые элементы управления повышаются, и уровень внедрения систем освещения СИД также начинает расти. Согласно новому отчету Navigant Research, мировой доход от сетевых средств контроля освещения будет расти с 1,7 млрд. Долл. США в год в 2013 году до более чем 5,3 млрд. Долл. США к 2020 году [6].

С развитием технологии беспроводной сенсорной сети (WSN) теперь стало проще, чем когда-либо, контролировать дома, офисы и промышленные здания. WSN - это задняя часть большого числа приложений для киберфизических систем (CPS) в области мониторинга окружающей среды, здравоохранения, безопасности, и промышленных доменов, среди прочего, благодаря гибкому распределению устройств WSN [7] - [9]. Каждое устройство представляет собой сетевой узел, который объединяет вычислительную, беспроводную связь, управление питанием и чувствительность, чтобы собирать и обрабатывать данные с датчиков, обычно объедененные для координации действий [10]. WSN в сочетании со светодиодными лампами и новыми драйверами уменьшает потребление мощности освещения в нескольких сценариях приложения на несколько порядков [11]. WSN имеет потенциал для достижения недорогой и сверхвысокой энергосберегающей системы. Однако особое внимание должно быть уделено в процессе проектирования аппаратного и программного обеспечения. Например, важно разрабатывать узлы беспроводных датчиков низкой мощности с небольшим форм-фактором и стоимостью, которые могут быть легко установлены внутри корпуса. Эти функции позволяют подключать будущие встроенные устройства к драйверам, добавлять беспроводную связь и «умные» возможности для достижения автоматизированной или дистанционно управляемой системы. Новый драйвер можно контролировать с помощью распределенных датчиков в окружающей среде, чтобы повысить качество управления, снижая потребление энергии и повышая качество обслуживания. Управление освещением становится быстрым и насыщенным, выходящим за пределы включения / выключения, затемнением, изменением цвета (или цветовой температуры) и настройкой сцены, с интеллектом для реагирования на настроение и активность человека и адаптацией к условиям и сценариям.

Содержание этого документа заключено в следующем:

• Методика развертывания сетей датчиков малой мощности для повышения энергопотребления светодиодных ламп с использованием новой архитектуры аппаратного обеспечения сверхнизкой мощности и интеллектуального распределенного алгоритма. Концепция использования световых сенсоров и WSN в управлении светодиодами не нова, но использование ее для непосредственного управления светодиодным драйвером с распределенным интеллектом и возможностью модернизации является новым вкладом.

• Экспериментальная валидация предлагаемого подхода. Характеристика энергопотребления панелей в соответствии с уменьшением яркости и средним снижением энергии. Представлено реальное, долгосрочное развертывание.

Остальная часть этого документа организована следующим образом: Раздел II описывает недавнюю сопутствующую работу в этой области. В разделе III описаны модели и устройства предлагаемого подхода, описывающие узлы и сетевые архитектуры соответственно. В разделе IV представлены алгоритмы, реализованные во всей системе. В разделе V описывается внедренный подход, а также измерения, сравнительная оценка и валидация. Раздел VI завершает работу.

1. **Cопутствующая работа**

Исследования в области мониторинга, контроля и энергоэффективности в области освещения были плодовитыми в последние годы; с множеством предлагаемых решений и методов. Два основных подхода - проводные и беспроводные системы. Проводные управляемые системы освещения могут измерять искусственное и дневное освещение посредством использования датчиков в сети контроллера [12] или набора устройств регистрации данных [13] для изменения интенсивности света и, следовательно, его потребления энергии. Однако из-за наличия пучков кабеля для передачи данных проводные устройства намного дороже, особенно из-за установки и обслуживания. Кроме того,проводная система ограничена дооснащением существующей световой системы в зданиях. Чтобы преодолеть стоимость и проблемы установки, беспроводные технологии стали более популярной альтернативой в области управления энергией, мониторинга и контроля в зданиях. WSN - это обеспечивающая технология для управления энергопотреблением, поскольку она намного проще и гибко в установке и внедрении, чем в проводных сетях. Используя комбинацию усовершенствованных средств управления на основе WSN и светодиодных осветительных систем с сетью постоянного тока, выгодные функции, генерируемые этой комбинированной технологией, должны привести к большей экономии энергии на стороне спроса зеленого "умного" здания [14].

Недавно беспроводные сенсорные сети были применены к энергосберегающим приложениям, таким как управление светом [15], [16]. В [16] изучался компромисс между потреблением энергии и удовлетворенностью пользователей использованием световых контролей. Авторы применили функции утилит, которые учитывали предпочтения пользователей и предпочтения пользователей, чтобы освещение можно было настроить так, чтобы максимизировать общие утилиты. Однако он не учитывал тот факт, что люди могут потребовать разные уровни освещенности для разных видов деятельности. Логика систем управления освещением может включать такие факторы, как интенсивность дневного света, которые могут быть измерены светочувствительными датчиками [17]. В [18] авторы определили несколько пользовательских требований и стоимость функций. Их цель состояла в том, чтобы так отрегулировать освещение, чтобы свести к минимуму общую стоимость поставляемой энергии. Однако результат был применен к системам развлечений и медиапроизводства, а не к зданиям. В [19] вводится световой контроль с использованием беспроводных датчиков для снижения потребления энергии в коммерческих зданиях. В этих предыдущих работах осветительные приборы настраиваются в зависимости от интенсивности дневного света и / или датчиков движения. Этот подход концептуально похож на предлагаемую систему. Однако наша работа представляет собой всеобъемлющую долгосрочную (более 6 месяцев) оценку энергосбережения в полевых условиях в течение нескольких сезонов и погодных условий. Более того, алгоритм управления не объясняется в [19], и невозможно знать, использует ли алгоритм распределенное или локальное принятие решений. Наконец, в [19] нет данных об энергопотреблении беспроводной системы и связанных с ней затратах. В [21] и [22] предлагается система управления освещением, учитывающая предпочтения пользователей и энергосбережение. Эта система предполагает, что местоположение каждого пользователя известно с помощью беспроводного датчика, который переносится каждым пользователем, который также обнаруживает местную интенсивность света. Дополнительное предположение заключается в том, что между целыми осветительными устройствами и неподвижными датчиками нет препятствий. В [22] их модель предназначена для источников света с точечной связью, таких как светодиоды. В [23] используется интеллектуальная система освещения, в которой окружающий свет в месте нахождения пользователя контролируется в режиме реального времени, чтобы предоставить пользователям наилучшее внутреннее освещение, но с энергосберегающим режимом. Этот подход очень похож на тот, который предлагается в этой статье, и демонстрируются его преимущества. Тем не менее, сеть не может управлять драйвером светодиодов напрямую, так как ему нужен контроллер цифрового адресного светового интерфейса (DALI), что делает систему очень дорогой. Кроме того, драйвер не может быть беспроводным. Другим стандартом для управления освещением является KNX [27], который используется для добавления интеллекта в здания. Тем не менее, нет родной беспроводной связи, и она имеет очень высокую стоимость с десятками тысяч долларов за базовую установку. Наше решение было разработано с низкой мощностью и стоимостью, высокой гибкостью и масштабируемостью. Он основан на узле недорогих беспроводных датчиков, который использует стандарт Zigbee для повышения доступности и масштабируемости, интеллект распределен и он может напрямую управлять драйвером LED для повышения точности и реактивности системы. Наконец, датчик движения и датчик освещенности контролируют окружающее пространство, чтобы обеспечить максимальный комфорт пользователя при минимальном потреблении энергии. В [24] был предложен интересный подход для управления без датчика с использованием алгоритма нейронной сети. Однако для сети по-прежнему нужен центральный интеллект и соединение DALI, причем результаты энергосбережения намного ниже, чем в предлагаемом подходе. Несколько решений для интеллектуальных приложений освещения с использованием беспроводных модулей были предложены также в коммерческих продуктах, где наиболее важными примерами являются NXP / Jennic [25] и Eshelon / LonWorks [26]. Даже для коммерческих продуктов технология все еще находится в зачаточном состоянии, поскольку на практике существует множество вариантов, которые можно было бы проверить на практике с помощью реальных приложений. Удивительно, но на рынке нет коммерческих недорогих продуктов, которые предлагают функциональные возможности, перечисленные в этой предлагаемой интеллектуальной системе освещения, такие как гибкость, адаптивность / простота использования (подходит для нескольких коммерческих драйверов), надежность, распределенный интеллектуальный, прямо подключаемый модуль Светодиодные драйверы. Коммерческим беспроводным решением является Eyenut [30]. Однако сенсорный узел ограничен датчиками движения, что означает, что световые датчики исключены, и нет реального распределенного интеллекта. Более того, решение имеет высокую стоимость в тысячах долларов для базовой станции и сотни долларов за беспроводные устройства.

В этом документе представлены проектирование, разработка и точные измерения всей сети с низким энергопотреблением и низкой стоимостью беспроводных датчиков для обеспечения энергосбережения посредством автоматического управления и демонстрирует свои преимущества с точки зрения энергосбережения и масштабируемости с использованием экспериментальных результатов в полевых условиях.

1. **Устройства и методы**

Рисунок 1 иллюстрирует концептуальную схему предлагаемой системы. Он состоит из групп светодиодных панелей, управляемых несколькими датчиками (движение и освещение) и распределенный интеллект. Узлы взаимодействуют по беспроводной сети через сетку Zigbee [31] (с использованием протокола IEEE 802.15.04 MAC) с координатором, несколькими маршрутизаторами и несколькими конечными устройствами (ED). На каждой панели есть беспроводной контроллер (Zigbee ED), напрямую подключенный к его драйверу, чтобы установить интенсивность света через сигнал широтно-импульсной модуляции (PWM). ШИМ-сигнал используется для кодирования уровня яркости светодиода с шириной импульса (продолжительности) сигнала микроконтроллера, как объясняется в следующем подразделе. Значение ШИМ определяется блоком управления, заданным одним из распределенных маршрутизаторов с датчиками. Каждый маршрутизатор использует данные датчиков для адаптации интенсивности в соответствии с предпочтениями пользователя с целью максимизации энергосбережения и предпочтений пользователей. Сеть Zigbee в сетевой конфигурации позволяет создавать масштабируемую и модульную систему, легко расширяемую, и позволяет каждой подгруппе освещения быть полностью независимой и гибкой с точки зрения контролируемой области. Фактически, каждый маршрутизатор имеет гибкое и контролируемое количество связанных ED и светодиодных панелей, которые он может контролировать при тех же условиях. Это позволяет иметь разные области с различными элементами управления, чтобы увеличить энергосбережение, обусловленное предпочтениями пользователей.

Вся сеть управляется одним блоком наблюдения, координатором Zigbee, который управляет сетью и обеспечивает правильное функционирование всех сетевых устройств. Кроме того, данное устройство работает как шлюз с удаленным хостом (ноутбук, встроенные в стену устройства, беспроводные устройства Lan / Bluetooth и т. Д.), Чтобы обеспечить взаимодействие с человеком. Таким образом, можно получить предпочтения пользователей, чтобы адаптировать мерцание огней в желаемых значениях, так и включить графический пользовательский интерфейс для управления и для визуализации энергосберегающих данных для каждой группы светодиодов или одного устройства. Это важная функция, поскольку процент экономии энергии зависит от нескольких факторов, но наиболее важным является предпочтение пользователей, и пользователь может оценить это графически. Другими факторами, влияющими на энергосбережение, являются положение каждой группы панелей, то есть комната с большими окнами на юг, которая экономит больше энергии, чем подвал, погодные условия, сезон, географическое положение и т. д.

Основной целью предлагаемого подхода является снижение энергопотребления основой (а также существующей) системы светодиодного освещения с использованием гибкой сети, развернутой в одном и том же целевом поле, что снижает стоимость установки и гарантирует интеллектуальные и зеленые здания с высоким возвратом инвестиционной энергии.

В этой работе все устройства, необходимые для сети, были спроектированы, разработаны и развернуты в области вокруг чипа CC2530 от Instruments (TI). Этот чип поддерживает решение стека ZigbeePRO с небольшим форм-фактором и достаточными вычислительными ресурсами для выполнения предлагаемых алгоритмов. Разработанные устройства включают в себя два чипа от Texas Instruments: микроконтроллер MSP430, в котором может быть разработано и реализовано микропрограммное обеспечение, а также CC2530, который отвечает за всю связь и стек Zigbee. Устройство также включает дополнительную внешнюю плату для подключения через USB-порт для программирования и тестирования. Однако только координатор использует порт USB во время развертывания, чтобы взаимодействовать с удаленным хостом и для сетевого взаимодействия не требуется больше внешнего оборудования. Маршрутизатор оснащен датчиками для контроля контролируемой области, в то время как конечное устройство сопряжено с коммерческим световым драйвером.

В предлагаемой интеллектуальной системе освещения наиболее важными элементами являются:

• Светодиодные панели, высокоэффективный белый светодиод для подсветки;

• CC2530, который обеспечивает управление ZigBee и присутствует в каждом узле сети;

• MSP430 для управления сглаживанием светодиодных панелей и распространения распределенного интеллекта. MSP430 присутствует во всех узлах;

• Диммируемый коммерческий драйвер для светодиода, который обеспечивает высокотемпературный диапазон (до 89%) и контроль скорости (постоянный ток) для сглаживания.

• Световые и PIR-датчики, используемые маршрутизатором для контроля и контроля яркости.

В следующем подразделе представлена беспроводная сеть и три архитектуры узлов.

*А. Беспроводное управляющее устройство*

В каждой светодиодной панели требуется новое устройство для включения беспроводного управления. Единственной целью этого устройства является управление светодиодом при помощи ШИМ, обеспечивающий точное сглаживание света и связь с беспроводной сетью. Как упоминалось ранее, узел построен вокруг CC2530 и MSP430 от TI, где чип CC2530 используется для сети, а MSP430 на борту - это основной интеллект, который управляет радиочипом и где работает прошивка. На рисунке 2 показана архитектура разработанного устройства, которая включает в себя электронные схемы для управления промышленным драйвером и питания от внешнего источника питания от 3 до 24 В, который также может поступать от самого драйвера в зависимости от модели. Чтобы позволить каскаду мощности преобразовать и обеспечить стабильное питание 3 В для узла, был использован регулятор понижающего низкого уровня (LDO) с ультранизким током покоя TLV70433 от Texas Instruments. Этот чип имеет очень низкий ток покоя с высокой эффективностью преобразования и оптимизирован специально для MPS430.

PWM to Driver Block на рисунке 2 является самой важной частью конечного устройства, и необходимо преобразовать сигнал ШИМ, генерируемый микроконтроллером, в сигнал 0-10 В, необходимый для управления промышленным светодиодным драйвером. Управление 0-10 В является одной из самых ранних и простейших систем управления электронным освещением, и оно включено в большинство коммерческих драйверов. Благодаря этому интерфейсу узел может быть адаптирован к широкому спектру коммерческих драйверов с портом 0-10 В и может быть встроен непосредственно в драйвер, как показано на рисунке. Для достижения этой цели достаточно вставить P-MOS-транзистор в конфигурацию Common Collector между сигналом ШИМ микроконтроллера и входным сигналом 0-10V. Для конечных устройств у нас нет никаких датчиков на борту, так как значение ШИМ определяется маршрутизатором, который управляет несколькими устройствами в одной и той же группе, и он будет представлен в следующем подразделе. Это имеет преимущество для обеспечения гибкости в развертывании и более надежной обратной связи с освещением в контролируемой зоне.

*Б. Роутер для мониторинга и принятия решений*

Это устройство отвечает за наиболее важную нагрузку в сети со следующими основными задачами: 1) управлять протоколом маршрутизации стека Zigbee, отслеживать параметры энироментальности по всем датчикам, 2) принимать решение по интенсивности света и 3 ) отправить конфигурацию управления на панели, которые назначены под ее управлением во время конфигурации сети. На рисунке 3 показана аппаратная архитектура узла маршрутизатора, которая очень похожа на конечное устройство, где вместо управления драйвером PWM имеется блок инфракрасного датчика (PIR). Этот блок включает в себя датчик и схему связи, которая генерирует прерывание, когда объект перемещается в поданной точке зрения. Используемый PIR - это Panosonic EW - AMN34111J, который гарантирует быстрое и точное прерывание для любого движущегося объекта в диапазоне 10 м. Прерывание, генерируемое блоком PIR, напрямую подключается к выходу общего выхода ввода (GPIO) MSP430 для получения прерывания. Датчик света на плате позволяет контролировать светимость в интересующей области и является входом в алгоритм. Датчик освещенности - SSFH 5711 - датчик высокой освещенности от Osram. Интеллектуальное управление светом управляется микропроцессором низкой мощности (MSP430), который получает ADC данные светового датчика и вычисляет интенсивность света в соответствии с реализованной политикой мощности и предпочтениями пользователя. Что касается конечного устройства, протокол маршрутизации управляется с использованием CC2530 с стеком ZigbeePRO.

*В. Пульт управления*

Базовая станция управления является центром предлагаемой системы, поскольку она позволяет визуализировать систему освещения и устанавливать важные параметры, такие как предпочтения пользователей. Роль координатора заключается в управлении сетью и разрешении пользовательского интерфейса через удаленный хост. Устройство оснащено интерфейсом для подключения к UART на USB, готовым к использованию, как показано на рисунке 4. Благодаря интерфейсу и удаленному хосту можно настроить предпочтения пользователей и контролировать всю сеть и хранить все данные для оценки энергосбережения.

*Г. Беспроводная сенсорная система*

Одной из основных целей при разработке предлагаемой системы была масштабируемость, низкая мощность и стандартизованная сеть для коммерческого применения. ZigBee - это технология беспроводной связи, основанная на стандарте IEEE802.15.4 для связи между несколькими устройствами в беспроводной локальной сети (WPAN). Альянс ZigBee разработал недорогой с низким эноргопотреблением стандарт беспроводной связи, и был выбран набор микросхем CC2530. Таким образом, этот стандарт разработан, чтобы быть более доступным, чем другие WPAN (Wi-Fi или Bluetooth) для разработки низкомощных встроенных систем для бытовой электроники, автоматизации дома и здания, промышленного контроля, периферии ПК, применения медицинских датчиков, игрушек и игр , Архитектура ZigBee состоит из набора блоков, называемых слоями; каждый слой выполняет определенный набор сервисов для слоя выше. Стандарт IEEE802.15.4 определяет два нижних уровня: физический (PHY) и подуровень управления доступом к среде (MAC). Альянс ZigBee основывается на этом фундаменте, предоставляя уровень сети (NWK) и структуру для прикладного уровня, такие как объекты устройства ZigBee (ZDO) и объект приложения, определенный производителем.

TI предоставил Z-Stack легкоиспользуемый стек Zigbee, реализованный на CC2530. Сеть построена для передачи информации от маршрутизатора к панелям и от пользовательского интерфейса к распределенным маршрутизаторам, которые будут выполнять алгоритм выбора значения затемнения ламп. Свет светодиодов связан только с одним маршрутизатором, который управляет ими, как описано на рисунке 6. При распределенном подходе маршрутизаторы могут определять уровень яркости без постоянной отправки и приема сообщений центральному хосту. Таким образом, система экономит энергию для передачи, увеличивая вместе реактивность, поскольку маршрутизатор является более близким родителем управляемых панелей. Это особенно актуально при расширении сети и увеличении количества узлов и сообщений [31].

Была выбрана сеть ячеек, чтобы максимизировать масштабируемость сети до размера более чем 64000 беспроводных узлов. Сеть беспроводной связи ZigBee была реализована с использованием чипа CC2530 и домашней системы автоматизации PRO Stack, уже реализованной на чипе. Разработанные устройства имеют PCB антенну и обеспечивают рабочий диапазон в десятки метров внутри и снаружи с возможностью выбора выходной мощности от -22 дБм до 4,5 дБм в соответствии с сценарием приложения. Пиковая мощность при передаче, при покрытии более 20 метров при использовании в помещении и выходной мощности 4,5 дБм, составляет около 100 мВт при 3,3 В. Тем не менее, прошивка может адаптировать время работы мощности передачи в соответствии с индикатором уровня принимаемого сигнала. В этой работе мы не используем адаптивную передачу мощности, и мы установили выходную мощность на + 4,5 дБм.

1. **Алгоритм управления освещением**

Как было показано в предыдущем разделе, существует три разных устройства, для которых требуется три разных алгоритма для правильной работы. Сетевое программное обеспечение является важной частью системы (рис. 7 и рис. 8). Z-STACK от TI использовался для работы с протоколом ZigbeePRO с CC2530. В этом разделе представлены только алгоритмы, необходимые для управления "умным" освещением, расположенным на трех топологиях узлов: конечное устройство, маршрутизатор, управляющее устройство (Рисунок 5).

*А. Алгоритм конечного устройства*

На рисунке 5 показана основная блок-схема алгоритма. Основной задачей управления сетью является получение и установка правильной яркости для панели светодиодов (рисунок 7). Таким образом, после подключения устройства к сети, к нему привязан маршрутизатор. С этого момента он ожидает, что значение ШИМ будет определено из собственного алгоритма маршрутизатора и задает интенсивность света на панели панели в соотвествии с этим значением. После того, как значение установлено, радиостанция переходит в режим ожидания для экономии энергии. Пользователь пробуждает его, чтобы получить новое значение яркости, поскольку это влияет на время отклика, в предлагаемом подходе было выбрано 500 мс, поскольку оно является хорошим компромиссом между энергосбережением и реактивностью. Эта простая процедура с вышеупомянутым оборудованием позволяет контролировать каждый коммерческий драйвер через стандартную сеть Zigbee.

*Б. Маршрутизатор и управляющий алгоритм*

Алгоритм маршрутизатора несколько более сложный, чем алгоритм конечного устройства. Ядро интеллектуального интеллектуального освещения распределяется между каждым маршрутизатором, который затем управляет одним или несколькими конечными устройствами. Для достижения этой важной цели маршрутизатор имеет в качестве основных блоков блок связи и алгоритм управления. Блок связи отвечает за прием данных из сети о предпочтениях пользователя и передачу данных о статусе управляемых панелей на удаленный хост. Поскольку сеть представляет собой сетку, информация может переходить на другие маршрутизаторы до достижения координатора, который контролирует состояние панелей и управляет ошибками.

На рисунке 5 показан алгоритм управления, работающий на устройстве узла датчика. Алгоритм управления является ядром приложения интеллектуального освещения, устанавливающим значение затемнения панели. Для достижения этой цели микроконтроллер получает данные светового датчика через порт АЦП, содержащий яркость помещения. Целью этого измерения является обеспечение оптимального уровня освещенности в помещении в соответствии с предпочтениями пользователя и существующими стандартами освещения. Алгоритм контролирует значение яркости панелей, устанавливающих PWM, для достижения оптимального значения яркости в области и экономии энергии. Как показано на рисунке 8, если яркость помещения выше желаемого значения пользователя, значение ШИМ уменьшается. С другой стороны, значение PWM увеличивается, когда контролируемая яркость ниже желаемого значения пользователя. Кроме того, с учетом экономии энергии алгоритм включает в себя процедуру управления PIR, которая идентифицирует присутствие людей из датчика движения. Алгоритм управления отключает группу светодиодных панелей для предотвращения отходов, если движение не обнаружено в течение определенного времени (которое задано пользователем). Точно так же процедура прерывания управления PIR быстро превращает панели и разбуждает управляющую процедуру вверх, если обнаружено какое-либо движение. Эта функция позволяет использовать светодиодные панели только в случае необходимости, избегая потери энергии.

Основная проблема с узлом датчиков - это правильное размещение в контролируемой области, поскольку это может повлиять на производительность всей системы. Например, если датчик освещенности находится под прямым солнечным светом или светом панели, он может дать неправильную обратную связь алгоритму управления. Кроме того, важно избегать теневых мест или мест, где временные тени создаются из движений людей.

По этим причинам лучшие позиции были найдены на потолке посреди осветительных групп. Здесь на датчик света не воздействуют непосредственно внешние внешние или светодиодные панели, а также из случайные тени. В этом положении датчик PIR Panasonic EW - AMN34111J также обеспечил оптимальную производительность, охватывающую 10 метров с широким углом (около 120 °), обнаруживая все движения в поле зрения с быстрым откликом в несколько миллисекунд. Что касается датчиков PIR, то также важно избегать нежелательного отключения, если движение не обнаружено за долгое время. Чтобы избежать этого условия, TIMEOUT\_TIME включения следует выбирать осторожно. Для нашего развертывания консервативное значение в 45 минут было выбрано в рабочее время с 8:00 до 18:00 и 5 минут за этот интервал времени. Поскольку это будет представлено в разделе экспериментальных результатов, развертывание в реальном офисе было активным в течение непрерывного 6 месяцев с полной удовлетворенностью пользователей, которые не замечали никакой разницы с традиционной системой без интеллектуального контроля.

*В. Координирующий алгоритм*

Основная роль координатора, над настройкой и контролем Zigbee WSN, заключается в подключении беспроводных устройств, развернутых в здании, к удаленному хосту, который является пользовательским интерфейс. Координатор также отправляет пользовательские настройки маршрутизаторам и собирает информацию о статусе от маршрутизаторов для хранения контролируемого состояния в удаленной базе данных. Связь осуществляется через порт UART микроконтроллера и преобразователь UART на USB, который позволяет подключаться к каждому хосту с помощью интерфейса USB. Таким образом, координатор работает как шлюз, и он необходим для графического отображения результатов и ввода пользователем. Кроме того, данные о работе беспроводных устройств связаны со световым адресом светодиодов; следовательно, все неисправности и состояние легко идентифицируются.

Графический интерфейс позволяет контролировать состояние системы с состоянием света и потребляемой мощностью каждого управляемого светодиода (индивидуальный счетчик потребления энергии). Рисунок 4. Поскольку интерфейс хоста также сохраняет яркость

значение всех панелей пользователь или менеджер сети может игнорировать потребление энергии и рабочее время каждой панели в графическом видении. Программа также оснащена системой управления, которая действует в случае отсутствия подтверждения отклонений от панели, чтобы выделить ошибки.

**V.Результаты экспериментов**

Все прототипы были разработаны, протестированы и развернуты в различных реальных условиях, чтобы проверить общую функциональность, масштабируемость и надежность сети и добиться лучшей производительности. В этом разделе описывается экспериментальная оценка системы применительно к внутренним офисам. Во-первых, представлены измерения энергопотребления устройств в разных состояниях. Представлена оценка энергосберегающей энергии коммерческой светодиодной панели VER-P6060-43-840 от VerdeLED с помощью диммируемого драйвера LPF-40D-42 от Mean Well. Во-вторых, в разделе представлены измерения мощности, выполненные в течение 6 месяцев непрерывной работы в офисе компании, где интеллектуальная система освещения была развернута как основная и единственная световая система.

На рисунке 9 показана система разработки, внедренная в офисе с целью ее тестирования в реальных условиях, а на рисунке 1 показан план этажа и места размещения датчиков. В этой реализации 25 беспроводных устройств были напрямую подключены к источнику питания светодиодных панелей, поэтому можно охватить весь офис, представленный на рисунке 1. Сеть Zigbee была развернута в офисе вместе с двумя точки доступа Wi-Fi и несколькими телефонами пользователей и ПК, подключенных к точкам доступа. В этих условиях система работала в течение 6 месяцев без каких-либо перерывов, демонстрируя высокую устойчивость к помехам Wi-Fi.

Позиционирование панелей и датчиков проводилось с предварительным анализом солнечного облучения в офисе, как описано в разделе IV. Б, и с учетом разницы во времени работы сотрудников в этом офисе. Это позволило обеспечить точное позиционирование датчиков, которые в сочетании с конфигурацией сети (соединения между светодиодными панелями и датчиком) с помощью пользовательского интерфейса обеспечили стабильное и надежное решение, работающее при записи в течение 6 месяцев без прерывания обслуживания.

*А. Измерение мощности*

Первым шагом для оценки энергосбережения, достижимого с нашим подходом, было понимание на сколько снижается энергопотребление с панелью диммера,, на рисунке 10 показана характеристика потребления / уменьшения яркости каждой светодиодной панели, которая включает в себя также потребление драйвера. Как объяснялось ранее, микроконтроллер устанавливает различные ШИМ-сигналы для яркости панели. Характеристика панели измерялась непосредственно с помощью измерителя мощности переменного тока, плавно меняющего сигнал ШИМ на шаге 1%. Эти данные показывают важность уменьшения яркости, а не потери энергии, поскольку можно экономить до 99% мощности, просто уменьшая свет. Характеристика показывает также предел драйвера, чтобы сгладить свет до более чем 87% от ШИМ. Ниже этого значения панель выключается, поэтому свет не подается. Во время испытаний было оценено несколько коммерческих драйверов от разных производителей, и выбранный драйвер LPF-40D-42 был лучшим с точки зрения дальности (0-87%) и точностью постоянного тока на выходе (полезный для обеспечения долгого Срок службы светодиодной панели). Чтобы оценить сверхнизкое энергопотребление из-за дополнительного оборудования, необходимого для добавления беспроводного управления беспроводным способом нашего подхода, потребление энергии конечным устройством и маршрутизаторами измерялось в нескольких состояниях.

В таблице I показано потребление тока беспроводными узлами (конечное устройство и маршрутизатор) с источником питания 5 В. Измерение энергопотребления беспроводного датчика было выполнено, установка часов MCU на 1 МГц и предполагая, что узел может находиться в одной из трех конфигураций, указанных в таблице. Максимальная потребляемая мощность за счет нового оборудования составляет 100 мВт. Это незначительное потребление по сравнению с энергосбережением. Фактически, как показано на рисунке 10, при затемнении только 20% система экономит уже около 20 Вт. Кроме того, ED имеет два режима энергосбережения для экономии энергии, один из которых периодически переключает радио в соответствии со стеком Zigbee, чтобы достичь только 0,500 мВт; второй отключается пользователем вручную. Источник питания ЭД связан с источником питания светодиодной панели, поэтому, когда пользователь отключает панель, в этом случае узел будет потреблять нуль.

*Б. Оценка сохраняемой энергии*

Для оценки предлагаемой системы с точки зрения энергосбережения в качестве тестового стенда использовался реальный офис. Четыре отдельных группы из 5 светодиодных панелей управлялись четырьмя маршрутизаторами. Предпочтение пользователя было установлено в 600Lux, что является общим значением для хорошего качества света. Сеть работала непрерывно в течение 6 месяцев, и координатор сохранил все состояния сигнала ШИМ каждого ЭД. Благодаря характеристике панели на рисунке 10, можно узнать мгновенную мощность каждой панели в течение дня и ночи. На рисунке 11 показано среднее энергосбережение и потребление в течение трех дней с 8 до 18 часов (в течение открытого времени офиса) для всех 20 панелей для оценки преимуществ с точки зрения энергосбережения и влияния погодных условий. Данные сравнивались с офисным сценарием без интеллектуального управления и сети Zigbee. Без интеллектуального управления средняя потребляемая мощность каждой панели составляет 40 Вт, так как все панели полностью включены в максимальную мощность во время времени. Потребляемая мощность 40 Вт - это потребление энергии без беспроводной системы управления и учитывает только мощность светодиодного драйвера и светодиодной панели. Как мы представили в предыдущих разделах, когда интеллектуальное управление активно, панели становятся тусклыми в соответствии с предпочтениями пользователя, яркостью в помещении и датчиком обнаружения движения. На рисунке показано среднее энергопотребление каждой панели в течение трех разных дней с тремя различными погодными условиями. Эта мощность оценивалась как общая мощность, измеренная для подачи всех панелей, разделенных на количество панелей. Три графика показывают влияние погодных условий и энергосбережения. Фактически, средняя потребляемая мощность составляет всего 9 Вт против 40 Вт в солнечном состоянии, а 12 Вт в переменных условиях и 17,5 Вт в облачных условиях.

ТАБЛИЦА II показывает экономию энергии в течение шести дней для всех областей офиса. В этой таблице показано, как на энергосбережение влияет внешний свет и присутствие людей в комнате. Например, день 5 был облачным, поэтому яркость внешнего света была не очень высокой, а энергосбережение намного ниже. Кроме того, выставочный зал является наименее используемым местом в офисе, поскольку в нем нет стабильного / постоянного присутствия людей, поэтому энергосбережение всегда выше. Эти результаты показывают, насколько важно иметь различную группу огней, управляемых отдельными маршрутизаторами, чтобы иметь более эффективный контроль и энергосбережение. Наконец, учитывая только 6 дней , общая экономия энергии составляла около 43% из-за предлагаемого подхода по сравнению с тем же развертыванием без него. Это значение не учитывает ночной период, предполагая, что пользователю всегда напоминают отключить огни офиса или выключенные огни из-за неактивности. Другим важным параметром является достигнутая экономия энергии в зависимости от разных периодов года.

В таблице III приведена средняя потребляемая мощность каждой из 20 панелей. Данные были получены в течение 2 недель в декабре 2013 года, когда развертывание началось и в течение 2 недель мая 2014 года. В таблице показано, как каждый день энергосбережение изменяется в зависимости от погодных условий, а также то, что среднее потребление энергии в декабре было намного выше чем в мае. Это объясняется главным образом ухудшением погодных условий и более низким количеством солнечного света в зимнее время по сравнению с весной.

Наконец, чтобы лучше оценить преимущества предлагаемого подхода, были получены полевые данные о потреблении энергии на длительный период. На момент написания статьи система работала без каких-либо перерывов в этом офисе в течение 6 месяцев с декабря 2013 года по май 2014 года. Средняя экономия энергии за этот период составила около 55%. По оценкам, экономия энергии будет выше в течение всего года, так как весной и летом дневной свет уменьшит среднее использование панели, а система интеллектуального освещения будет оптимизировать уровень затемнения, чтобы свести к минимуму потери энергии. Соглашаясь с низкой стоимостью, в предлагаемом решении все части были оценены с точки зрения себестоимости продукции на 10000 единиц. Для этого не очень большой объем системы стоит 200 $ для координации и базовой станции, 50 $ для узла датчиков и всего 15 $ для конечных устройств, которые должны быть подключены к светодиодному драйверу. ТАБЛИЦА IV показывает сравнение с самой популярной системой управления освещением и подчеркивает значительно меньшую стоимость предлагаемого решения.

1. **Заключение и будущие работы**

Была предложена новая система для управления светодиодным освещением с сетью беспроводных датчиков низкой стоимости и низкой мощности. Этот метод требует развертывания дополнительных датчиков с радио Zigbee, которые генерируют сигнал ШИМ для управления существующими коммерческими светодиодными драйверами, что может значительно снизить энергопотребление светодиодного освещения. Использование датчика освещенности и датчика PIR в сочетании с предпочтениями пользователя позволяет распределенному интеллекту экономить энергию, уменьшая интенсивность света. Поскольку многие светильники светодиодных ламп уже установлены, это решение также подходит для дооснащения. Кроме того, сеть является гибкой и масштабируемой благодаря радио Zigbee. Экспериментальные результаты показывают, что предлагаемая система превосходит современное состояние со значительным снижением энергопотребления и стоимости для одиночных и групп светодиодных ламп с использованием маломощного масштабируемого WSN. Было показано, что этот подход снижает потребление энергии в приложении реального времени жизни более чем на 55% в течение 6 месяцев (в непредсказуемом ирландском погодном сценарии). Прототипы готовы к включению в коммерческий драйвер для обеспечения возможности беспроводной связи и распределенного управления.

Благодарности

Авторы хотели бы поблагодарить NANOTERA ICYSOC, проект ЕС PHIDIAS (G.A. 318013), Ирландский исследовательский совет (проект iLUX) и VerdeLED.