

Международный союз электросвязи

**МСЭ-R**  
Сектор радиосвязи МСЭ

**Отчет МСЭ-R SM.2422-0**  
(06/2018)

**Использование волн видимого света  
для широкополосной связи**

**Серия SM**  
**Управление использованием спектра**



Международный  
союз  
электросвязи

## Предисловие

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

## Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Резолюции МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

### Серии Отчетов МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу: <http://www.itu.int/publ/R-REP/en>.)

Серия	Название
<b>BO</b>	Спутниковое радиовещание
<b>BR</b>	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
<b>BS</b>	Радиовещательная служба (звуковая)
<b>BT</b>	Радиовещательная служба (телевизионная)
<b>F</b>	Фиксированная служба
<b>M</b>	Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы
<b>P</b>	Распространение радиоволн
<b>RA</b>	Радиоастрономия
<b>RS</b>	Системы дистанционного зондирования
<b>S</b>	Фиксированная спутниковая служба
<b>SA</b>	Космические применения и метеорология
<b>SF</b>	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
<b>SM</b>	<b>Управление использованием спектра</b>

*Примечание.* – Настоящий Отчет МСЭ-R утвержден на английском языке Исследовательской комиссией в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции МСЭ-R 1.

Электронная публикация  
Женева, 2019 г.

© ITU 2019

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

## ОТЧЕТ МСЭ-R SM.2422-0

**Использование волн видимого света для широкополосной связи**

(2018)

**1 Введение**

Рабочая группа МСЭ-R по управлению использованием спектра инициировала Вопрос МСЭ-R 238/1, который был принят Ассамблеей радиосвязи в 2015 году. Цель настоящего Отчета состоит в том, чтобы выяснить, каким образом и в какой степени использование (ближней) связи на основе волн видимого света (VLC) (или, возможно, лучше использовать термин "оптическая беспроводная связь") способно снизить перегруженность радиочастотного спектра. Разработка новых технологий в сочетании с использованием связи на основе волн видимого света могло бы создать интересную комбинацию и, возможно, стать одним из решений задачи эффективного использования радиочастотного спектра.

Здесь рассматриваются следующие темы:

- характерные особенности (технические и эксплуатационные) применения (ближней) VLC для широкополосной связи с точки зрения использования спектра;
- преимущества и недостатки применения (ближней) VLC (к ним относятся эффективность, помехи, риски для здоровья, кибербезопасность и т. п.);
- новые применения, связанные с использованием волн видимого света для широкополосной связи;
- препятствия для развития широкополосной связи при переходе к всемирному внедрению (ближней) VLC (например, нормативные, культурные и/или экономические);
- способ соединения (ближней) VLC с существующими системами электросвязи (фиксированными и подвижными).

**2 История VLC**

С древних времен до XIX века во всех системах связи VLC человеческий глаз служил в качестве приемника. Характер VLC изменился после того, как Александр Грэм Белл и Чарльз Самнер Тейнтер изобрели фотофон. Они использовали тот факт, что в зависимости от интенсивности света изменяется сопротивление селена, и использовали это свойство химического элемента для передачи аудиосигналов, подсоединив его к телефонному приемнику. До 1950-х годов эти системы претерпели множество усовершенствований, однако большинство материалов, используемых для детектирования, более чувствительны к инфракрасному излучению, что препятствует использованию видимого света в качестве среды передачи.

С появлением светоизлучающих диодов (LED) интерес к использованию VLC возобновился. В частности, появление светодиодов на основе арсенида галлия (GaN) [1] и белых светоизлучающих люминофоров [2] привело к созданию источников видимого света, которые можно модулировать с высокими скоростями без ущерба для их основной роли – освещения. В 2004 году в Японии состоялись первые демонстрации высокоскоростной связи с использованием светодиодов и фотодиодов. Распространение сотовых телефонов с видеокамерами позволило использовать их в качестве приемников VLC. В качестве передатчиков исследователи начали использовать ЖК-экраны и другие отображающие элементы.

Одним из первых органов стандартизации, созданных для работы над стандартом VLC, стал Консорциум по вопросам связи на основе волн видимого света (VLCC) в Японии. В 2008 году Консорциум распространил стандарт связи с использованием инфракрасных волн Ассоциации по инфракрасной технологии передачи данных (irDA) на спектр видимого света.

### 3 Видимый свет и широкополосная связь

#### 3.1 Возможности широкополосной связи с использованием видимого света

При стандартном уровне освещения в помещениях возможны скорости оптического беспроводного доступа с использованием видимого света от нескольких бит в секунду до более чем 10 Гбит/с. VLC способна снизить перегруженность полос спектра низких радиочастот (РЧ), поскольку в качестве дополнительного ресурса для широкополосной связи можно использовать световой спектр.

#### 3.2 Повышение эффективности использования видимого света для широкополосной связи

При использовании VLC создается направленная линия оптической беспроводной связи. Например, отдельная оптическая линия может исходить от потолочной осветительной лампы, направленной прямо в пол. Это позволяет использовать одну и ту же линию связи нескольким пользователям. Несколько устройств VLC могут работать без помех благодаря параллельному использованию канала с пространственным разделением.

#### 3.3 Использование спектра

VLC использует видимую часть спектра (длина волн от 390 нм до 750 нм) и может обеспечить беспроводную связь с применением элементов освещения и отображения информации.

Оптическая беспроводная связь (OWC) способна снизить перегруженность полос спектра низких радиочастот (РЧ), поскольку в качестве дополнительного ресурса для широкополосной связи можно использовать световой спектр.

#### 3.4 Возможные применения/услуги VLC

Возможные услуги связи на основе волн видимого света можно разделить на три группы:

- связь с применением датчиков изображения (ISC);
- низкоскоростная связь с применением фотодиодного приемника (LR-PC);
- высокоскоростная связь с применением фотодиодного приемника (HR-PC).

Для определения низко- и высокоскоростной связи установлен порог скорости передачи данных, измеренной на выходе физического уровня приемника, в 1 Мбит/с. Скорость передачи данных менее 1 Мбит/с считается низкой, а более 1 Мбит/с – высокой.

#### Связь с применением датчиков изображения

Система ISC обеспечивает OWC, используя источники освещения в качестве передатчика и датчики изображения – в качестве приемника. Возможные области применения включают следующее:

- услуги на основе местоположения/позиционирование и навигация в помещении;
- внутриофисные/домашние приложения (в конференц-залах, торговых центрах, музеях, выставочных залах и т. д.);
- связь с подвижными объектами;
- светодиодные метки;
- связь пункта с пунктом (со многими пунктами)/ретрансляция;
- здравоохранение;
- цифровые информационные экраны и доставка контента на основе местоположения;
- услуги передачи данных в транспортном средстве (на борту самолета, в поезде, на корабле, в автобусе и т. д.);
- подключенные к сети и автономные транспортные средства;
- подводная/береговая связь;
- интернет вещей (IoT).

Требования, которые должны соблюдаться при ISC: регулирование яркости, управление энергопотреблением, сосуществование с окружающим светом, сосуществование с другими системами освещения, одновременная связь с несколькими передатчиками и несколькими приемниками (MIMO), источник данных с почти точечным изображением, идентификация модулированных источников света, повторная передача с малой дополнительной нагрузкой, совместимость датчиков изображения и локализация.

Для обеспечения MIMO-связи можно использовать протокол MIMO MAC, с тем чтобы приемное устройство с поддержкой видеочасти имело возможность обрабатывать принятые данные. Система ISC должна поддерживать связь, когда источник света кажется почти точечным, то есть освещает лишь небольшое число пикселей изображения.

Система ISC позволяет поддерживать несколько каналов связи между многими согласованными или несогласованными передатчиками и многими согласованными или несогласованными приемниками.

Система ISC должна поддерживать связь с различными видеочастями с разными значениями частоты выборки изображения (времени считывания), разрешения и частоты кадров. В частности, должна поддерживаться как постоянная, так и переменная частота кадров. Также должно поддерживаться как постоянное, так и переменное оптическое разрешение.

### **Низкоскоростная связь на основе фотодиодов**

Для низкоскоростной связи на основе фотодиодов в качестве передатчиков используются источники света, а в качестве приемников – низкоскоростные фотодиоды. Основные области применения аналогичны перечисленным для датчиков изображения.

Системы LR-PC предназначены в основном для использования в качестве передатчиков в источниках световых меток (светодиодные метки, лампы вспышки в смартфонах и т. д.). Они могут служить механизмом переключения между источниками света, позволяя пользователям сохранять непрерывное сетевое соединение.

Системы LR-PC могут обеспечить механизмы для разработки и предоставления методов координации помех более высокими уровнями и поддерживать механизмы восстановления линии для поддержания соединения в ненадежных каналах и уменьшения задержек в обеспечении соединения.

### **Высокоскоростная связь на основе фотодиодов**

Применение в качестве приемников быстродействующих фотодиодов позволяет обеспечить высокоскоростную двунаправленную сетевую и подвижную беспроводную связь. Основные области применения этого режима включают следующее:

- внутриофисные/домашние приложения (в конференц-залах, торговых центрах, музеях, выставочных залах и т. д.);
- центры обработки данных/промышленные предприятия, безопасная беспроводная связь (производственные ячейки, цеха и т. д.);
- связь с подвижными объектами;
- беспроводную транзитную передачу (транзитную передачу между малыми сотами или системами наблюдения, мосты между ЛВС);
- здравоохранение;
- услуги передачи данных в транспортном средстве (на борту самолета, в поезде, на корабле, в автобусе и т. д.);
- подключенные к сети и автономные транспортные средства;
- подводную/береговую связь;
- интернет вещей (IoT).

В системах HR-PC должна поддерживаться непрерывная потоковая передача данных для всех приложений с двунаправленной функциональностью, а также передача коротких пакетов, где необходима низкая задержка. Следует предусмотреть механизмы поддержки адаптивной передачи, а также связи между несколькими пользователями с разными потоками данных из одного и того же источника света (множественный доступ).

#### 4 Вопросы управления спектром, относящиеся к видимому свету

VLC обладает существенно иными характеристиками распространения по сравнению с волнами радиочастотного спектра. В результате вероятность помех мала, и для световой связи не требуется управление со стороны органа, регулирующего использование спектра.

В IEEE 802 сказано, что операции световой связи следует классифицировать как не требующие лицензирования и не подлежащие исключительному лицензированию. Эту точку зрения подтверждает исследование, проведенное Агентством радиосвязи Нидерландов [18]. Одним из выводов этого исследования является следующее: "Еще остаются проблемы, которые необходимо решить, прежде чем перейти к промышленному внедрению. Мы рекомендуем больше сосредоточиться на усилиях по стандартизации со стороны МСЭ или IEEE, чем на государственном регулировании, ограничив его главным образом требованиями, относящимися к безопасности для здоровья, углеродному следу и коммерческой конкуренции. Стандартизация повысит не только совместимость промышленных изделий, но и совместимость с уже внедренными технологиями". Важное значение имеет соблюдение соответствующих местных правил охраны здоровья и безопасности, относящихся к безопасности и чувствительности человеческого глаза. Устройства, использующие VLC или OWC, должны соответствовать всем местным правилам в отношении побочных радиочастотных излучений и не должны создавать помех в полосах радиочастотного спектра.

Частоты, используемые для оптической связи, обычно выражаются длиной волны. Для волоконно-оптической связи ввиду характеристик поглощения и рассеяния стекла наиболее широко используется длина волны 1550 нм, однако это не относится к VLC нормального состава при нормальных условиях. Здесь используется диапазон частот 1,4–2,5 ТГц, или 400–700 нм.

##### 4.1 Вопрос 1. Возможности и распределение спектра

Расширение возможностей спектра за счет объединения радиочастот, таких как 2,4/5/60 ГГц, с оптической беспроводной сетью, как внутри помещений, так и снаружи: использование возможной синергии между Wi-Fi и Li-Fi, обеспечение смягчения влияния тумана и солнечных лучей в сценариях связи на открытом воздухе, см. [9] и [10]. В [18] говорится: "Внедрение оптической беспроводной связи особенно целесообразно в условиях, когда многим пользователям в ограниченном пространстве требуется доступ к сети с высокой пропускной способностью или когда невозможно использовать обычные радиотехнологии или же они не в состоянии обеспечить необходимый уровень обслуживания. Объединение усилий представителей потенциальных групп пользователей, строительной отрасли, электросвязи, производителей устройств и поставщиков технических решений может способствовать дальнейшему продвижению способов использования и требований по стандартизации и дальнейшим разработкам и выявлению нишевых рынков, на которых внедрение OWC представляется особенно перспективным".

##### 4.2 Вопрос 2. Принципы планирования спектра

Системы VLC обычно внедряются с использованием (существующей) системы светодиодного освещения, в рамках которой видимый свет светодиодов модулируется по интенсивности свечения для беспроводной передачи информации в устройства. Такие системы освещения обычно охватывают большие площади и, как правило, обеспечивают связь со многими расположенными там устройствами. Следовательно, этим устройствам необходим протокол, позволяющий им совместно использовать полосу пропускания светодиодной системы, то есть протокол управления доступом к среде передачи (MAC). Такой протокол MAC обычно делит общую пропускную способность светодиодной системы на части, и каждое активное устройство получает часть, конкурируя с другими устройствами, что подразумевает, что когда одно устройство потребляет больше ресурсов, другому достается меньше. Работа с протоколом MAC и, следовательно, совместное использование ресурсов предполагает, что гарантированную пропускную способность для каждого устройства обеспечить трудно. Установление связи с устройством посредством протокола MAC означает, что соединение устанавливается в процессе согласования с другими устройствами. Этот процесс требует времени, и результат не гарантирован. Это время согласования сокращает время готовности сети для передачи данных и таким образом снижает пропускную способность сети. Кроме того, для обеспечения передачи данных необходимо включить систему светодиодного освещения. Включенное

освещение не всегда желательно, например, когда комната уже заполнена ярким дневным светом или когда пользователь предпочитает темноту или неяркий свет. Следовательно, когда требуется только связь и не требуется освещение, система VLC может приводить к нежелательному дополнительному энергопотреблению.

В качестве альтернативы для передачи данных можно использовать несколько сконцентрированных световых лучей (например, см. [4]). Каждый луч обслуживает единственное устройство и должен быть направлен на него с достаточной точностью. Таким образом, вся пропускная способность этого луча предназначена этому единственному устройству. Следовательно, протокол MAC не требуется, и совместное использование пропускной способности с другими устройствами не осуществляется. Таким образом устройству может быть гарантирована пропускная способность, время на обработку MAC не теряется и чистая пропускная способность сети повышается. Кроме того, луч света направлен только на те устройства, которым он нужен, и ограничен их местоположением; так что энергия луча расходуется оптимально и, следовательно, энергопотребление при обмене данными минимизировано. Преимущественно используются световые лучи с длиной волны более 1,4 мкм, поскольку это позволяет довести мощность луча до 10 мВт без риска для безопасности глаз. Для управления ИК-лучом необходимы средства управления, которые сначала определяют, требуется ли устройству обслуживание, затем локализуют устройство и с помощью этой информации по локализации ориентируют луч в нужном направлении, устанавливая линию связи. Таким образом система управления ИК-лучом обеспечивает пропускную способность там, где это необходимо, и, следовательно, работает с максимальной экономией энергии.

Распространенным методом реализации внутрисистемного управления доступным световым спектром, которое может регулироваться соответствующими техническими стандартами для конкретных применений, служат модели каналов. Некоторая информация содержится в [17].

#### **4.3 Вопрос 3. Согласование на международном и региональном уровнях**

Видимый световой спектр в значительной степени соответствует международным стандартам (например, ETSI для Европы), а также, как и любая система или устройство, внутреннему законодательству и нормам страны. Однако важно, чтобы устройства связи с использованием видимого света не представляли никакой опасности для здоровья. Они должны быть правильно и безопасно установлены, не вызывая никаких вредных электромагнитных помех (ЕМІ).

### **5 Технические и эксплуатационные характеристики ближней широкополосной связи с использованием видимого света**

В этом разделе также содержится информация о продуктах и прототипах, взятая из [16]. Они не обязательно представляют собой широкополосные приложения, а включены для демонстрации имеющихся технологий.

#### **5.1 Передатчик для световой связи**

**Несущая частота** – несущая частота ограничена диапазоном частот видимого света.

**Режим передачи** – МСЭ-R может предложить несколько режимов работы физических устройств на основе видимого света для низко- и высокоскоростной передачи данных, которые позволяют оптимально использовать доступную полосу пропускания оптического сигнала данного источника света для поддержки связи с датчиками изображения, низкоскоростными фотодиодами и высокоскоростными фотодиодами.

**Безопасность для глаз и мерцание** – модулированный свет безопасен для человеческого глаза в отношении частоты и интенсивности света. Кроме того, модулированный свет не стимулирует развитие таких заболеваний, как фотогенная эпилепсия.

**Регулирование яркости** – стандарт поддерживает регулирование яркости для всех применений.

**Дальность связи** – дальность связи зависит от множества внешних факторов (усиление сигнала, коллимация сигнала, мощность источника и т. д.). Это аспекты реализации, которые представлены только в качестве рекомендаций. Комитет должен согласовать использование одной и той же модели канала для оценки функциональных возможностей предлагаемых схем.

**Сосуществование с окружающим светом** – стандарт учитывает сосуществование с окружающим светом, который может отражаться от поверхности передатчика, и тремя классифицированными группами световых служб связи.

**Сосуществование с другими световыми системами** – стандарт учитывает сосуществование с другими световыми системами.

**Идентификация передатчика** – стандарт поддерживает схему идентификации передатчиков, когда приемник или передатчик перемещается в другое место. Приемник может отслеживать идентификатор передатчика.

## 5.2 Приемник световой связи

VLC-приемник измеряет интенсивность видимого света и декодирует передаваемую информацию в соответствии с требованиями приложения.

Приемник OWC, входящий в состав устройства пользователя, должен быть компактным и недорогим, не требовать трудоемкой настройки и должен получать достаточную оптическую мощность, чтобы обеспечить высокую пропускную способность нисходящего потока. Следовательно, он должен обладать большим углом обзора и большой апертурой. Однако увеличение активной области фотоприемника обычно сопровождается уменьшением ширины его полосы пропускания, а оптический фактор, характеризующий расфокусировку светового луча в отношении угла и площади, предполагает, что произведение апертуры на телесный угол уменьшать нельзя. Для увеличения апертуры приемника можно использовать линзы типа "рыбий глаз" или оптику, не формирующую изображения объекта, такую как концентрирующее составное параболическое зеркало, обычно используемое для концентрации солнечной энергии. Для сохранения широкой полосы пропускания можно использовать 2D-массив быстродействующих фотоприемников, совмещенный с отдельными электрическими предусилителями и каскадом суммирования [11]. Как вариант, функцию сбора света можно отделить от функции светового детектирования, оптимизировав эти функции по отдельности.

Широкий поверхностно-решетчатый соединитель (SGC), собирающий падающий свет, интегрированный с волноводом, ведущим к быстродействующему фотодиоду, способен поддерживать прием ООК со скоростью в несколько гигабитов в секунду [12]. Массив SGC и встроенный интегратор позволяют еще больше увеличить апертуру без ущерба для пропускной способности. Ограничение, связанное с оптическим фактором, можно снять с помощью  $\lambda$ -преобразования принимаемого света и его заключения в световодный пластинчатый волновод с присадкой флуорофора [13].

В частности, для OWC с управляемым лучом необходимо обеспечить локализацию и отслеживание пользовательских устройств. Для этого можно использовать, например, технологии Wi-Fi, формирование минимума диаграммы направленности антенны при 60 ГГц [14], контролируемые недорогой камерой ИК-светодиодные метки на устройстве пользователя [15] и т. д.

Оптическая беспроводная связь особенно подходит для условий, когда радиосвязь является (или будет) менее пригодной из-за сочетания ряда факторов:

- дефицита спектра;
- требования очень высокой пропускной способности;
- нежелания использовать радиотехнологию;
- законодательных ограничений;
- потребности в беспроводной передаче, ограниченной пространством здания.

Оптическая связь применима к различным системам. То, как она может быть реализована в этих системах, зависит от требуемого диапазона передачи. В зависимости от этих диапазонов применения OWC можно разделить на пять категорий.

- Сверхближняя беспроводная связь – применима для связи между микросхемами, когда OWC может осуществляться посредством технологии оптической связи в свободном пространстве (Free-Space-Optical Interconnect (FSOI)). Она обеспечивает прямое соединение между микросхемами посредством светового луча. Это применение может решить некоторые проблемы современных проводных электрических соединений, таких как скорость передачи данных, электромагнитные помехи и энергопотребление.
- Ближняя беспроводная связь обычно применяется в беспроводных сетях в пределах человеческого тела (WBAN) и персональных беспроводных сетях (WPAN). Она предназначена для сбора и передачи данных в непосредственной близости к телу человека. В сфере здравоохранения разрабатываются новые системы с использованием OWC, называемые оптическими системами WBAN (OWBAN), поскольку они способны обеспечить безопасную и помехоустойчивую альтернативу WBAN-системам, работающим в радиодиапазоне.

Беспроводная связь среднего радиуса действия – это связь в диапазоне, используемом беспроводными локальными сетями (WLAN). Существующие системы OWC этой категории можно подразделить на VLC и системы связи на основе инфракрасного излучения с регулировкой луча. VLC, как правило, основывается на существующей системе светодиодного освещения и использует те же светодиоды для модуляции данных. Таким образом система VLC охватывает широкую область, в которой несколько пользовательских терминалов совместно используют пропускную способность с применением подходящего протокола MAC. Связь в инфракрасном диапазоне с регулируемым лучом обеспечивает прямое соединение между устройствами. Пользовательские терминалы, находящиеся в помещении, могут независимо обслуживаться несколькими лучами, так что каждый терминал получает гарантированную пропускную способность, не конфликтуя с другими терминалами. Такие системы могут заменить или разгрузить существующие системы (например, Wi-Fi), поскольку они работают в более высокочастотной области спектра, чем радиосистемы WLAN. Другая область применения беспроводной связи среднего радиуса действия – связь внутри транспортных средств и связь транспортных средств с инфраструктурой.

Дальняя беспроводная связь способна действовать на расстояниях от 300 м до примерно 10 км. Например, предприятия и городские учреждения применяют ее для связи между зданиями и в системах городских беспроводных сетей. Для OWC применяется система оптической связи в свободном пространстве (FSO), которая представляет собой передатчик и приемник, соединенные между собой прямым лучом.

Сверхдальняя беспроводная связь может действовать на расстоянии около 84 000 км, что делает ее идеальным средством воздушной и космической связи. Для нее применяется система, подобная FSO, только использующая очень узкий световой луч и вакуумный канал для передачи и приема информации. Эта система называется оптической беспроводной спутниковой сетью FSO (OWSN FSO).

Было затрачено много усилий на прогнозирование конкретных применений технологий доступа. Однако на самом деле очень трудно предсказать, какие приложения и устройства станут наиболее важными через несколько лет. Успех таких вещей, как интернет, смартфоны, планшеты и навигационные системы, не был предсказан до тех пор, пока не стал очевидным.

Успех приложений зависит от всемирного успеха сочетания устройств/операционных систем/инфраструктуры фиксированной и подвижной связи/экосистем существующих приложений.

### 5.3 Текущая деятельность по стандартизации

В 2011 году рабочая группа IEEE 802.15 выпустила стандарт IEEE 802.15.7-2011 "Ближняя беспроводная оптическая связь с использованием видимого света" [3]. В декабре 2014 года был утвержден и в настоящее время осуществляется проект по пересмотру стандарта IEEE 802.15.7-2011 "Оптическая беспроводная связь (OWC)", в который включены светодиодные идентификаторы, связь с использованием оптической камеры (OCC) и LiFi [6]. Группа предполагает разработать стандарт для прозрачных оптических сред передачи с использованием световых волн длиной от 10 000 нм до 190 нм. В марте 2017 года группа разделилась. Группа 802.15.7m продолжит работу над стандартом связи с использованием оптических камер, а целевая группа IEEE 802.15.13 займется проектом

"Многогигабитная беспроводная оптическая связь (OWC)" с использованием высокоскоростных фотодиодов [7]. Кроме того, тематическая группа IECSE 802.15 "Вспомогательные технологии для автомобилей" (Vehicular Assistant Technology (VAT)) рассматривает возможности связи VLC.

В конце 2016 года рабочая группа IEEE 802.11 инициировала создание тематической группы (TIG) по световой связи [8] для определения технических и экономических возможностей использования света в качестве среды передачи для беспроводной связи. В 2018 году утверждена заявка группы на утверждение проекта. За разработку относящегося к стандарту документа отвечает целевая группа 802.11 bb.

15-я Исследовательская комиссия МСЭ-Т отвечает в МСЭ-Т за разработку стандартов для инфраструктуры оптических транспортных сетей, сетей доступа, домашних сетей и сетей энергосистем общего пользования, систем, оборудования, оптических волокон и кабелей. Это включает связанные с ними прокладку, техническое обслуживание, управление, испытания, измерительное оборудование и методы измерений, а также технологии плоскости управления, позволяющие осуществлять развитие в направлении интеллектуальных транспортных сетей, включая поддержку приложений "умных" электросетей. Группа отвечает за стандарт G.vlc "Высокоскоростной приемопередатчик видимого света для помещений – спецификация системной архитектуры, физического уровня и уровня канала передачи данных".

## **5.4 Сведения о деятельности, связанной с VLC, в разных странах**

### **5.4.1 Исследования VLC в Китае**

В Китае в число компаний, ориентированных на выпуск продукции на основе VLC, входят Huawei, China Telecom, Sanan Optoelectronics, Shenzhen Absen, Unilumin, Cnlight и др.

### **5.4.2 Исследования VLC в Японии**

В Японии в число институтов и компаний, занимающихся исследованиями и разработками в области VLC, входят Лаборатория Накагава при Университете Кейо, Panasonic Corporation, CASIO, NEC и FUJI Electric.

### **5.4.3 Исследования VLC в Корее**

В Южной Корее в число институтов и компаний, занимающихся исследованиями и разработками в области VLC, входят Сеульский национальный университет науки и техники, Университет Кунмин, Университет Конджу, Университет Намсеул, Samsung, LG и ETRI.

### **5.4.4 Исследования VLC в Нидерландах**

Группа электрооптической связи при Кафедре технологий электросвязи и электромагнетизма Эйндховенского технологического университета. Компании Signify (прежняя Philips Lighting), KPN и KIEN также сотрудничают в рамках проектов, связанных с VLC.

### **5.4.5 Исследования VLC в Турции**

Основные научно-исследовательские институты, работающие в области VLC, включают Tubitak Bilgem, Okatem, Ozyegin University и Istanbul Medipol University. Компании Ford Otosan, Farba, Aselsan и Turk Telekom сотрудничают в рамках проектов, связанных с VLC.

## **5.5 Сведения о связанной с VLC деятельности академических, отраслевых и научно-исследовательских институтов**

### **5.5.1 Компания Basic6**

Basic6 – это основанная в Соединенных Штатах Америки стартап-компания, которая разрабатывает систему позиционирования в помещении GeoLiFi, использующую инфраструктуру освещения магазина для анонимной бесконтактной передачи сообщений о доступности товаров, сведений о продуктах, рекламных объявлений и списков покупок покупателям и сотрудникам. В то же время данное решение предоставляет ритейлеру подробную аналитику по таким показателям, как степень

вовлеченности персонала и привлечения клиентов и время простоя по магазину и отделам. Компания работает над программным обеспечением и активно сотрудничает с другими компаниями, специализирующимися на осветительных приборах, которые поставляют оборудование LiFi (например, с OLEDCOMM [28] – французской стартап-компанией при университете Версаль Сен-Кантен-ан-Ивелин).

### 5.5.2 Точка доступа LiFi Института Фраунгофера им. Генриха Герца (ННИ)

Точка доступа LiFi, разработанная в Институте Фраунгофера ННИ, позволяет устанавливать частные высокоскоростные сети без прокладки кабелей. Система обеспечивает высокую скорость передачи данных до 1 Гбит/с на расстоянии до 30 м, а ее малый размер позволяет легко отрегулировать и установить систему без существенных затрат. Прототип был установлен в конференц-зале на острове Майнау (Германия, озеро Констанс). ННИ также предоставляет компоненты для системы световой связи на базе готовых светодиодов белого света с использованием трех цветных лучей (RGB), способной обеспечивать скорости передачи данных до 3 Гбит/с.

Кроме радиовещательных модулей LiFi, передающих данные в одном направлении, технология, разработанная в IPMS Фраунгофера, обеспечивает возможность связи в режиме реального времени и двунаправленной дуплексной связи.

### 5.5.3 Компания Hyperion Technologies

Турецкая стартап-компания Hyperion Technologies разрабатывает новейшие решения на основе оптической беспроводной связи, позволяющие использовать беспроводные сети нового поколения как на уровне доступа, так и на уровне транзитной передачи. Компания внесла на рассмотрение проект по стандартизации 802.15.7r1 и продолжает участвовать в группах стандартизации световой связи 802.11 и оптической беспроводной связи 802.15.13.

### 5.5.4 Lucibel

Французская компания Lucibel, специализирующаяся на проектировании систем освещения нового поколения на основе светодиодных технологий, разработала и предлагает первый в Европе промышленный осветительный прибор LiFi-Ores [5]. Решение Lucibel LiFi позволяет развернуть полную беспроводную сеть с двунаправленной линией передачи данных со скоростью до 42 Мбит/с. Система Lucibel LiFi обеспечивает высокоскоростную подвижную связь внутри сети, поддерживая множественный доступ и передачу обслуживания. Каждый осветительный прибор LiFi может одновременно обслуживать несколько (до восьми) станций LiFi. Встроенная функция передачи обслуживания позволяет автоматически поддерживать стабильное соединение с пользователем, переходящее от одного светильника к другому. Первым заказчиком, установившим прототип Lucibel, стала девелоперская компания Sogeprom, входящая в холдинг Société Générale Group, которая испытала высокую пропускную способность LiFi в своих помещениях в Париже. Решение LiFi также внедряет компания Microsoft в своем инновационном центре в Исси-ле-Мулино, чтобы предложить услуги беспроводной связи нового поколения своим клиентам.

### 5.5.5 Luciom

Luciom – это французская стартап-компания, созданная в октябре 2012 года. В ассортименте компании несколько продуктов:

- Geo VLC – комплекты узкополосных передатчиков/приемников разного назначения для работы внутри помещений;
- системы высокоскоростной передачи данных со светодиодными интернет-передатчиками LiFi и LiFi/инфракрасными USB-ключами, обеспечивающие скорость передачи данных 20 Мбит/с (по линии вниз) и 5 Мбит/с (по линии вверх).

### 5.5.6 LVX System

LVX System – американская компания, расположенная в Центре управления космическими полетами им. Кеннеди, – обладает запатентованной технологией высококачественных светодиодных систем световой связи, которые обеспечивают надежную высокоскоростную передачу данных. Недавно она подписала с НАСА Соглашение о космическом праве.

### 5.5.7 pureLiFi

pureLiFi – основанная в 2012 году профессором Хаасом из Эдинбургского университета стартап-компания, которая вывела на рынок технологию световой связи после четырех лет интенсивных исследований. Сначала компания разработала потолочный блок Li-Flame, способный поддерживать связь по линиям вверх и вниз со скоростью 10 Мбит/с на расстоянии до 3 м с использованием стандартных светодиодных светильников. Затем pureLiFi усовершенствовала Li-Flame и предложила LiFi-X – драйверы и приемники нового поколения, которые демонстрировались на Всемирном конгрессе по подвижной связи в 2016 году. LiFi-X представляет собой точку доступа, которая подключается к любому светодиодному светильнику с поддержкой LiFi. Она обеспечивает дуплексную связь со скоростью передачи данных 40 Мбит/с по линиям вверх и вниз и полную мобильность со множеством пользователей на каждую точку доступа LiFi.

### 5.5.8 Velmenni

Эстонская стартап-компания Velmenni успешно провела испытания технологии LiFi в различных офисах и промышленных помещениях в Таллинне (Эстония) и в настоящее время реализует многочисленные экспериментальные проекты с использованием световой связи в различных промышленных условиях (в частности в сотрудничестве с Airbus для испытания технологии на самолетах). Прототип состоит из светодиодного приемопередатчика и внешнего фотоприемника, подключенного к ноутбуку через порт USB. Система работает в дуплексном режиме, обеспечивая скорость передачи данных по линиям вверх и вниз 1 Гбит/с. В демонстрационных системах расстояние между передатчиком и приемником составляет несколько десятков сантиметров. Однако для того чтобы прототип стал коммерческим продуктом, потребуется еще несколько лет.

## 6 Другие важные аспекты решений о применении видимого света (потребности пользователей, социально-экономические аспекты)

Что касается безопасности для глаз, то модулированный свет, видимый человеческим глазом, должен быть безопасным в отношении частоты и интенсивности света (например, IEC 60825-1:2014) и не должен провоцировать такие заболевания, как светочувствительная эпилепсия.

### Вопросы безопасности глаз и нормативные документы

Наиболее уязвимой частью человеческого глаза является сетчатка, расположенная в задней части глаза, которая осуществляет фактический процесс зрения. Видимый свет (очевидно) достигает сетчатки, и для того чтобы не причинять ей (постоянный) вред, мощность воздействия должна оставаться ограниченной. В случае VLC светодиодные системы предназначены для освещения и обычно излучают расходящиеся конусы света, не причиняя сетчатке вреда в нормальных условиях. В оптической связи с регулируемым лучом лучи видимого света (подобные лучам лазерной указки) могут наносить вред; их мощность должна оставаться ниже долей милливатта. Однако при использовании инфракрасных лучей в силу физиологии человеческого глаза, прежде чем луч достигает сетчатки, его интенсивность значительно ослабляется (роговицей, хрусталиком, стекловидным телом). Следовательно, до превышения предела безопасности для глаз допустимы гораздо более высокие мощности; при длине волны свыше 1400 нм допустимы мощности несущей частоты до 10 мВт.

Стандарты безопасности для глаз приведены в нормативных документах IEC 60825 и ANSI Z136. В исследовании [18] говорится: "Для оптических беспроводных сетей наиболее важным вопросом является защита глаз и кожи. Хотя при применении оптических беспроводных сетей широким кругом лиц их можно сделать безопасными практически в любых условиях, рекомендуется тщательнее изучить вопросы безопасности для тех, кто работает в непосредственной близости от интенсивных источников света, занимаясь их установкой и обслуживанием".

### Внедрение и развертывание

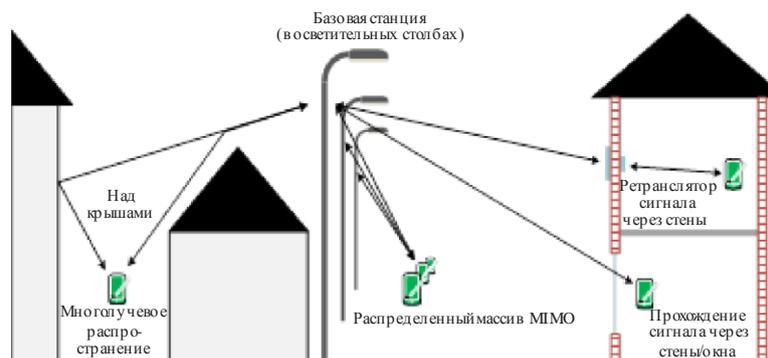
Как и во всех системах связи, в данном случае необходимо обеспечить как функциональность систем, так и защиту пользовательских данных. В [18] сказано: "Внедрению и развертыванию OWC способствует четкое представление о взаимодействии с существующими или новыми популярными

стандартами беспроводной связи, такими как Wi-Fi, например, в области аутентификации, шифрования и бесшовного роуминга между точками доступа. Там, где это возможно, рекомендуется поощрять использование уже существующих решений, например, в отношении аутентификации и шифрования сигналов. Такое повторное использование может облегчить разработку механизмов взаимодействия (например, передачи обслуживания) между OWC и технологиями радиосвязи. Эти новые разработки с относительно небольшой базой пользователей также помогут получить пользу от улучшения решений с более широкой пользовательской базой".

### Промышленность и производство

В сценариях промышленного освоения и производства в настоящее время используются в основном проводные решения, что связано с высокими требованиями к надежности, безопасности и малой задержке. Промышленные протоколы (ProfiNet) предоставляют клиентам регулярный доступ к сети и обеспечивают передачу данных с короткой задержкой в течение определенного периода времени. Промышленная беспроводная связь также привлекательна благодаря простоте развертывания и гибкости. Решения на основе VLC могут обеспечить преимущества по сравнению с решениями на основе радиосвязи в следующих областях.

- i) Пригодность к плотному развертыванию. Производство относится к так называемым сценариям плотного развертывания беспроводной связи с множеством одновременно поддерживаемых каналов, которые гарантируют вышеупомянутое высокое качество обслуживания. VLC может обеспечивать безопасную беспроводную связь с короткой задержкой, поскольку имеет четко ограниченные условия распространения в чрезвычайно малых сотовых ячейках. Кроме того, VLC можно использовать в дополнение к радиосистемам для разгрузки трафика данных.
- ii) Сосуществование с другими радиослужбами. Одной из серьезных проблем промышленных беспроводных сетей является сосуществование с другими службами. Для использования других радиочастотных каналов, работающих в том же спектре, требуются такие протоколы, как прослушивание перед передачей, которые чреваты непредсказуемыми задержками и не соответствуют требованиям малого времени ожидания. Одним из способов решения этих проблем является получение выделенного спектра для промышленной беспроводной связи. Другим способом облегчить текущую ситуацию может стать VLC. Отметим, что окружающий свет мало влияет на VLC, что объясняется ниже в разделе "Техническая осуществимость VLC".
- iii) Устойчивость к глушению. Нарушители, действуя с больших расстояний за пределами предприятия, с помощью простых радиочастотных устройств могут легко заглушить используемый радиочастотный спектр. Очевидно, что применение беспроводных радиосоединений вместо кабелей может в целом ослабить безопасность эксплуатации подключенных производственных объектов. Кроме того, радиосвязи может вредить присутствие сильных электромагнитных помех, например, на сталелитейном заводе, атомной электростанции или энергетической установке. Со своей стороны VLC нейтральна к РЧ-радиоглушению и ЭМП, так как распространение сигнала ограничено пределами установки.

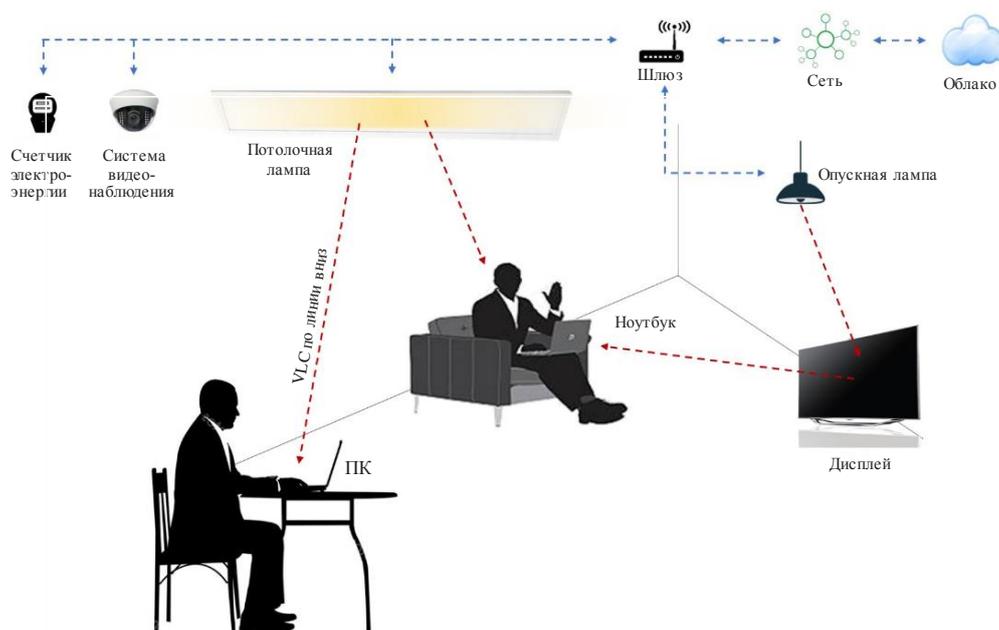


## "Умный" дом

В настоящее время понятие "умный" дом включает множество видов бытовой техники, систему управления энергопотреблением, систему наблюдения за здоровьем, передовые мультимедийные услуги и систему видеонаблюдения и безопасности, соединенные посредством сложной системы проводных и беспроводных соединений. Подключенные устройства "умного" дома могут работать интерактивно и независимо друг от друга, и их возможности повышают качество жизни в домохозяйстве самыми разными способами, такими как автоматизация решения рутинных задач, предоставление медицинских услуг, рационализация потребления энергии, повышение индивидуальной эффективности, повышение безопасности жилища, а также развлечения и т. д.

В "умном" доме используется подход, предусматривающий организацию локальной беспроводной сети, и он основан на таких стандартах, как локальная сеть (ЛВС), сеть в пределах человеческого тела (BAN) или персональная сеть (PAN), которые представляют собой сети малого размера, действующие на расстояние от 12 до 100 м, такие как Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi, Z-Wave и т. д.

VLC можно использовать для подключения устройств, передающих конфиденциальную информацию, таких как камеры видеонаблюдения, детские мониторы и т. д., и вследствие этого она может представлять собой более приватную и безопасную сеть [19].

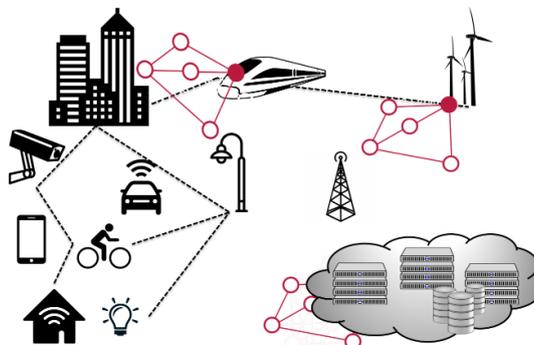


Report SM.2422-02

## Интеллектуальная карта города (геном города)

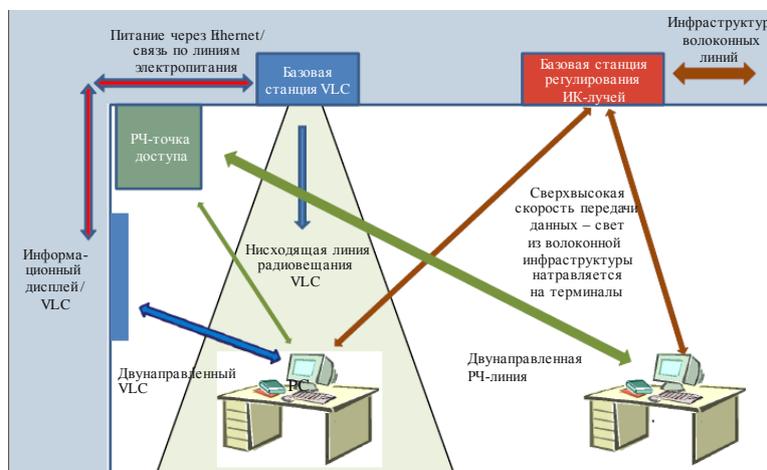
Города можно рассматривать как сложные развивающиеся живые организмы. Дело не только в людях, которые живут в городе и представляют собой сложные "системы" сами по себе. Сама жизнь, кажется, становится все сложнее в силу разрушительных и экспоненциально нарастающих изменений. Важную роль здесь играют технические разработки, особенно в области ИКТ. Однако не факт, что при этом улучшается качество жизни, что составляет их главную цель. Здесь существуют огромные возможности, но могут возникнуть и не менее зловещие угрозы. Для достижения действительно качественного прогресса необходим комплексный системный подход. Инкрементального, линейного мышления и проектирования недостаточно. Первый шаг состоит в понимании различия между аппаратными средствами и программным обеспечением города, как между телом и интеллектом человека или живого организма, генотипом и фенотипом или жилищем и домом. Первые части осязаемы, вторые – нет. В общем случае первое относится к инфраструктуре, а второе – к супраструктуре. Очевидно, что инфраструктура и супраструктура взаимозависимы, и их нельзя рассматривать по отдельности. Это сложная задача, поскольку инфраструктура относится к сфере технических наук, а знания о супраструктуре – главным образом к семиотике.

В области инфраструктуры сети ИКТ приобретают все более важное значение. Именно здесь могут быть полезны центры беспроводной и фотонной связи. Предполагается, что в сетях оптической, фотонной связи основными компонентами станут волоконно-оптические и фотонные интегральные схемы (ФОС) нового поколения. Конечно, это относится к базовым и городским сетям. Беспроводные технологии сделают ближе точки доступа. В будущем можно ожидать перехода от фиксированной связи к беспроводной на периферии сети. Для этой цели хорошо подходят элементы оборудования улиц, а точнее уличные фонари. Отметим, что только в Нидерландах около 4 млн. уличных фонарей. Они могут составить сеть оптических ячеек. От уличных фонарей трафик может передаваться в направлении дома и обратно с использованием ретрансляторов в многофункциональных окнах нового поколения всех 7,5 млн. жилых домов и 300 000 нежилых зданий. Внутри домов и зданий технологией будущего станет VLC.



Report SM.2422-03

При рассмотрении домов и зданий и связей между ними посредством других физических инфраструктур в общественном пространстве становится очевидным, что опыт изучения застроенной окружающей среды может внести свой вклад. Весьма оригинальной является идея, что организацию жилищного и коммунального хозяйства и общественных инфраструктур и супраструктур можно рассматривать как развитие живых организмов со своим телом и разумом и изучать их генотип и фенотип. Действительно, если сегодня геном человека можно определить в течение часа менее чем за сотню евро, то почему это невозможно сделать для этих гораздо более простых физических конструкций? И какие при этом открываются новые возможности! Затем можно точно вычислить макропараметры, такие как энергетические показатели и показатели безопасности и устойчивости. Тогда можно будет разрабатывать и оценивать сценарии их улучшения.



Report SM.2422-04

Что касается данных, которые можно получать или передавать в дома, здания и объекты общественной инфраструктуры, то ясно, что решающую роль может сыграть центр научного исследования этих данных. Получение из исходных данных информации, знаний и новой мудрости позволит создать бесчисленное количество приложений как для инфраструктур, так и для супраструктур, сетей и служб, жилых домов и нежилых зданий. Они изначально должны

проектироваться с учетом требований безопасности. Аналогично можно провести исследования методов моделирования сложных систем, например, с использованием теории графического и матричного анализа сложных адаптивных систем.

Вышесказанное существенно приближает решение задачи моделирования вполне реалистичных сценариев развития "умных" городов благодаря обобщенному системному подходу.

В отношении потребностей пользователей и социально-экономических аспектов необходимы дополнительные исследования, поскольку области применения здесь весьма разнообразны и не полностью изучены. В [18] говорится: "Также рекомендуется стимулировать тесные контакты между (национальными) промышленными НИОКР и академическими исследованиями, поскольку (все еще) имеет место широкое разнообразие изучаемых технологий OWC. Раннее выявление среди них потенциально выигрышных технологий, а также содействие конвергенции и взаимодействию будут способствовать промышленной разработке и ускорению коммерческого внедрения".

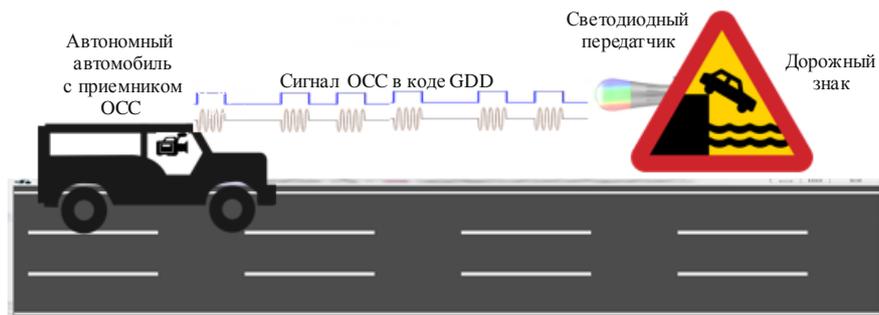
Также требуется работа и исследования по вопросам фактического размещения оборудования VLC внутри зданий и офисов, как указано в [18]: "OWC не заменяет, а дополняет использование других видов передачи, например Wi-Fi для инфраструктуры связи внутри здания, в которой OWC может разгружать Wi-Fi от приложений с высокой потребностью в пропускной способности. Ввиду такого взаимодействия с существующей технологией Wi-Fi мы рекомендуем проектировать и строить офисы, общественные здания и жилые дома с учетом потенциала OWC, в частности при создании фиксированной (кабельной) инфраструктуры, в которой предусмотрено достаточно точек доступа и транзитных каналов OWC. Сочетание транспортировки данных с питанием оптических беспроводных точек доступа по кабелям Ethernet (Power over Ethernet) становится все более перспективным, поэтому рекомендуется учитывать его в планах строительства".

#### **Подключенные к сети и автономные транспортные средства**

VLC может применяться для подключенных к сети автомобилей и автономных транспортных средств. Обычно водители в ходе движения должны следить за дорожными знаками. Автономные транспортные средства распознают дорожные знаки так же, как программы распознавания образов, но иногда они могут ошибаться. Одним из примеров технологии для подключенных к сети и автономных транспортных средств является распознавание дорожных знаков с использованием VLC и Словаря графических данных (GDD). GDD разработан в целях создания общей платформы для передачи информации о существующих дорожных знаках и пиктограммах в коде ISO TC204. Система кодирования разработана таким образом, что не зависит от национального языка, так что и интерпретируемые данные не зависят от языковых и региональных различий. Словарь предназначен для поддержки обмена сообщениями системы интеллектуального транспорта. Потребовался специальный подход для классификации большого набора существующих дорожных знаков и пиктограмм по функциональным группам – это сделано с помощью информационных элементов.

В качестве передатчика предлагается разработанный кодер (генератор) данных GDD. Кодированные данные можно передавать с использованием передатчиков двух типов, один из них – это просто светодиодный передатчик сигнала, устанавливаемый вместе с существующим дорожным знаком, который передает кодированные данные, соответствующие определенному дорожному знаку. Преимуществом этого простого передатчика является его применимость ко всем существующим дорожным знакам. Единственное отличие каждого знака – уникальный передаваемый им код.

Приемник GDD состоит из камеры с датчиком изображения и блока декодирования данных. Изображения считываются датчиком изображения, расположенным за объективом оптической камеры, а полученные данные передаются системой связи оптической камеры [20].



Report SM.2422-05

## 7 Выводы

Недавние разработки в области OWC, деятельность по стандартизации и анализ существующих осветительных приборов показывают, что VLC представляет собой зрелую технологию, которая обладает множеством преимуществ с точки зрения разгрузки радиочастотного спектра.

Можно сделать вывод, что управление устройствами VLC и спектром VLC не является задачей нормативного регулирования, а должно быть организовано посредством технических стандартов. Может быть полезным тесное сотрудничество органов стандартизации, занимающихся VLC с теми, которые занимаются традиционными приложениями на основе радиотехнологий.

## Справочные документы

- [1] S. Nakamura, T. Mukai, and M. Senoh, "Candela Class High Brightness InGaN/AlGaIn Double Heterostructure Blue Light Emitting Diodes", *Applied Physics Letters*, vol. 64, no. 13, pp. 1687-1689, 1994.
- [2] J. S. Kim, *et al.*, "White-light Generation Through Ultraviolet-emitting Diode and White-emitting Phosphor", *Applied Physics Letters*, vol. 85, no. 17, pp. 3696-3698, 2004.
- [3] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 15.7: "Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light", in IEEE Std 802.15.7-2011, vol., no., pp. 1-309, Sept. 6, 2011.
- [4] A.M.J. Koonen, C.W. Oh, K. Mekonnen, Z. Cao, E. Tangdiongga, "Ultra-high capacity indoor optical wireless communication using 2D-steered pencil beams", *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(20):7482669.
- [5] Jaesang Cha *et al.*, "A new band plan for IEEE802.15.7m", Online: <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/17/15-17-0174-00-007a-a-new-band-plan-for-15-7m.pdf>.
- [6] IEEE 802.15.7r1 Short-Range Optical Wireless Communications Task Group. [http://www.ieee802.org/15/pub/IEEE%20802\\_15%20WPAN%2015\\_7%20Revision1%20Task%20Group.htm](http://www.ieee802.org/15/pub/IEEE%20802_15%20WPAN%2015_7%20Revision1%20Task%20Group.htm).
- [7] "Multi-Gigabit per Second Optical Wireless Communications (OWC) with Ranges up to 200 meters". <https://development.standards.ieee.org/get-file/P802.15.13.pdf?t=9273550003>.
- [8] [http://www.ieee802.org/11/Reports/lctig\\_update.htm](http://www.ieee802.org/11/Reports/lctig_update.htm).
- [9] M. Ayyash *et al.*, "Coexistence of WiFi and LiFi toward 5G: concepts, opportunities, and challenges", in *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 2, pp. 64-71, February 2016.
- [10] D. Schulz *et al.*, "Long-Term Outdoor Measurements Using a Rate-Adaptive Hybrid Optical Wireless/60 GHz Link over 100 m", *Proc. ICTON 2017* (invited).

- [11] A.M. Khalid *et al.*, "10 Gbps indoor optical wireless communication employing 2D passive beam steering based on arrayed waveguide gratings", Proc. IEEE Summ. Top., TuC2.3, Newport Beach (2016).
- [12] J. Zeng *et al.*, "A 5Gb/s 7-Channel Current-mode Imaging Receiver Front-end for Free-Space Optical MIMO", Proc. IEEE MWSCAS, Cancun (2009).
- [13] Z. Cao *et al.*, "200 Gbps OOK Transmission over an Indoor Optical Wireless Link Enabled by an Integrated Cascaded Aperture Optical Receiver", Proc. OFC, PDP Th5A.6, Los Angeles (2017).
- [14] S. Collins *et al.*, "High gain, wide field of view concentrator for optical communications", Opt. Lett., p. 1756-(2014).
- [15] A.M. Khalid *et al.*, "Bi-directional 35-Gbit/s 2D Beam Steered Optical Wireless Down-link and 5-Gbit/s Localized 60-GHz Communication Uplink for Hybrid Indoor Wireless Systems", Proc. OFC, Th1E.6, Los Angeles (2017).
- [16] Ivica Stevanović, "Light Fidelity (LiFi)", Federal Office of Communications OFCOM Licences and Frequency Management Division Radio Technology Section, December 14, 2016.
- [17] <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/15/15-15-0746-01-007a-tg7r1-channel-model-document-for-high-rate-pd-communications.pdf>.
- [18] Optical Wireless Communication: options for extended spectrum use, Stratix and Technical University of Eindhoven commissioned by the Dutch Radiocommunications Agency (Agentschap Telecom) Ministry of Economic Affairs and Climate policy, December 2017.
- [19] <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/15/15-15-0492-05-007a-technical-considerations-document.docx>.
- [20] GDD based Automatic Traffic Sign Recognition Using CamCom Technology, IEEE 15-18-0031-00-0vat, 2018. 1.

#### Дополнительная справочная литература

- R. D. Roberts, S. Rajagopal and S. K. Lim, "IEEE 802.15.7 physical layer summary", *IEEE GLOBECOM Workshops*, pp. 772-776, Houston, TX, 2011.
  - T. Baykas *et al.*, "Let there be Light Again! An Amendment to IEEE 802 Visible Light Standard is in Progress", *IEEE COMSOC MMTTC E-Letters* March 2016.
  - M. Uysal, *et al.*, "TG7r1 CIRs Channel Model Document for High-rate PD Communications", Online: <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/15/15-15-0747-00-007a-tg7r1-cirs-channel-model-document-for-high-rate-pd-communications.zip>.
  - I. Stevanovic "Light Fidelity", Report OFCOM Switzerland.
-