

DOI 10.53364/24138614_2022_27_4_49

УДК: 519.6

¹Оспанов Е.А*., ²Айтқазина Д.¹ Семипалатинский университет им. Шакарима² Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан.*E-mail: 78oea@mail.ru

СВЯЗЬ ВИДИМЫМ СВЕТОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВОЙ КАМЕРЫ И СВЕТОДИОДНОГО ФОНАРИКА

ЦИФРЛЫҚ КАМЕРА ЖӘНЕ ЖЕДЕЛДІК ШАРАМДЫ ПАЙДАЛАНАТЫН КӨРІНЕТІН ЖАРЫҚТЫҢ БАЙЛАНЫСЫ

VISIBLE LIGHT COMMUNICATION USING A DIGITAL CAMERA AND LED FLASHLIGHT

Аннотация. В этой статье представлен подход к оптической связи с помощью видимого света с использованием фокусируемого светодиодного фонарика в качестве передающего устройства и цифровой камеры в качестве приемника. Одним из нововведений подхода является то, что конструкция может интегрировать стандартные компоненты источника света и камеры и предназначена для работы в помещении при типичных условиях освещения, т. е. при верхнем освещении и окружающем дневном свете. Сигнал связи передается в виде последовательности значений (1,0), которые включают/выключают источник света. Камера получает сигнал, наблюдая за наличием/отсутствием спроецированного светового пятна на промежуточной поверхности и преобразовывая его обратно в двоичный сигнал (1,0). Подход применяет методы обработки изображений для вычисления полученного сигнала из записанного изображения с камеры.

Ключевые слова: Li-Fi, Связь в видимом свете (VLC), изображение, распознавание, светодиод, фонарик, Raspberry Pi, цифровая камера.

Андатпа. Бұл мақалада таратқыш ретінде фокусталатын жарықдиодты шамды және қабылдағыш ретінде сандық камераны қолданатын көрінетін жарықты қолданатын оптикалық байланыс тәсілін ұсынады. Әдістің жаңашылдықтарының бірі дизайн стандартты жарық көзі мен камера құрамдастарын біріктіре алады және типтік жарықтандыру жағдайында, яғни үстіңгі жарық пен күндізгі жарықта үй ішінде жұмыс істеуге арналған. Байланыс сигналы жарық көзін қосатын/өшіретін мәндер тізбегі (1,0) ретінде беріледі. Камера сигналды аралық бетінде жобаланған жарық дағының болуын/жоқтығын бақылап, оны қайтадан екілік сигналға (1,0) түрлендіру арқылы қабылдайды. Тәсіл камерада жазылған кескіннен алынған сигналды есептеу үшін кескінді өңдеу әдістерін қолданады.

Түйін сөздер: Li-Fi, Visible Light Communication (VLC), сурет, тану, жарық диодты, фонарь, Raspberry Pi, сандық камера.

Annotation. This article presents an approach to optical communication using visible light using a focusable LED flashlight as a transmitter and a digital camera as a receiver. One of the innovations of the approach is that the design can integrate standard light source and camera components and is designed to work indoors under typical lighting conditions, i.e. overhead lighting and ambient daylight. The communication signal is transmitted as a sequence of values (1,0) that turn the light source on/off. The camera receives the signal by observing the presence/absence of a projected light spot on the intermediate surface and converting it back to a binary signal (1,0). The

approach applies image processing techniques to calculate the received signal from the recorded image from the camera.

Keywords: Li-Fi, Visible Light Communication (VLC), image, recognition, LED, flashlight, Raspberry Pi, digital camera.

Введение. Передача информации с помощью света — это концепция, которая существовала с древних времен, когда сигнальные огни передавали важные новости на большие расстояния. Современные приложения включают телевизионные пульта дистанционного управления, которые используют инфракрасный (ИК) свет для передачи команд на телевизор. Связь в видимом свете (VLC) является менее широко используемой формой связи, которая требует, чтобы частоты связи находились в спектре видимого света (длина волны 390–700 нм). Методы VLC менее распространены, поскольку передаваемые сигналы видны людям, что может неблагоприятно повлиять на окружающую среду. Обычная фраза для VLC — Li-Fi (light-fidelity) после популярного метода связи Wi-Fi (wireless fidelity). Поскольку все больше и больше устройств используют радиоволны для связи, радиоспектр становится перегруженным, поскольку каждый класс беспроводных устройств стремится использовать исключительно часть беспроводного спектра. В народе это называют «крахом спектра». Обычно видимый свет не считается жизнеспособной частью спектра связи. VLC меняет это представление. VLC особенно полезен, поскольку системы освещения имеют много общих характеристик, необходимых для систем связи, т. е. регулярное распределение мест передачи/приема. По этой причине их интеграция с системами освещения зданий является естественной. Широкое распространение систем Li-Fi в зданиях может обеспечить новые методы управления умным зданием, а также связи, которые являются модульными, разработка высокораспределенных эффективными и надежными проверенных систем. В световом спектре также почти отсутствуют коммуникационные технологии. Следовательно, он обеспечивает больше частот, чем обычно доступно в радиочастотном спектре. Одним из важных преимуществ высокочастотных радиоволн, используемых в сигналах WiFi, является то, что их сигналы могут проходить сквозь твердые объекты, например стены, что невозможно для сигналов Li-Fi. Светоизлучающие диоды (СИД) обычно используются в качестве передатчиков для каналов связи VLC, поскольку светодиоды недороги и могут передавать данные с очень высокой скоростью. Светодиоды видимого света также широко доступны и недороги, что облегчает их интеграцию в существующие решения для освещения домов и коммерческих зданий. Для принимающей стороны канала связи было предложено несколько различных подходов. Некоторые методы предлагают использовать цифровую камеру для обнаружения света, а другие предлагают использовать фотодиод для обнаружения света. В этой статье предлагается использовать фокусируемый светодиодный фонарик в качестве передатчика и цифровую камеру в качестве приемника.

Передатчик VLC. А. Оборудование. Передатчик VLC состоит из следующих компонентов: (1) фокусируемого светодиодного фонарика, (2) микроконтроллера и (3) схемы управления освещением. При применении фокусируемый светодиодный фонарик настраивается так, чтобы светить на стену, за которой одновременно наблюдает веб-камера. Любая стандартная камера и светодиодный фонарик могут быть интегрированы в систему в качестве компонентов с небольшими изменениями, помимо выполнения соответствующих электрических соединений. Фонарик должен иметь возможность фокусировки, чтобы сила сигнала могла быть настроена на расстояние между источником света и промежуточным объектом. Это вносит значительный вклад в проблемы с сигнальным шумом из-за окружающего света и отражающих промежуточных поверхностей. Луч фонарика включается и выключается с заданной пользователем скоростью для передачи (1,0) бит соответственно. В качестве источника питания для фонарика можно использовать батарейки или внешний блок питания. В то время как любой микроконтроллер с достаточно быстрой синхронизацией

может управлять фонариком, в этой статье для управления сигналом фонарика используется оценочная плата Renesas RX62N.

В. Схема. Поскольку цифровой выход управления микроконтроллера, используемый для включения и выключения фонарика, рассчитан только на 3,3 В, а выбранный фонарь работает от 6 В (4 батарейки АА), для управления фонариком была введена дополнительная схема. В частности, MOSFET-транзистор с логическим уровнем IRF540 используется для переключения питания фонарика в соответствии с цифровым выходом микроконтроллера. На рис. 1 показана результирующая схема управления фонариком, которая соединяет цифровой выходной сигнал микроконтроллера с затвором полевого МОП-транзистора. Это позволяет микроконтроллеру включать фонарик, когда на цифровом выходе высокий уровень (+3,3 В), и выключать, когда на цифровом выходе низкий уровень (0V). Микроконтроллер включает в себя программное обеспечение, которое принимает сигнальные данные и генерирует последовательность сигналов включения/выключения для передачи данных в виде последовательности двоичных цифр.

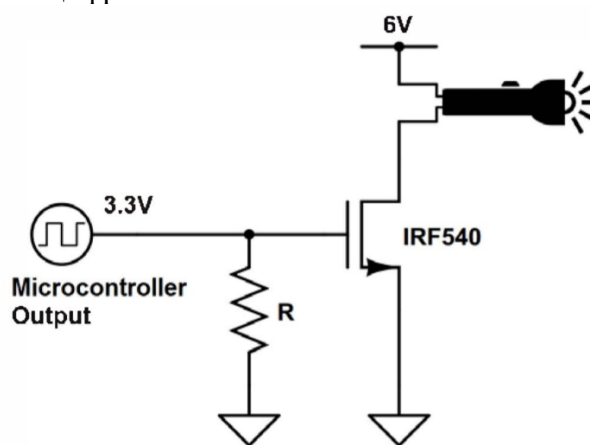


Рисунок 1. Принципиальная схема передатчика.

VLC приемник. А. Оборудование. Приемник VLC состоит из следующих компонентов: (1) коммерческой веб-камеры и (2) микрокомпьютера. Программное обеспечение микрокомпьютера использует общие методы интерфейса веб-камеры, чтобы сделать эту систему VLC применим в качестве приемника для обычных цифровых камер. Камера расположена так, чтобы наблюдать за пятном, генерируемым передающим фонариком на промежуточной стене. ПК или микроконтроллер записывает изображения с камеры и обрабатывает эти изображения для обнаружения передаваемого сообщения видимого света.

Микрокомпьютер непрерывно захватывает изображения с камеры. Каждое изображение анализируется с использованием методов обработки изображений для определения значения передаваемого сигнала VLC. По соглашению мы назначаем логическую единицу, чтобы соответствовать включению фонарика, и логический ноль, когда фонарик выключен. Камера захватывает изображения промежуточного объекта и применяет следующие этапы обработки для определения значения: (1) преобразование изображения в оттенки серого, (2) применение бинарного порога, (3) контуры *find* в бинарном изображении и (4) установить минимальную охватывающую окружность вокруг обнаруженных контуров. Эти этапы обработки значительно помогают в надежном обнаружении сигнала фонарика, несмотря на наличие другого источника света или окружающего освещения, которые могут освещать интересующую поверхность. Этот процесс позволяет передавать данные сигнала на основе радиусов кругов. На рис. 2 этот процесс показан графически. В последующих параграфах этот процесс будет рассмотрен более подробно.



а)

б)

с)

Рисунок 2. Изображение на каждом этапе алгоритма. (а) Исходное изображение, снятое с камеры. (б) Изображение после пороговой обработки и размытия. (с) Окружность, подогнанная под обнаруженные контуры.

В. Алгоритм. Для этого подхода цветные изображения не нужны, поэтому, если используется датчик цветного изображения, захваченное изображение должно быть преобразовано в оттенки серого. Использование изображений в градациях серого, в отличие от цветных изображений, позволяет быстрее и эффективнее манипулировать изображениями, поскольку требуется доступ к меньшему количеству точек данных. Изображения в градациях серого используют только один канал интенсивности пикселей, тогда как цветные изображения используют три канала: красный, зеленый и синий (RGB).

В изображении в градациях серого каждый пиксель представлен значением интенсивности от 0 до 255. Из-за вышеупомянутой фокусировки луч фонарика, вероятно, отвечает за создание самых ярких пикселей в записанном изображении. Это позволяет выполнять первоначальную фильтрацию пикселей-кандидатов сигнала на основе предполагаемой высокой интенсивности. Этот фильтр реализуется путем применения двоичного порога к изображению, которое извлекает пиксели-кандидаты фонарика в качестве переднего плана изображения и отбрасывает оставшиеся пиксели изображения. Метод, используемый для применения двоичного порога, показан в уравнении (1), где $I_{current}$ — текущая измеренная интенсивность пикселей от 0 до 255, I_{low} — наименьшая измеренная интенсивность пикселей фонарика, а I_{new} — новая интенсивность пикселей, присвоенное текущему пикселю.

Операция размытия изображения также применяется к изображению для удаления зашумленных обнаружений пикселей, расположенных вблизи краев светового круга. Результирующее обработанное изображение обычно включает плавную дугу окружности, которая исходит от передатчика фонарика, как показано на рис. 2б.

$$I_{new} = \begin{cases} 255 & \text{if } I_{current} \geq I_{low} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

Как показано на рис. 2б, результирующее изображение обычно черное с большим белым кругом (или частью круга) внутри него. Нахождение контуров этого изображения дает нам дугу окружности, как на рис. 2с. Затем мы подгоняем наименьший возможный круг, который охватывает все обнаруженные краевые пиксели, чтобы аппроксимировать проекцию переданного луча фонарика. При наличии других источников света расчетный радиус луча можно использовать для фильтрации ложных кругов. Этап пороговой обработки также служит для устранения шума от источников света низкой интенсивности, таких как окружающий свет, дневной свет и удаленное верхнее освещение. Подход с подгонкой по кругу имеет особое значение для надежного обнаружения при наличии зеркальных отражающих поверхностей. Здесь метод проверки на основе радиуса проверяет круг, имеющий размер, наиболее близкий к ожидаемому радиусу луча фонарика. Это отклоняет ложно обнаруженные круги от отражающих поверхностей. Как побочный продукт, этот шаг также является ключевым для проверки наличия сигнала фонарика на записанном изображении, когда отражающие поверхности отбрасывают круглые световые узоры в поле зрения приемника. Если радиус обнаруженного круга подобен ожидаемому радиусу луча фонарика, переданный бит является

логической единицей. Логический ноль передается, когда на записываемом изображении не обнаружен луч сигнального фонарика (круги вообще не обнаружены). Как утверждает теорема дискретизации Найквиста [10], частота дискретизации приемника должна быть в два раза больше частоты бита передаваемого сигнала. В этом конкретном приложении ограничивающим фактором скорости передачи является частота кадров камеры; указывается в кадрах в секунду (FPS). Следовательно, самая быстрая скорость, с которой могут быть получены данные, составляет половину скорости камеры. Так как видеокамера и передатчик фонарика работают асинхронно, каждое записанное изображение необходимо проверять на наличие сигнала. Если частота дискретизации составляет половину FPS, то каждое проверяемое изображение должно иметь точное обнаружение для правильного воспроизведения передаваемых данных. Тем не менее, практические ситуации диктуют наличие шума, а асинхронный характер канала способствует созданию ошибок при этой теоретической максимальной скорости.

Следовательно, для надежной линии связи скорость передачи данных снижается, чтобы обеспечить три или четыре выборки каждого передаваемого бита. Это дает более точные результаты за счет скорости передачи. Временная когерентность изображений также влияет на скорость передачи данных в системе, поскольку каждое изображение представляет собой короткий временной интеграл наблюдаемой картины интенсивности света. Из-за этого, если изображение получено во время, которое почти совпадает с переходом от единицы к нулю, результирующая выборка может привести к необнаружению, т. е. сигнал не будет обнаружен. В таких обстоятельствах может потребоваться два кадра для надежного обнаружения одного переданного бита. Временная когерентность использовалась для оценки значений битов данных, когда значения пересекали несколько кадров. Мера когерентности оценивает переданный бит, просматривая количество нулей, предполагаемых n_{zeros} и сравнение логических этого с общим количеством принятых кадров для бита, n кадров, как показано в уравнении (2).

$$Received\ Bit = \begin{cases} 0 & \text{if } n_{zeros} \geq \frac{2}{3} n_{frames} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

Эта временная диаграмма на рис. 3 иллюстрирует неопределенность, создаваемую неудачной относительной синхронизацией для передачи битов по линии связи. Система VLC была впервые реализована с использованием цифровой камеры Point Grey Scorpion SCOR-20S0. Частота кадров этой камеры составляет 15 кадров в секунду, что означает, что максимальная скорость передачи для этой конкретной камеры составляет 7,5 бит в секунду (бит/с). Фактическая используемая скорость передачи должна быть фиксированным значением, определяемым при настройке. Аппаратное обеспечение, используемое для передатчика, такое же, как указано в Разделе III. Описанный алгоритм был протестирован путем отправки нескольких различных типов сообщений со скоростью 1 бит/с, 3 бит/с и 5 бит/с. В этих условиях испытаний система связи с видимым светом работала правильно на всех этих скоростях передачи с нулевыми ошибками. При тестировании на скорости 7,5 бит/с частота ошибок в полученных сообщениях составила 50 %, что может быть связано с несинхронизацией синхронизации приемника и передатчика, как упоминалось в Разделе IV, В.

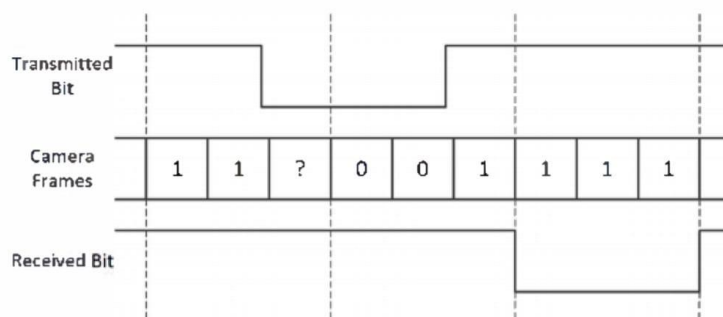


Рисунок 3. Временная диаграмма для системы VLC.

После озвучивания базовой конструкции приемника с помощью ПК и камеры высокого разрешения система была затем реализована во встроенной системе. Встроенная система состояла из микроконтроллера для алгоритма обработки изображений и недорогой веб-камеры USB в качестве приемника.

В качестве микроконтроллера использовался Raspberry Pi Model B. Модель Raspberry Pi Model B имеет 512 МБ ОЗУ, 2 порта USB и порт Ethernet. Он имеет систему Broadcom BCM2835 на чипе, которая включает в себя процессор ARM1176JZF-S 700 МГц, графический процессор Video Core IV и внешнюю SDкартуна 4 Гб. Графический процессор способен воспроизводить качество Blu-ray с использованием H.264 со скоростью 40 Мбит / с и использовался во многих проектах, включая систему монитора с сенсорным экраном на основе Bluetooth [11]. Микроконтроллер запускает версию Debian Linux под названием Raspbian. Raspberry Pi был выбран потому, что его вычислительные ресурсы могут легко обрабатывать изображения, требуемые этим алгоритмом, в режиме реального времени.

Тестирование системы с Raspberry Pi и веб-камерой USB подтвердило, что процессор способен обеспечить вычислительную производительность, необходимую для системы. Однако было обнаружено, что обычные имеющиеся в продаже веб-камеры USB не являются надежными приемниками для этого приложения. Среди протестированных веб-камер USB были Logitech C170, Microsoft LifeCam HD-3000 и Logitech C920. Logitech 920 был выбран в качестве более дорогого тестового варианта с предположением, что базовое оборудование камеры будет более надежным. Все протестированные вебкамеры USB работали с разной частотой кадров, что делает необходимую синхронизацию при таком подходе недостижимой. Скорость передачи данных, измеренная для каждой камеры, показана на рис. 4, при этом Point Gray SCOR 20S0 является контрольным устройством с постоянными 15 кадрами в секунду.

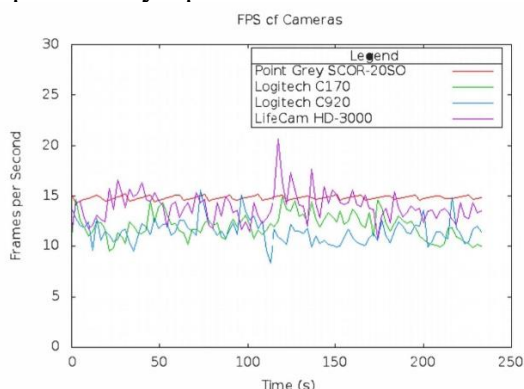


Рисунок 4. Измеренная частота кадров камеры в зависимости от времени.

Во всех тестах расстояние от передатчика и приемника до стены составляло 11 футов. Это расстояние представляет собой расстояние от пола до потолка в типичных офисных зданиях. На высоте 11 футов минимальный угол луча фонарика, при котором работает эта

система, составляет 14,7 градуса и излучает 833 люкса. Максимальный угол луча на этом расстоянии составляет 17,7 градусов и излучает 367 люкс. На рис. 5 показаны минимальный и максимальный углы работы фонарика на расстоянии 11 футов от стены. Тест проводился в помещении со средней внешней освещенностью 128 люкс.

Это было измерено в течение дня при рассеянном дневном свете, попадающем в окна (свет из окон не попадал непосредственно на яркомер) и при включенном люминесцентном освещении помещения. В тестовые случаи был добавлен еще один фонарик, чтобы посмотреть, какое влияние он окажет на систему. Используемый для этого фонарик имел яркость 140 люкс и не влиял на работу системы.

Заключение. Использование камеры с более высокой максимальной частотой кадров может обеспечить более высокую скорость передачи. Однако наиболее важным фактором при выборе камеры для этой системы является ее согласованность. Для этой конструкции требуется камера с постоянной частотой кадров из-за времени, необходимого для связи.

Этот подход должен иметь возможность соответствующим образом масштабироваться до более высокой частоты кадров. Максимальный FPS камеры, вероятно, является ограничивающим фактором при определении скорости передачи. Однако, предполагая, что вы используете камеру с произвольно высоким максимальным FPS, будет момент, когда светодиод будет включаться и выключаться так быстро, что он никогда не выключится полностью, а вместо этого будет только тускнеть. Эта точка будет другим возможным ограничивающим фактором скорости передачи. Другим важным фактором, влияющим на работу этой системы, является окружающее освещение помещения. В слишком светлой комнате такой дизайн не подойдет. Эта конструкция требует, чтобы интенсивность окружающего освещения в помещении была значительно ниже интенсивности излучаемого передатчиком света, а приемник не должен быть направлен на какие-либо поверхности с высокой отражающей способностью.

Список литературы:

1. Зеленый, Дж.; Придмор, Т.; Бенфорд, С.; Гали, А., «Расположение и распознавание проекций фонарика для визуальных интерфейсов», Распознавание образов, 2004 г. ICPR 2004. Материалы 17-й международной конференции, том 4, стр. 949,952, 23-26 августа 2004 г.
2. Гали, Ахмед и др. «Визуально отслеживаемые фонарики как устройства взаимодействия». Труды iNTERACT. 2003.
3. Гали, Ахмед и др. «Опосредованное зрением взаимодействие с Ноттингемскими пещерами». Труды SPIE. Том. 5022. 2003.
4. Грин, Джонатан и др. «Кемпинг в цифровой пустыне: палатки и фонарики как интерфейсы к виртуальным мирам». Расширенные рефераты CHr02 о человеческом факторе в вычислительных системах. АКМ, 2002.
5. Лин, К. И. Х. и К. Хирохаши. «Высокоскоростная полнодуплексная система множественного доступа для беспроводной связи на основе светодиодов с использованием видимого света». Материалы международного симпозиума по оптической инженерии и фотонной технологии (ОЕПТ). 2009.
6. Лангер, Клаус-Дитер и 1. Вучич. «Оптические беспроводные внутренние сети: последние усилия по внедрению». Оптическая связь (ЕСОС), 2010 36-я Европейская конференция и выставка по. ИИЭР, 2010.
7. Хоа Ле-Минь; О'Брайен, Д.; Фолкнер, Г.; Любин Зенг; Кьюнгу Ли; Дэкванг Юнг; Юндже О; Ын Тэ Вон, «Связь видимого света в 100 Мбит/с в режиме NRZ с использованием посткорректированного белого светодиода», Photonics Technology Letters, iEEE , т. 1.21, № 1 5, стр. 1 063, 1 065, 1 августа 2009 г.
8. Мураи Р.; Сакаи, Т.; Кавано, Х.; Мацукава, Ю.; Китано, Ю.; Хонда, Ю.; Кэмпбелл, КС, «Новая система связи с видимым светом для улучшенного управления автономными роботами-доставщиками в больнице», System Integration (SII), Международный симпозиум

IEEEISiCE 2012 г., стр. S\O, SI6, 16–18 декабря 2012 г.

9. Руст, IC; Асада, Х. Х., «Двойной подход к интегрированной связи и локализации подводных роботов в видимом свете с применением к неразрушающему контролю ядерных реакторов», Робототехника и автоматизация (ICRA), Международная конференция IEEE, 2012 г., стр. 2445, 2450, 14–18 мая 2012 г.

10. Ольсхаузен, Бруно А. «Псевдоним». PSC 129-сенсорные процессы (2000): 3-4.

11. Сундарам, С.Г. и др., «Связь Bluetooth с использованием интерфейса сенсорного экрана с Raspberry Pi», SoutheastCon, Материалы конференции IEEE 2013 г., 4–7 апреля 2013 г.

References

1. Zeleny. Dj.; Pridmor, T.; Benford, S.; Galí, A., «Расположение и распознавание проекции фонарика для виртуальных интерфейсов», Распознавание образов, 2004 г. ICPR 2004. Материалы 17-й международной конференции, том 4, стр. 949,952, 23-26 августа 2004.

2. Galí, Ahmed и др. «Виртуально отслеживаемые фонарики как устройства взаимодействия». Труды INTERACT. 2003.

3. Galí, Ahmed и др. «Опосредованное зрением взаимодействие с Nottinghamскими peerami». Труды SPIE. Том. 5022. 2003.

4. Grin, Djonatan и др. «Кемпинг в цифровой пустыне: palatki и фонарики как интерфейсы к виртуальным мирам». Рассhireнныe referaty CHr02 o chelovecheskom факторе v vychislitelnyh sistemah. AKM, 2002.

5. Lin, K. I. X. и K. Hirohashi. «Высокоскоростная полноразмерная система множественного доступа для беспроводной связи на основе светодиодов с использованием видимого света». Материалы международного симпозиума по оптической инженерии и фотонной технологии (OEPT). 2009.

6. Langer, Klaus-Dieter и I. Výchich. «Оптические беспроводные внутренние сети: последние усилия по внедрению». Оптическая связь (ECOC), 2010 36-я Европейская конференция и выставка по IER, 2010.

7. Hoa Le-Min; O'Braien, D.; Folkner, G.; Liybin Zeng; Kiyngy Li; Dekvang Iyng; Iyndje O; Yn Te Von, «Связь видимого света в 100 Mbit/s в режиме NRZ с использованием посткорректированного белого светодиода», Photonics Technology Letters, IEEE, т. 1.21, № 15, стр. 1 063, 1 065, 1 августа 2009.

8. Mýrai R.; Sakai, T.; Kavano, H.; Matsýkava, Iý.; Kitano, Iý.; Honda, Iý.; Kempbell, KC, «Новая система связи с видимым светом для улучшения управления автономными роботами-доставками в больнице», System Integration (SII), Международные симпозиумы IEEEISiCE 2012., стр. S\O, SI6, 16–18 декабря 2012.

9. Rýst, IC; Асада, Н. Н., «Двойной подход к интегрированной связи и локализации подводных роботов в видимом свете с применением к неразрушающему контролю ядерных реакторов», Робототехника и автоматизация (ICRA), Международная конференция IEEE, 2012., стр. 2445, 2450, 14–18 мая 2012.

10. Olshayzen, Bruno A. «Псевдоним». PSC 129-сенсорные процессы (2000): 3-4.

11. Sýndaram, S.G. и др., «Связь Bluetooth с использованием интерфейса сенсорного экрана с Raspberry Pi», SoutheastCon, Материалы конференции IEEE 2013., 4–7 апреля 2013.

Материал поступил в редакцию 3.11.2022 г.