

DOI 10.53364/24138614_2022_27_4_63
УДК: 519.6

¹Адиқанова С*, ²Маратбекова Ш.

¹Восточно-Казахстанский университет им.С.Аманжолова

²Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан.

*E-mail: madina_vkgtu@mail.ru

ОДНОФОТОННЫЙ ЛАВИННЫЙ ДИОД (SPAD) VLC СИСТЕМА И ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ВНУТРИСКВАЖИННОГО МОНИТОРИНГА

БІР ФОТОНДЫ КӨШКІН ДИОДЫ (SPAD) VLC МОНИТОРИНГ ЖҮЙЕСІ ЖӘНЕ ОНЫҢ ҚОСЫМШАСЫ

SINGLE-PHOTON AVALANCHE DIODE (SPAD) VLC SYSTEM AND APP FOR DOWNHOLE MONITORING

Аннотация. В данной работе впервые показано, что проблема непрерывного внутрискважинного мониторинга в нефтегазовой отрасли эффективно решается за счет использования связи в видимом свете (VLC). Будучи надежным, гибким и недорогим методом, VLC может удовлетворить критическую потребность операторов в поддержании эффективности добычи и оптимизации работы газовых скважин. Предлагаемая система VLC использует передатчик на светоизлучающих диодах (LED) и высокочувствительный приемник с обнаружением одиночных фотонов, называемый однофотонным лавинным диодом (SPAD). Последнее играет важную роль в обеспечении связи на большие расстояния, и используется тот факт, что в газовой трубе нет окружающего света.

В частности, отсутствие окружающего света обеспечивает высокое отношение сигнал/шум (SNR) в приемнике, который работает в режиме счета фотонов. В этом исследовании производительность системы по коэффициенту битовых ошибок (BER) моделируется для металлической трубы длиной 4 км. Показано, что предлагаемая система имеет более высокую энергоэффективность по сравнению с традиционными методами, что важно, поскольку предполагается, что передатчик работает от батареи. Кроме того, рассчитывается теоретическая производительность BER и сравнивается с результатами моделирования.

Ключевые слова: беспроводная оптическая связь (OWC), связь в видимом свете (VLC), приемник с подсчетом фотонов, лавинный диод с одним фотоном (SPAD).

Андатпа. Бұл жұмыста мұнай-газ саласындағы ұңғымаішілік үздіксіз мониторинг мәселесі көрінетін жарықта (VLC) байланысты пайдалану есебінен тиімді шешілетіні алғаш рет көрсетілген. Сенімді, икемді және арзан әдіс бола отырып, VLC операторлардың өндіріс тиімділігін сақтау және газ ұңғымаларының жұмысын оңтайландыру қажеттілігін қанағаттандыра алады. Ұсынылған VLC жүйесі жарық шығаратын диодты (LED) таратқышты және бір фотонды қар көшкіні диоды (SPAD) деп аталатын жоғары сезімтал жалғыз фотонды анықтайтын қабылдағышты пайдаланады. Соңғысы алыс қашықтықтағы байланысты қамтамасыз етуде маңызды рөл атқарады және газ құбырында қоршаған жарық жоқ екендігі қолданылады.

Атап айтқанда, қоршаған жарықтың болмауы фотонды санау режимінде жұмыс істейтін қабылдағышта жоғары сигнал/шу қатынасын (SNR) қамтамасыз етеді. Бұл зерттеуде жүйенің

биттік қателік коэффициенті (BER) өнімділігі ұзындығы 4 км металл құбыр үшін модельденді. ұсынылған жүйенің дәстүрлі әдістермен салыстырғанда энергия тиімділігі жоғары екендігі көрсетілген, бұл маңызды, өйткені таратқыш батареямен жұмыс істейді деп болжанады. Сонымен қатар, бер теориялық өнімділігі есептеледі және модельдеу нәтижелерімен салыстырылады.

Түйін сөздер: сымсыз оптикалық байланыс (OWC), көрінетін жарық байланысы (VLC), фотонды қабылдағыш, бір фотонды көшкін диоды (SPAD).

Abstract. This paper shows for the first time that the problem of continuous downhole monitoring in the oil and gas industry is effectively solved through the use of visible light communication (VLC). As a reliable, flexible and low-cost method, VLC can meet the critical need of operators to maintain production efficiency and optimize gas well performance. The proposed VLC system uses a Light Emitting Diode (LED) transmitter and a highly sensitive single photon detection receiver called a Single Photon Avalanche Diode (SPAD). The latter plays an important role in enabling communication over long distances, and the fact that there is no ambient light in the gas pipe is exploited.

In particular, the absence of ambient light provides a high signal to noise ratio (SNR) in a receiver that operates in photon counting mode. In this study, the bit error rate (BER) performance of the system is simulated for a 4 km long metal pipe. The proposed system is shown to be more energy efficient than traditional methods, which is important because the transmitter is assumed to be battery powered. In addition, the theoretical BER performance is calculated and compared with simulation results.

Keywords: wireless optical communication (OWC), visible light communication (VLC), photon receiver, single-photon avalanche diode (SPAD).

Введение. При быстром росте количества беспроводных услуг и приложений ограниченного спектра радиочастот (РЧ) может оказаться недостаточно для удовлетворения будущих потребностей в скорости передачи данных. В качестве жизнеспособного дополнительного подхода оптическая беспроводная связь (OWC) привлекла значительное внимание отчасти благодаря недавним технологическим достижениям в технологии твердотельного освещения. Преимущество OWC заключается в том, что он предлагает почти бесконечную полосу пропускания в диапазоне от инфракрасного (ИК) до ультрафиолетового (УФ), включая спектр видимого света в диапазоне 400-790 терагерц (ТГц). К другим важным преимуществам OWC относятся: безлицензионная работа, высокая безопасность связи, недорогие внешние интерфейсы и отсутствие помех для радиочастотных систем. Последнее преимущество означает, что системы OWC и RF могут использоваться одновременно.

В современных системах связи с видимым светом (VLC) в качестве передатчиков в основном используются светоизлучающие диоды (LED). В приемнике установлены высокочувствительные фотодиоды (PD), такие как положительно-внутренне-отрицательные (PIN) диоды, лавинные фотодиоды (APD) и однофотонные лавинные диоды (SPAD). используются. На сегодняшний день самая быстрая беспроводная система VLC с использованием одного светодиода может достигать скоростей, превышающих 3 Гбит/с. Однако некогерентный световой поток светодиода означает, что информация может быть закодирована только на уровне интенсивности. Как следствие, для модуляции данных могут использоваться только действительные и положительные сигналы. Это резко контрастирует с радиочастотными системами, в которых используются комплексные и биполярные сигналы. Таким образом, системы VLC обычно рассматриваются как модулируемые как системы модуляции интенсивности (IM) и прямого детектирования (DD). On-off keying (OOK), импульсно-позиционная модуляция (PPM) и амплитудно-импульсная модуляция (PAM) являются одними из популярных схем модуляции, используемых в сочетании с системами

IM/DD. Для высокоскоростной передачи данных применяется оптическое мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (O-OFDM), чтобы приблизиться к пропускной способности канала за счет использования адаптивной нагрузки по битам и мощности. Различные схемы модуляции O-OFDM были реализованы и использованы в VLC, такие как оптический OFDM со смещением по постоянному току (DCO-OFDM), оптический OFDM с асимметричным ограничением (ACO-OFDM), однополярный OFDM (U-OFDM) и OFDM без смещения по постоянному току. (NDC-OFDM).

В предыдущих исследованиях VLC рассматривался для таких приложений, как беспроводная связь внутри помещений, беспроводная связь в опасных средах и подводная связь. Основное внимание в данном исследовании уделяется применению VLC в газодобывающей промышленности и, в частности, в системах связи внутрискважинного мониторинга. В газовой промышленности использование тросов и бронированных кабелей является обычной практикой для связи между скважиной и поверхностью, но эти установки вызывают проблемы с обслуживанием и надежностью. Кроме того, проводные решения имеют высокие затраты на установку, а их эксплуатация требует остановки производства, что приводит к дополнительным затратам для оператора из-за простоя. Беспроводные решения также рассматривались для использования в скважинном мониторинге, таком как гидроимпульсная телеметрия, низкочастотные электромагнитные волны и акустические волны, но для связи на большие расстояния их характеристики неудовлетворительны. Низкая скорость передачи данных, возникновение необнаруживаемых ситуаций и воздействие на окружающую среду являются основными факторами, ограничивающими развитие систем беспроводной связи в этом контексте.

В этой статье предлагается беспроводное решение с использованием VLC.

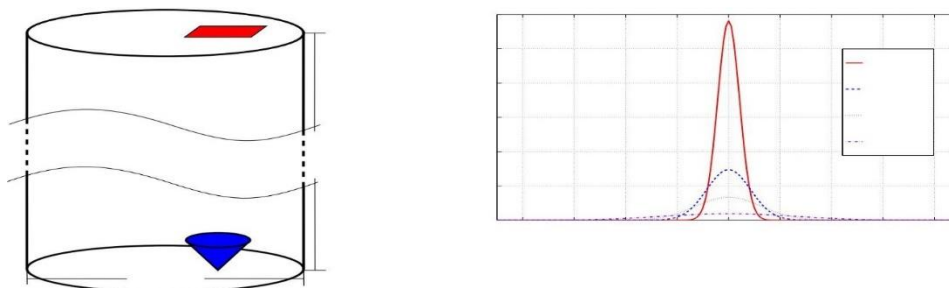


Рисунок 1. Модель стальной трубы.

Решение предназначено для обеспечения низкого энергопотребления при высокой скорости и надежности связи. В отличие от системы радиомониторинга, вместо антенн используется светодиодный передатчик. Таким образом, предлагаемая система считается более безопасным решением.

Модель системы. В этом разделе представлена практическая модель предлагаемой системы. Основанная на общих системах VLC, система связи состоит из светодиода с синим светом и массива SPAD. Длинная стальная труба определяет канал передачи.

А. Параметры трубы..

В. Как показано на рис. 1, предполагается, что система связи реализована в длинной стальной цилиндрической трубе длиной 4000 м и диаметром 1,5 м. Размеры взяты из реального развертывания такой трубы. Отражательная способность стали составляет 58,5 %.

В данном исследовании отражение несущего информацию света рассматривается как зеркальное отражение на внутренней поверхности трубы. В системе внутрискважинного мониторинга нет рассеянного света. Следовательно, фотоны, достигающие верха трубы, исходят либо от прямого пути, либо от отражений внутри трубы. Эта труба представляет собой

канал распространения, и метод трассировки лучей используется для создания модели канала. На практике по этой трубе транспортируется газ. Поскольку скорость световых волн уменьшается в газовой среде в соответствии с показателем преломления, эффект будут усилены межсимвольные помехи (ISI), что повысит вероятность ошибок обнаружения. В этом исследовании предполагается, что труба находится в вакууме, чтобы установить базовые характеристики и понять общую осуществимость.

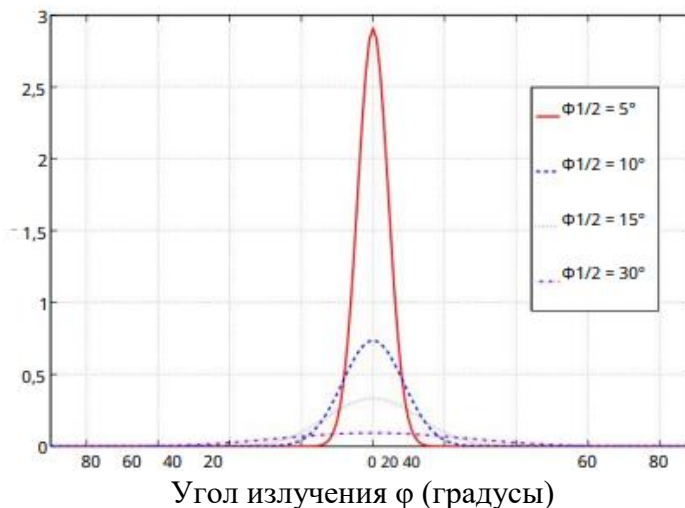


Рисунок 2. Интенсивность ламбертовского излучения при $\Phi_{1/2} = 5, 7,5, 10$ и $P_t = 0,1$ Вт.

С. Светодиодный передатчик С. Приемник SPAD и подсчет фотонов. Как показано на рис. 1, в качестве передатчика используется светодиод на дне трубы. Светодиод излучает синий свет с длиной волны 450 нм. Световое излучение светодиодного передатчика можно смоделировать, используя обобщенную ламбертовскую картину интенсивности излучения [11]:

$$R_0(\varphi) = 2\pi (\beta + 1) \cos\beta (\varphi) P_t, \quad (1)$$

где $\beta = \ln 2 / \ln(\cos(\Phi_{1/2}))$, а $\Phi_{1/2}$ — полуугол передатчика, представляющий угол половинной мощности. Переменная φ обозначает угол излучения, а P_t — среднюю мощность светодиода. В рассматриваемой системе связи с длинными трубами цель проектирования состоит в том, чтобы обеспечить попадание достаточного количества фотонов в приемник SPAD при испускании света. Важным параметром является полуугол передатчика. На рис. 2 показано распределение интенсивности ламбертовского излучения при полууглах Вт. излучателя. Как показано, 5 15 большая и 30 при мощности мощности может светодиода быть 0,1 сосредоточена в диапазоне более низких углов излучения (-5°) для более низких полууглов передатчика. Это уменьшит световых количество лучей, попадающих на стенку трубы, и, таким образом, уменьшит потери, вызванные отражения.

Чтобы повысить вероятность попадания фотонов в SPAD на линии прямой видимости (LOS), светодиод и устройство SPAD на поверхности выровнены по вертикали. В данном исследовании рассматриваются значения полуугла от 5 до 1.

Д. Приемник SPAD и подсчет фотонов.

Из-за передачи на большое расстояние (4000 метров) излучение на верхней поверхности ниже, чем в стандартных сценариях VLC для помещений, где максимальное расстояние составляет несколько метров. Фактически количество фотонов на приемнике в заданном сценарий может быть только в районе десятков фотонов. Типичное усиление ЛФД недостаточно для получения достаточной мощности сигнала для дальнейшей обработки сигнала. Поэтому для использования в системе скважинного мониторинга предлагается высокочувствительное приемное устройство SPAD. Этот диод представляет собой ЛФД,

смещенный за пределы обратного пробоя в так называемой области Гейгера. В этом режиме работы SPAD запускает генерацию миллиардов электроннодырочных пар для каждого обнаруженного фотона. Как следствие, устройство чрезвычайно чувствительно и способно точно обнаруживать одиночный фотон. Кроме того, SPAD рассматриваются для использования в системе скважинного мониторинга для следующих целей:

В скважине создается среда, свободная от окружающего света. Следовательно, высокая чувствительность приемника SPAD не снижается из-за окружающего шума. ii Из-за высокой чувствительности SPAD дальность передачи и оптическая мощность могут быть выгодно снижены в пользу срока службы батареи. iii Требуемая скорость передачи данных, которая находится в пределах от килобит до нескольких мегабит в секунду, достаточно низка для использования двухпозиционной манипуляции (ООК). ООК позволяет использовать простые методы обнаружения на основе порога в сочетании с принципом подсчета Гейгера. iv. Для детектора SPAD не требуется трансимпедансный усилитель (TIA), а выходной сигнал представляет собой последовательность импульсов (как показано на рис. 3(b)), что значительно снижает шум в приемнике.

Выражение $\varphi(nR)$ представляет собой угол излучения как функцию отражений; nR — количество отражений, необходимое для достижения вершины. Количество отражений, необходимых для достижения SPAD, определяет угол излучения, под которым световой луч выходит из светодиода, поэтому мы решили представить φ как функцию nR . Отражательная способность стали выражается CR.

В эксперименте окружающий свет, коэффициент темнового счета (DCR), коэффициент экстинкции, шум относительной интенсивности и дрожание часов будут добавляться к количеству подсчитанных фотонов за один временной интервал [3]. Поскольку влияние коэффициента экстинкции, шума относительной интенсивности и джиттера часов намного меньше, чем окружающего освещения и DCR, они не учитываются при моделировании [3]. Так как система реализована в длинной стальной трубе, где нет окружающего света, DCR считается доминирующим источником шума. SPAD демонстрирует DCR, подобный темновому току PD, который генерируется тепловыми носителями. Это означает, что DCR существует даже тогда, когда фотоны не достигают SPAD. На практике DCR будет увеличивать количество подсчитанных фотонов в каждом временном интервале.

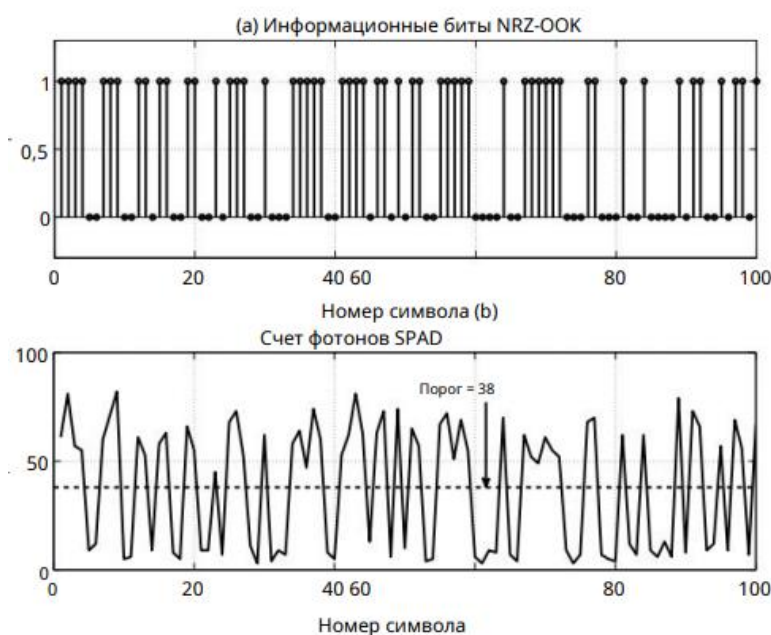


Рисунок 3. Пример: модуляция и демодуляция NRZ-ООК для СПАДов.

Е. Схема модуляции

В этом исследовании используется ООК без возврата к нулю (NRZ-OOK).

В передатчике входной битовый поток напрямую преобразуется в аналоговый сигнал цифро-аналоговым преобразователем (D/A).

Двоичная «1» представлена положительным напряжением, которое намного выше, чем напряжение, которое представляет двоичный «0». $NP(NR) = CPDE$ В передатчике входной битовый поток напрямую преобразуется в аналоговый сигнал цифро-аналоговым преобразователем (D/A). Уровни напряжения, назначенные битам, зависят от ограничений мощности системы. В этом исследовании P_1 представляет мощность, присвоенную «1», а P_0 обозначает мощность, присвоенную «0». (2) $P_T = 2$ (3) Поскольку случайно сгенерированные нули и единицы следуют равномерному распределению, P_T , P_1 и P_0 имеют следующие отношения:

$$P_T = 2P_1 + P_0 \quad (2)$$

Когда сигнал передается светодиодом, напряжения преобразуются в соответствующую интенсивность света. Как следствие, «1» в конечном итоге представлены более высокой интенсивностью света, а «0» представлены более низкой интенсивностью, которая ближе к нулю. Как показано на рис. 3(b), несущий информацию свет принимается SPAD и представлен числом фотонов. По сравнению с исходными цифровыми битами (рис. 3(a)) видно, что при передаче «1» подсчитывается больше фотонов, а «0» представлены гораздо меньшим количеством фотонов на приемнике. Поскольку принимаемые фотоны и шум DCR следуют распределению Пуассона, которое генерирует случайные положительные целые числа [12], оба увеличивают количество подсчитанных фотонов. Как следствие, на рис. 3(b) наблюдаются нерегулярные флуктуации, которые могут вызывать ошибки при демодуляции. В этом исследовании предполагается, что скорость передачи низкая (1 кбит/с), а интервал времени между прямым и отраженным светом, достигающим приемника, мал. Следовательно, длительность символа) намного выше, чем разброс задержек. Таким образом, ISI можно игнорировать.

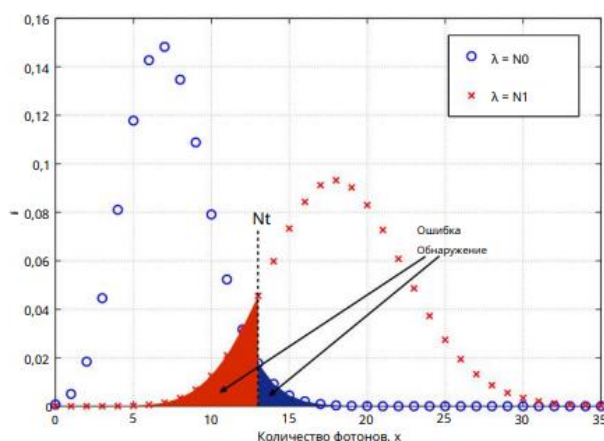


Рисунок 4. Вероятностный анализ обнаружения ошибок.

В данном исследовании для целей демодуляции NRZ-OOK выбран порог, равный среднему числу подсчитанных фотонов. Порог не оптимальный.

Определение оптимального порога выходит за рамки данной работы. Разумным приближением представляется среднее число фотонов при сделанных предположениях. Например, на рис. 3(b) порог установлен на 38. Это означает, что, когда количество фотонов превышает 38, сигнал демодулируется до «1». В противном случае получается «0».

Теоретический анализ BER. Распределение Пуассона используется для расчета теоретического значения шума. Функция плотности вероятности (PDF) распределения Пуассона:

$$Pr(x, \lambda) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^x}{x!}, \quad (3)$$

где λ — среднее значение распределения. Кумулятивная функция распределения (CDF) распределения Пуассона:

$$Pc(x, \lambda) = e^{-\lambda} \sum_{k=0}^x \frac{\lambda^k}{k!} \quad (4)$$

В стандартных системах VLC и RF аддитивный белый гауссовский шум (AWGN) обычно является наиболее заметным компонентом шума. Уравнения для расчета характеристик BER различных схем модуляции в канале AWGN представлены в [13]. Для шума Пуассона можно использовать аналогичный принцип. На рис. 4 показан анализ вероятности ошибки. Кривая с синими кружками представляет PDF подсчитанных фотонов, когда передается «0». Поскольку приемник считает фотоны от передатчика и шумовой процесс DCR, среднее значение этой PDF равно

$$N0 = Nr0 + Ne. \quad (5)$$

Кривая с красными символами «x» обозначает PDF подсчитанных фотонов, когда передается «1». Среднее значение PDF равно

$$N1 = Nr1 + Ne. \quad (6)$$

Результаты моделирования. При моделировании светодиодный излучатель располагается на расстоянии, равном половине радиуса, от центра нижней поверхности. Для синего света (450 нм) в вакууме энергия фотона (ЭФ) составляет $4,42 \times 10^{-19}$ Дж. Другие параметры светодиода, такие как полуугол светодиода ($\Phi/2$), мощность светодиода (P_t) и пропускная способность (футы) являются переменными в моделировании.

Для выбора подходящих значений моделируются различные значения этих переменных. Мощность светодиода протестирована от -10

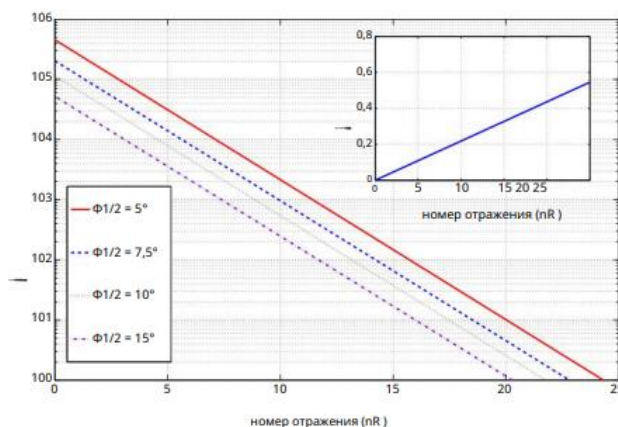


Рисунок 5. Количество фотонов.

Количество фотонов которые могут быть получены SPAD после числа отражений, для $P_t = 0,1$ Вт и $\Phi/2 = 5, 7,5, 10^\circ$ и 15° до 25 дБм, а рассматриваемые полосы пропускания составляют 1 кГц, 2 кГц и 5 кГц. В этой статье мощность, присвоенная «0», P_0 , предполагается

равной 0 Вт. Следовательно, из (3) степень, придаваемая '1', P1, равна 2Pt. При моделировании SPAD, представленный в [3], используется по двум причинам: а) это большая матрица (2,4 × 2,1 мм) с 1024 элементами SPAD, что повышает вероятность приема фотонов; и б) это устройство практически существует, что очень важно, поскольку цель состоит в том, чтобы построить демонстратор для проверки результатов моделирования в этом исследовании. Величина CPDE составляет 20 %, а NDCR равна R равна 7,27 кГц [3]. В таблице I перечислены все параметры, использованные при моделировании.

А. Количество принятых фотонов. На рис. 5 показано соотношение между углом излучения и отражениями, необходимыми для достижения приемника. Видно, что при числе отражений 25 угол равен всего 0,55, а косинус равен 0,9999. Это связано с тем, что система реализована в длинной трубе, а площадь верхней поверхности относительно мала. Следовательно, угол излучения $\varphi(nR)$ можно приблизить к 0, даже если имеется более 20 отражений. Таким образом, $\cos\beta$ ($\varphi(nR)$) если в (2) β велико, почти равен, чтобы 1, даже вычислить количество полученных фотонов в каждом луче отражения, (2) можно упростить как:

На рис. 5 с увеличением количества отражений, которые луч света должен пройти, чтобы достичь приемника, резко уменьшается количество принимаемых фотонов.

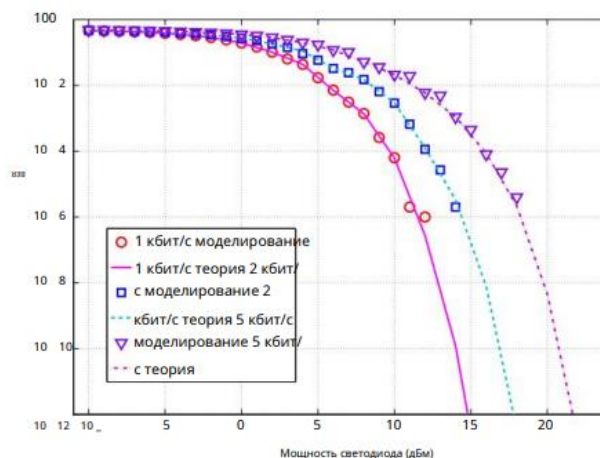


Рисунок 6. Показатели BER SPAD в трубе для скоростей передачи 1 кбит/с, 2 кбит/с и 5 кбит/с, когда $\Phi/2 = 10$.

В. Показатели BE

Используя указанные параметры, можно рассчитать значение полученных фотонов. Количество фотонов увеличивается со средней мощностью светодиода Pt. На рис. 6 показаны характеристики BER приемника SPAD с фиксированным полууглом светодиода ($\Phi/2 = 10$). Предполагается, что скорости передачи в этой ситуации составляют 1 кбит/с, 2 кбит/с и 5 кбит/с. На рис. 6 показано хорошее соответствие результатов моделирования и теории. Как показано, потребляемая мощность светодиода составляет около 13,5 дБм для BER 10⁻⁹ при скорости 1 кбит/с. Для более высоких скоростей передачи, таких как 2 кбит/с и 5 кбит/с, требования к мощности составляют 16 дБм и 20,5 дБм соответственно. (11) На рис. 7 показаны характеристики BER для SPAD при скорости передачи данных 1 кГц. В отличие от рис. 6, рис. 7 демонстрирует характеристики BER при изменении полуугла, $\Phi/2 = 5$ 10 и 15. Когда $\Phi/2 = 5$, светодиоду требуется 109. всего. При 7,5 дБм, $\Phi/2$ чтобы = 15 достичь и BER = BER 10⁻⁹ потребляемая мощность светодиода составляет 17,5 дБм. С увеличением полуугла возрастает потребляемая мощность светодиодного передатчика. Как следствие, система достигает более высокой энергоэффективности при меньшем полуугле. На практике может использоваться более длинный или более короткий канал, и существует разница в требованиях к скорости передачи в разных сценариях. На рис. 8 показана мощность, необходимая передатчику, когда

полуугол ($\Phi/2 = 10$) является фиксированным, а BER считается равным 103. На рис. 8 принято, что длина трубы варьируется от 1000 до 1000 метров.

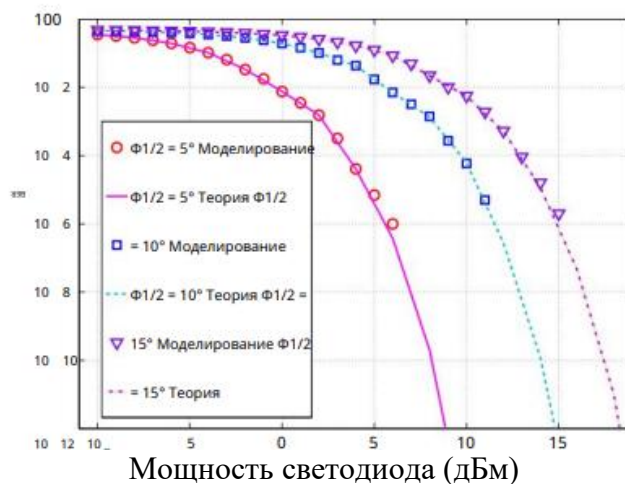


Рисунок 7. Показатели BER SPAD в трубе для $\Phi/2 = 5, 10$ и 15 при скорости передачи 1 кбит/с.

Заключение. В данной статье представлено энергосберегающее приложение VLC для системы внутрискважинного мониторинга газовой скважины в длинной трубе. В отличие от обычных систем VLC, в которых используются обычные PD, предлагаемая система основана на приемнике SPAD, который в состоянии посчитать количество фотонов. При использовании массива SPAD светодиодному передатчику требуется мощность всего 8 дБм для отправки контрольного сигнала в трубу газовой скважины длиной 4000 метров.

Поскольку светодиодный передатчик в скважине должен питаться от батареи, высокая энергоэффективность обеспечивает достаточно длительный срок службы системы.

Список литературы:

1. Х. Эльгала, Р. Меслех и Х. Хаас, «Внутренняя оптическая беспроводная связь: потенциал и современное состояние», IEEE Commun. Mag., вып. 49, нет. 9, стр. 56–62, 2011, ISSN: 0163-6804.
2. Р. Меслех, Р. Мехмуд, Х. Эльгала и Х. Хаас, «Оптическая беспроводная связь MIMO в помещении с использованием пространственной модуляции», Международная конференция IEEE по коммуникациям (ICC), Кейптаун, Южная Африка, 22 мая. 27 2010 г., стр. 1–5.
3. Э. Фишер, И. Андервуд и Р. Хендерсон, «Реконфигурируемый интегрирующий приемник с подсчетом одиночных фотонов для оптической связи», IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 48, № 7, стр. 1638–1650, июль 2013 г.
4. Д. Цонев, Х. Чун, С. Раджбхандари, Дж. МакКендри, С. Видев, Э. Гу, М. Хаджи, С. Уотсон, А. Келли, Г. Фолкнер, М. Доусон, Х. Хаас и Д. О'Брайен, «Беспроводная связь VLC на основе OFDM с одним светодиодом 3 Гбит / с с использованием нитрида галлия uLED», в IEEE Photonics Technology Letters, том 26, № 7, стр. 637-640, 1 апреля 2014 г.
5. Дж. М. Кан и Дж. Р. Барри, «Беспроводная инфракрасная связь», Труды IEEE, том. 85, нет. 2, стр. 265–298, 1997.
6. А. Махдираджи и Э. Захеда, «Сравнение выбранных схем цифровой модуляции (OOK, PPM и DPIM) для беспроводной оптической связи», в материалах 4-й студенческой конференции по исследованиям и разработкам (SCORED 06.), 27–28 июня 2006 г., стр. 5–10.
7. Д. Цонев, С. Синанович и Х. Хаас, «Новое униполярное мультиплексирование с ортогональным частотным разделением (U-OFDM) для оптической беспроводной связи», в Proc. конференции автомобильных технологий (VTC Spring), IEEE. Йокогама, Япония: IEEE,

6–9 мая 2012 г.

8. Ю. Ли, Д. Цонев и Х. Хаас, «OFDM без смещения постоянного тока с оптической пространственной модуляцией», на 24-м международном симпозиуме IEEE по персональной внутренней и мобильной радиосвязи (PIIMRC), 2013 г., стр. 486-490, 8–11 сентября 2013 г.

9. Дж. Дж. Джордж, М. Х. Мустафа, Н. М. Осман, Н. Х. Ахмед и Д. М. Хамед, «Обзор связи в видимом свете», Международный журнал инженерии и компьютерных наук, том. 3, стр. 3805–3808, февраль 2014 г.

10. GWC Kaye и TH Laby, Таблицы физических и химических констант. Лонгман, 1995.

11. Дж. Р. Барри, Беспроводная инфракрасная связь. Спрингер, 1994, вып. 280.

12. И. Алсолами, Д. Читнис, Д. О'Брайен и С. Коллинз, «Вещание по каналам подсчета фотонов с помощью PPM с несколькими разрешениями: реализация и экспериментальные результаты», в Communications Letters, IEEE, vol.16, no.12, стр. 2072-2074, декабрь 2012 г.

13. И. А. Гловер и П. М. Грант, Цифровые коммуникации. Прентис Холл, 1998.

References

1. H. Elgala, R. Mesleh и H. Haas, «Vnýtrenniaia opticheskaia besprovodnaia sviaz: potentsial i sovremennoe sostoianie», IEEE Commun. Mag., вып. 49, net. 9, str. 56–62, 2011, ISSN: 0163-6804.

2. R. Mesleh, R. Mehmýd, H. Elgala и H. Haas, «Opticheskaia besprovodnaia sviaz MIMO v pomeeni s ispolzovaniem prostranstvennoi modýlatsii», Mejdýnarodnaia konferentsiia IEEE po kommýnikatsiiam (ICC), Keiptáyn, Iýjnaia Afrika, 22 maia. 27 2010., str. 1–5.

3. E. Fisher, I. Andervýd и R. Henderson, «Rekonfigúrirýemyi integrirýúyi priemnik s podschetom odinochnyh fotonov dlia opticheskoi sviazi», IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 48, № 7, str. 1638–1650, iyúl 2013.

4. D. Tsonev, H. Chýn, S. Radjbhandari, Dj. MakKendri, S. Videv, E. Gý, M. Hadji, S. Ýotson, A. Kelli, G. Folkner, M. Doýson, H. Haas и D. O'Braien, «Besprovodnaia sviaz VLC na osnove OFDM s odnim svetodiodom 3 Gbit / s s ispolzovaniem nitrida gallia uLED», v IEEE Photonics Technology Letters, tom 26, № 7, str. 637-640, 1 aprelia 2014.

5. Dj. M. Kan и Dj. R. Barri, «Besprovodnaia infrakrasnaia sviaz», Trýdy IEEE, tom. 85, net. 2, str. 265–298, 1997.

6. A. Mahdiradji и E. Zahedi, «Sravnenie vybrannyh shem tsifrovoi modýlatsii (OOK, PPM и DPIM) dlia besprovodnoi opticheskoi sviazi», v materialah 4-i stýdencheskoi konferentsii po issledovaniyam i razrabotkam (SCORed 06.), 27–28 iyúnia 2006 g., str. 5–10.

7. D. Tsonev, S. Sinanovich и H. Haas, «Novoe ýnipoliarnoe mýltipleksirovanie s ortogonalnym chastotnym razdeleniem (U-OFDM) dlia opticheskoi besprovodnoi sviazi», v Proc. konferentsii avtomobilnyh tehnologii (VTC Spring), IEEE. Iokogama, Iaponiia: IEEE, 6–9 maia 2012.

8. Iý. Li, D. Tsonev и H. Haas, «OFDM bez smeenua postoiannogo toka s opticheskoi prostranstvennoi modýlatsiei», na 24-m mejdýnarodnom simpoziiýme IEEE po personalnoi vnýtrennei i mobilnoi radiosviasi (PIIMRC), 2013 g., str. 486-490, 8–11 sentiabria 2013.

9. Dj. Dj. Djordj, M. H. Mýstafa, N. M. Osman, N. H. Ahmed и D. M. Hamed, «Obzor sviazi v vidimom svete», Mejdýnarodnyi jýrnal injenerii i kompiýternyh naýk, tom. 3, str. 3805–3808, fevral 2014.

10. GWC Kaye и TH Laby, Tablitsy fizicheskikh i himicheskikh konstant. Longman, 1995.

11. Dj. R. Barri, Besprovodnaia infrakrasnaia sviaz. Springer, 1994, vyp. 280.

12. I. Alsolami, D. Chitnis, D. O'Braien и S. Kollinz, «Veanie po kanalám podscheta fotonov s pomoiý PPM s neskol'kimi razresheniami: realizatsiia i eksperimentalnye rezýltaty», v Communications Letters, IEEE, vol.16, no.12, str. 2072-2074, dekabr 2012.

13. I. A. Glover и P. M. Grant, Tsifrovye kommýnikatsii. Prentis Holl, 1998.

Материал поступил в редакцию 3.11.2022 г.