

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ БЕСПРОВОДНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА БАЗЕ СВЕТОДИОДОВ ВИДИМОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

И.В. Гришин^{1*}, В.А. Хричков¹, Т.Р. Ялунина¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

*Адрес для переписки i.v.grischin@gmail.com

Информация о статье

УДК 621.3.052.9

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Гришин И.В., Хричков В.А., Ялунина Т.Р. Перспективы развития беспроводных систем передачи данных на базе светодиодов видимого излучения // Труды учебных заведений связи. 2017. Том 3. № 2. С. 68–76.

Аннотация: В настоящее время технология передачи данных с использованием видимого света рассматривается как одно из возможных решений надвигающейся проблемы кризиса спектра радиочастот. Данная технология позволяет совмещать высокие показатели энергоэффективности с защищенностью и высокими скоростями передачи данных. В статье исследуется возможность внедрения беспроводных систем передачи данных на базе светодиодов видимого излучения, а также приводится расчет их пропускной способности.

Ключевые слова: системы передачи при помощи видимого света, технология VLC, Li-Fi.

WIRELESS DATA TRANSMISSION SYSTEMS BASED ON VISIBLE LIGHT EMITTING DIODES: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES

I. Grishin¹, V. Hrichkov¹, T. Yalunina¹

¹The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunication,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Article info

Article in Russian

For citation: Grishin I., Hrichkov V., Yalunina T. Wireless Data Transmission Systems Based on Visible Light Emitting Diodes: Challenges and Opportunities // Proceedings of Educational Institutes of Communication. 2017. Vol. 3. Iss. 2. PP. 68–76.

Abstract: Currently, the technology of data transmission using visible light is considered as one of the possible solutions to the impending problem of radio frequencies spectrum crisis. Visible light communications allow combine high energy efficiency with security and high data transmission speeds. The article explores the possibility of introducing data transmission technology with the help of visible light, and also calculates the throughput of such networks.

Keywords: transmission systems using visible light, VLC technology, Li-Fi.

С ростом популярности смартфонов потребность в беспроводном трафике данных растет в геометрической прогрессии. В связи с этим надвигается кризис спектра радиочастот (РЧ), т. к. требования к скорости передачи данных продолжают расти и, несмотря на развитие технологий в области увеличения эффективности использования спектра, ожидается, что спрос трафика будет много больше допустимой пропускной способности.

Поскольку спектр РЧ ограничен и, к тому же, весьма дорог, в настоящее время активно изучаются новые методы беспроводной передачи данных. Одним из таких направлений являются оптические беспроводные сети, которые предлагают значительные преимущества в сравнении с радиосетями. Оптический диапазон спектра электромагнитных волн обширен и включает в себя: инфракрасное излучение, видимый свет и ультрафиолетовое излучение. Частным случаем реализации оптических беспроводных сетей являются системы передачи видимым светом (СПВС). Технология передачи данных посредством светодиодов видимого излучения нова и представляет собой вполне реальный метод решения проблемы кризиса спектра РЧ или, по крайней мере, его смягчение. К тому же, существует готовая инфраструктура для развертывания таких сетей, ведь светодиоды уже интегрированы почти в каждый дом. А проблема транзитных соединений может быть решена с помощью существующей технологии PLC (от англ. Power Line Communication).

Необходимо также отметить, что сигнал в СПВС может занимать безлицензионные длины волн – от 380 нм до 750 нм. Общий ресурс возможных частот видимого спектра – 390 ТГц, что в 6,5 тысяч раз больше, чем весь спектр частот радиосвязи (около 60 ГГц). Высокие скорости передачи могут реализовываться за счет использования недорогих внешних интерфейсов с коммерчески доступными светодиодами. Кроме того, до тех пор, пока выполняются правила техники безопасности для глаз, СПВС не несут вреда здоровью.

Еще одним достоинством таких сетей является их защищенность. В связи с тем, что свет не распространяется через непрозрачные объекты и стены, СПВС могут быть заключены внутри помещений. Это устраняет опасения по поводу перехвата информации. Та же способность оптического сигнала может быть использована для исключения помех между соседними сотами. К тому же, так как оптическое излучение не мешает другим электромагнитным волнам, к СПВС не чувствительно электрооборудование, что обеспечивает безопасную передачу данных в районах, где электромагнитное излучение запрещено или нежелательно. К таким местам относятся авиация, больницы, здравоохранение, нефтяные и атомные электростанции и др.

В прошлом, значительную выгоду в беспроводной мобильной связи можно было получить сокращением межсотового расстояния. За последние 25 лет с помощью уменьшения размера сот спектральная эффективность сети была увеличена на два порядка. В последнее время распространены гетерогенные сети, то есть сети, состоящие из разного размера сот: микро, пика, фемто и др. Фемтосоты работают на коротком расстоянии, используя низкий уровень мощ-

ности излучения, в связи с чем имеют малую стоимость. Развертывание фемтосот благоприятствует повторному использованию частот и, следовательно, увеличивает пропускную способность на единицу площади в пределах системы. Тем не менее, несогласованное развертывание малых сот также вызывает дополнительное взаимодействие и внутрисотовые помехи, что накладывает ограничение на размещение этих базовых станций, так как иначе повторное использование частот может компенсировать выгоду от использования фемтосот.

Однако технология использования фемтосот может быть легко применена в СПВС для того, чтобы устранить помехи, созданные путем тесного повторного использования спектра РЧ в гетерогенных сетях. Оптические фемтосоты (ОФС) не мешают работе соседних ячеек. ОФС не только улучшают покрытие внутри помещений, но они, т. к. не генерируют помехи для соседних сот, способны повысить пропускную способность беспроводной связи РЧ сетей.

ОФС позволяют чрезвычайно плотно использовать повторные частоты благодаря свойствам световых волн. Охват каждой отдельной ячейки ограничен, а стены позволяют системе предотвращать помехи между соседними сотами. Это удовлетворяет необходимость развертывания нескольких точек доступа в закрытом пространстве, обеспечивая повсеместное покрытие в дополнение к почти равномерному освещению.

Технологию СПВС можно использовать как поверх основного освещения, так и в дополнение к нему, например, только в рабочей зоне. При втором способе реализации технологии не требуется расчета межсимвольной интерференции, возникающей вследствие наложения сигналов от соседних источников излучения. Однако при развертывании СПВС по всей площади необходим точный расчет расположения источников, с целью исключения негативного воздействия взаимных влияний.

Предполагается, что СПВС будут нацелены на предоставление тех же услуг, что и существующие на сегодняшний день беспроводные сети доступа Wi-Fi. Однако рассматриваемая технология не сможет полностью их вытеснить, потому как имеет множество недостатков, к которым главным образом относятся невозможность функционирования сетей при выключенном свете, непроходимость световых потоков через непрозрачные объекты (что, с другой стороны, является и преимуществом СПВС) и многое другое, и не сумеет удовлетворить все достоинства систем передачи посредством РЧ. Поэтому свое место СПВС могут найти в качестве дополнения к существующим сетям и могут быть развернуты в рамках гетерогенной сети, включающей как системы передачи видимым светом, так и радиоволнами.

Например, нисходящий поток может быть организован при помощи видимого света, а восходящий – с использованием радиочастот. Это позволит реализовать беспроводные точки доступа в полнодуплексном режиме. Такие сети найдут применение, по большей части, в общественных местах, где большую роль играет достаточная пропускная способность систем передачи (в читальных залах, в залах ожидания аэропортов и вокзалов, в кафе и торговых центрах).

Благодаря ограниченности охвата световых волн появляется возможность создавать большое количество ОФС на одной площади, что ведет к дополнительному увеличению пропускной способности одной соты.

Выход в интернет может быть реализован посредством технологии PLC. К адаптеру PLC будет подключен приходящий в помещение по витой паре сигнал, через сеть сигнал придет на источники света, в каждом из которых будет стоять демодулятор, а также схема модулирования сигнала и разнесения на несущие (при использовании ламп с несколькими светодиодами, излучающими на разных длинах волн). На устройства сигнал с источников излучения будет поступать с помощью небольшого приемника, который будет подключен через USB-порт. Главным элементом приемника является фотодиод (преобразующий оптическое излучение в электрический сигнал), используемый совместно с оптическими фильтрами для разных несущих частот. На телефон сигнал может поступать непосредственно, без использования дополнительных приемников, так как он и так имеет встроенный фотодиод, а обработка сигнала может быть полностью осуществлена в телефоне с помощью соответствующего приложения. Однако так как в телефонах не встроены оптические фильтры, необходимо, чтобы передача осуществлялась либо на одной несущей, либо на многих несущих передавался один и тот же сигнал. В таком случае, при подключении к сети, во временной интервал, отведенный под передачу для сотового устройства, источник будет передавать только одну последовательность бит.

Передача на нескольких несущих может осуществляться при помощи использования RGB-источников излучения. Физически это три светодиода (красный, зеленый, синий) под общей линзой. Принцип их работы основывается на том, что при одновременном излучении на трех длинах волн, соответствующих указанным выше цветам, человеческий глаз воспринимает излучение как белое. Данный тип источников дает возможность передавать информацию параллельно на каждой несущей и таким образом увеличить пропускную способность системы, которая будет складываться из полос пропускания синего, зеленого и красного светодиодов.

Однако передача информации на трех несущих порождает проблему восприятия освещения человеческим глазом, ведь последовательности бит, передаваемых светодиодами, не одинаковы, поэтому в каждый момент времени оттенок суммарного излучения будет иным (табл. 1) и это может приносить человеку дискомфорт и, в худшем случае, негативно влиять на здоровье глаз.

Таблица 1. Зависимость суммарного излучения от последовательности бит в каждый момент времени

Последовательность бит (RGB)	0 0 0	0 0 1	0 1 0	0 1 1	1 0 0	1 0 1	1 1 0	1 1 1
Результирующее излучение								

Для того чтобы определиться, будет ли человеческий глаз замечать изменение оттенка освещения или нет, в программе MathCad была смоделирована

система передачи на трех длинах волн с двумя возможными состояниями для каждой. Для разных скоростей передачи были сняты показания с частотой инерционности глаза, которая достигает 80 Гц [1].

Согласно результатам моделирования, с увеличением частоты мерцания усреднение результирующего излучения становится все точнее и, начиная с 50 кГц, является практически константой (табл. 2).

Таблица 2. Восприятие изменения цветопередачи при различной частоте пульсаций

Частота пульсаций	Моменты времени, фиксируемые глазом								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
100 Гц									
500 Гц									
1 кГц									
50 кГц									
1 МГц									

В связи с этим можно сказать, что человек благодаря инерционным свойствам глаза даже при относительно низких скоростях не будет замечать изменения цветопередачи.

Для организации восходящего потока оптимальным вариантом является использование радиочастот, так как передавать сигнал от абонента на иной длине волны видимого спектра затруднительно (необходима большая оптическая мощность, что сложно реализуемо и не практично), а использовать ИК-спектр – небезопасно. Поэтому PLC-адаптер можно дополнить приемником РЧ. И таким образом организовать гетерогенную сеть СПВС-РЧ.

Исходя из характеристик беспроводных сетей доступа Wi-Fi, представленных в табл. 3, можно поставить задачи перед исследуемой технологией СПВС. Имеет смысл разработка беспроводной системы передачи с параметрами, как минимум, не хуже существующих.

Следует сказать, что наиболее используемым на сегодняшний день является стандарт 802.11g со скоростью передачи 54 Мбит/с. Предельных скоростей достигает стандарт 802.11ac: 3,3 Гбит/с (с использованием технологии MIMO 4×4) или 6,7 Гбит/с (с использованием технологии MIMO 8×8). Однако необходимо учитывать, что пропускная способность ограничивается провайдером, предоставляющим доступ в интернет, поэтому такие высокие скорости имеют место, по большей части, в корпоративных, но не в домашних сетях.

Таким образом, на данный момент максимально возможная скорость в беспроводных сетях доступа Wi-Fi в одном канале достигает 866 Мбит/с. Поэтому можно сформировать условие, что исследуемая система передачи на базе светодиодов видимого излучения должна обеспечивать скорости передачи не менее 1 Гбит/с.

Таблица 3. Технические данные стандартов беспроводных сетей доступа Wi-Fi

Стандарт	802.11a	802.11b	802.11g	802.11n	802.11ac
Полоса частот, МГц	20			20/40	20/40/80/160
Модуляционные схемы	BPSK, DQPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM+OFDM, CDMA/CA			BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM+OFDM, CDMA/CA	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM
Пиковая скорость, Мбит/с	54	11	54	150 (до 4 каналов)	866 (до 8 каналов)
Несущие частоты, ГГц	3,7/5,0	2,4	2,4	2,4–2,5/5,0	5,0
Режим Передачи данных	полудуплекс (временное разделение восходящего и нисходящего потоков)				
Радиус действия, м	< 100				

В общем виде СПВС можно представить следующим образом (рис. 1).

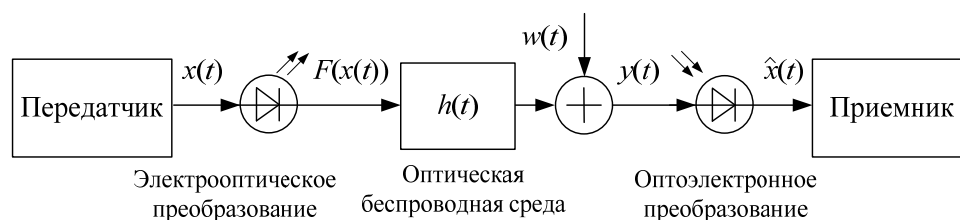


Рисунок 1. Обобщенная модель системы передачи данных с помощью видимого света

Представленная система передачи состоит из: передатчика, который формирует электрический сигнал; электрооптического преобразователя, в роли которого выступает светодиод; оптической беспроводной среды; оптоэлектронного преобразователя, функцию которого выполняет фотодиод; приемника, который принимает и производит цифровую обработку электрического сигнала с выхода фотодиода.

Оптический сигнал на входе оптоэлектронного преобразователя, $y(t)$, определяется формулой [2]:

$$y(t) = h(t) * F(x(t)) + w(t),$$

где $*$ – оператор линейной свертки; $x(t)$ – передаваемый электрический сигнал; $F(x(t))$ – функция нелинейного преобразования входного электрического сигнала; $h(t)$ – импульсная характеристика оптической беспроводной среды; $w(t)$ – оптические шумы, вызванные посторонним излучением; $y(t)$ – оценка переданного оптического сигнала; $\hat{x}(t)$ – оценка переданного электрического сигнала.

Для определения потенциальной пропускной способности СПВС необходимо воспользоваться теоремой Шеннона-Хартли, согласно которой:

$$C = B_k \cdot \log_2(1 + \text{ОСШ}), \quad (1)$$

где C – допустимая пропускная способность канала, бит/с; B_k – полоса пропускания канала, Гц; ОСШ – отношение мощности сигнала к мощности шума.

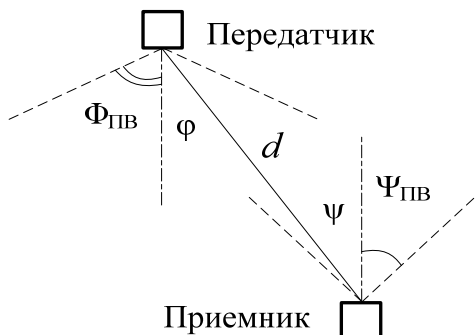


Рисунок 2. Геометрия сценария СПВС прямой видимости

На рисунке 2 изображено геометрическое представление передачи оптического сигнала. Мощность сигнала, попадающего на фотоприемное устройство, складывается из двух составляющих: прямого светового потока и отраженных.

В данной статье рассматривается только передача сигнала в зоне прямой видимости. В этом случае принимаемая мощность будет определяться следующей формулой [2]:

$$P_{\text{пр}} = H_0 \cdot P_{\text{пер}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{пер}}$ – мощность передатчика, Вт, а H_0 – величина, характеризующая нормированное количество светового потока, приходящегося на приемник, которая выражается формулой [3]:

$$H_0 = \frac{(m + 1) \cdot \cos^m(\varphi) \cdot A}{2 \cdot \pi \cdot d^2} \cdot \cos\psi \cdot \text{rect}\psi,$$

где A – площадь фоточувствительной зоны, м^2 ; d – расстояние между передатчиком и приемником, м; φ – угол между нормалью передатчика и лучом, попадающим на приемник, рад; ψ – угол между нормалью приемника и световым потоком, попадающим на приемник, рад; $\Phi_{\text{ПВ}}$ – поле видимости передатчика, рад; $\Psi_{\text{ПВ}}$ – поле видимости приемника, рад; $\text{rect}\psi = 1$, если $\Psi \leq \Psi_{\text{ПВ}}$, $\text{rect}\psi = 0$, если $\Psi > \Psi_{\text{ПВ}}$; m – коэффициент концентрации плотности световой энергии, который определяется следующим образом [2]:

$$m = \frac{\lg(\cos(60^\circ))}{\lg(\cos(\Phi_{\text{ПВ}}))}.$$

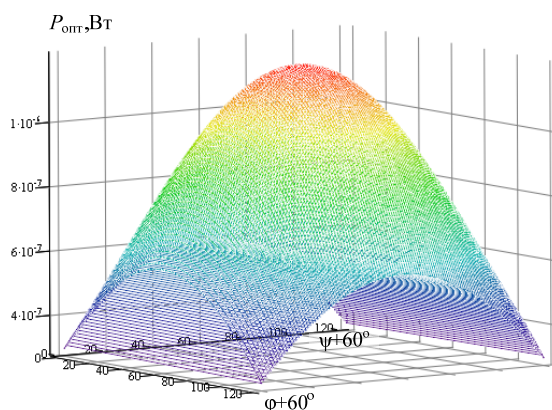


Рисунок 3. Зависимость принимаемой мощности от углов излучения и приема

Зависимость мощности принимаемого сигнала от местоположения передатчика и приемника согласно (2) представлена на рис. 3 ($P_{\text{пер}} = 3$ Вт, $A = 1 \text{ мм}^2$, $\Phi_{\text{ПВ}} = 45^\circ$, $\Psi_{\text{ПВ}} = 45^\circ$, $m = 2$, $d = 2,1$ м). Из графика становится видно, что в случае, когда нормали СИД и фотоприемного устройства совпадают, принимаемая мощность является максимальной. Однако при отклонении

нормалей уже на несколько градусов снижение мощности является весьма значительным.

Другое графическое представление формулы (2) – тепловая диаграмма (рис. 4) – наглядно демонстрирует, что принимаемая мощность менее чувствительна к флуктуациям угла приема, нежели угла излучения.

Для организации оптических точек доступа большое значение имеет концентрация светового потока на малой площади, так как чем меньше будет угол распространения оптического излучения, тем большая мощность будет приходить на приемное устройство и тем меньше искажений, вызванных распространением по беспроводной среде и переотражениями, будет в сигнале.

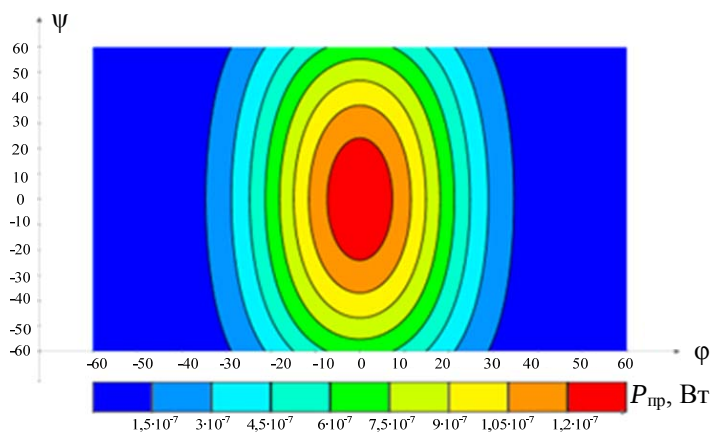


Рисунок 4. Тепловая диаграмма распределения интенсивности принимаемого излучения

К тому же, как уже было сказано, существенной проблемой является наложение световых потоков, так как при неправильном расположении источников излучения может привести к большим задержкам и, как следствие, к межсимвольной интерференции. Для того чтобы этого избежать, необходимо использовать как можно более узконаправленные источники излучения. Однако при использовании источников со слишком маленьким углом излучения может появиться ощущение «пятнистого» освещения. Поэтому выбор поля видимости передатчика является компромиссом между минимизацией задержек и организацией равномерного освещения.

На рис. 5 представлена зависимость принимаемой мощности от поля видимости светодиода (2). Однако необходимо отметить, что чем уже будет направленность оптического излучения, тем чувствительнее будет система передачи к различным изменениям относительного положения приемника.

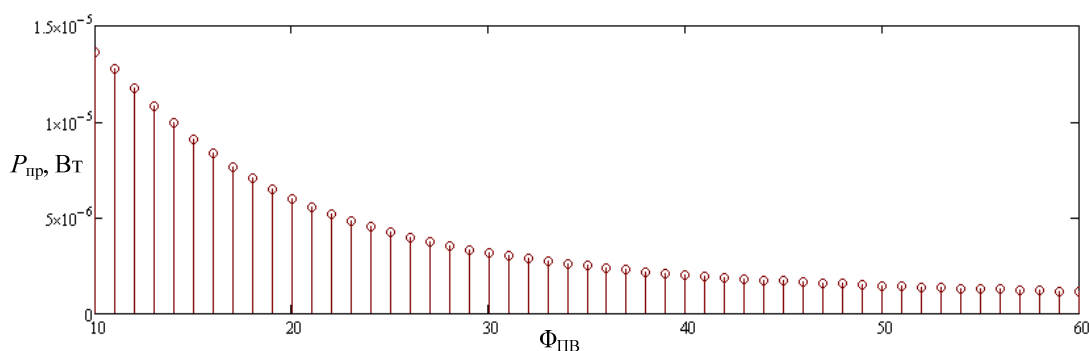


Рисунок 5. График зависимости принимаемой мощности от поля видимости светодиода, при $P_{\text{пер}} = 3 \text{ Вт}$, $A = 1 \text{ мм}^2$, $\Phi_{\text{ПВ}} = 10^\circ - 60^\circ$, $\Psi_{\text{ПВ}} = 45^\circ$, $d = 1 \text{ м}$, $\varphi = \psi = 10^\circ$

RGB-светодиоды обладают большим потенциалом в качестве передатчиков, потому что позволяют передавать информацию сразу на трех несущих и увеличивает полосу пропускания канала в три раза. Полоса пропускания одного канала (несущей) составляет около $B_k = B_r = B_g = B_b \approx 43$ МГц.

В рассматриваемой технологии ОСШ определяется следующей формулой [3, 4]:

$$\text{ОСШ} = \frac{(S \cdot P_{\text{пр}} \cdot M_{\text{и}})^2}{i_{\text{т}}^2 + 2 \cdot q \cdot S \cdot (P_{\text{пр}} + P_{\text{ви}}) \cdot B_{\text{к}}}, \quad (3)$$

где S – чувствительность приемника; А/Вт, $M_{\text{и}}$ – индекс модуляции (который принят равным 0,2); $i_{\text{т}}$ – темновой ток приемника; А, $B_{\text{к}}$ – полоса частот сигнала; $q = 1,6 \times 10^{-19}$ Кл – элементарный электрический заряд. Параметр $P_{\text{ви}}$ – мощность второстепенного излучения.

Если принять, что поле видимости светодиода $\Phi_{\text{пв}} = 45^\circ$, расстояние между источником и приемником $d = 2$ м, площадь фоточувствительной зоны приемника $A = 1$ мм², темновой ток фотодиода $i_{\text{т}} = 40$ пА (что соответствует стандартным значениям), чувствительность фотоприемника $S = 0,8$ А/Вт, мощность передатчика $P_{\text{пер}} = 15$ Вт, полоса частот одного канала $B_{\text{к}} = 40$ МГц, мощность второстепенного излучения, попадающего на приемник, $P_{\text{ви}} = 10 \cdot P_{\text{пр}}$, а приемник расположен строго под передатчиком, т. е. $\varphi = 0$, то при подстановке в формулу (1) формулы (3) пропускная способность одного оптического беспроводного канала, C , составит порядка 350 Мбит/с, а при передаче на трех несущих – 1,05 Гбит/с.

Таким образом, есть все основания полагать, что технология передачи данных посредством видимого света способна внести существенный вклад в решение проблемы дефицита спектра радиочастот и может быть использована для организации защищенных локальных сетей в пределах одного помещения.

Список используемых источников

1. Луизов А.В. Инерция зрения. М.: ОБОРОНГИЗ, 1961. С. 170–171.
2. Dmitrov S., Haas H. Principles of LED Light Communications: Towards Networked Li-Fi. United Kingdom, Cambridge: Cambridge University Press. 2015.
3. Arnon S. Visible Light Communication. Israel, Negev: Cambridge University Press, 2015.
4. Hranilovic S. Wireless Optical Communication Sustems. Canada, Hamilton: Springer Science + Business Media. 2005.