

=====

Ғылымның, білімнің және бизнестің интеграциясы
Интеграция науки, образования и бизнеса
Integration of science, education and business

=====

DOI 10.53364/24138614_2022_27_4_23

УДК 519.6

¹Баталова М.Е, ¹Баяндинова А.Р.

¹ Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан.

*E-mail: esimkhan_kizi.m@mail.ru

СВЯЗЬ В ВИДИМОМ СВЕТЕ IMAGING-MIMO
СИСТЕМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ μ LED И ВСТРОЕННОГО ПРИЕМНИКА

КӨРІНЕТІН ЖАРЫҚ БАЙЛАНЫСЫ IMAGING-MIMO
 μ LED ЖӘНЕ КІРІКТІРІЛГЕН ҚАБЫЛДАҒЫШТЫ ҚОЛДАНАТЫН ЖҮЙЕ

COMMUNICATION IN VISIBLE LIGHT IMAGING-MIMO
SYSTEM USING μ LED AND BUILT-IN RECEIVER

Аннотация. Передача с несколькими входами и несколькими выходами (MIMO) может использоваться для увеличения пропускной способности систем связи в видимом свете (VLC). Этот подход хорошо совместим с использованием массивов микросветоизлучающих диодов (μ LED).

В этой работе мы демонстрируем систему визуализации-MIMO VLC, использующую двумерный массив микросветодиодов с индивидуальной адресацией и интегрированный приемник на основе КМОП. Суммарная скорость передачи данных ~920 Мбит/с реализуется при использовании четырех параллельных каналов на расстоянии 1 м. Дальнейшее повышение скорости передачи данных возможно за счет оптимизации компонентов системы и условий работы.

Ключевые слова: связь в видимом свете, множественный вход и несколько выходов, оптическая беспроводная связь.

Аңдатпа. Көп кірісті көп шығыс (MIMO) берілісін көрінетін жарық байланысы (VLC) жүйелерінің сыйымдылығын арттыру үшін пайдалануға болады. Бұл тәсіл микрожарық шығаратын диод (μ LED) массивтерін пайдаланумен жақсы үйлеседі.

Бұл мақалада біз VLC-MIMO бейнелеу жүйесін жеке адрестелетін microLED дискілерінің 2D массивін және біріктірілген CMOS негізіндегі қабылдағышты қолданып көрсетеміз. ~920 Мбит/с жалпы деректерді беру жылдамдығы 1 м қашықтықтағы төрт параллельді арна арқылы жүзеге асырылады. Деректерді тасымалдау жылдамдығын одан әрі арттыру жүйе құрамдас бөліктері мен жұмыс жағдайларын оңтайландыру арқылы мүмкін болады.

Түйінді сөздер: көрінетін жарық байланысы, бірнеше кіріс және бірнеше шығыстар, оптикалық сымсыз байланыс.

Abstract. Multiple input multiple output (MIMO) transmission can be used to increase the capacity of visible light communication (VLC) systems. This approach is well compatible with the use of micro light emitting diode (μ LED) arrays.

In this paper, we demonstrate a VLC-MIMO imaging system using a 2D array of individually addressable microLEDs and an integrated CMOS-based receiver. The total data transfer rate of ~920 Mbps is realized using four parallel channels at a distance of 1 m. Further increase in data transfer rate is possible by optimizing the system components and operating conditions.

Keywords: visible light communication, multiple input and multiple outputs, optical wireless communication.

Введение. Системы связи в видимом свете (VLC), также известные как Li-Fi, могут сыграть важную роль в будущих беспроводных коммуникациях. Это важно, учитывая, что производительность радиочастотной (РЧ) системы становится ограниченной из-за нехватки доступного спектра на частотах, где внедрение системы является простым и покрытие хорошее.

VLC предлагает возможность доступа к сотням ТГц нелицензионного спектра с использованием недорогих компонентов. Кроме того, VLC сочетает эффективное освещение с коммуникациями, предлагая потенциал многоцелевой недорогой коммуникационной инфраструктуры.

Большинство коммерчески доступных осветительных светоизлучающих диодов (СИД) основаны на преобразовании цвета синего СИД с использованием желтого люминофора. Желтый люминофор поглощает часть синего света светодиода и повторно излучает широкий желтый спектр, который при смешивании в правильной пропорции с синяя длина волны дает белый цвет. Хотя эти устройства имеют низкую стоимость для массового производства, они имеют низкую полосу пропускания (несколько МГц) [1]. Недавно было показано, что синие и зеленые микросветодиоды (μ LED) на основе GaN могут обеспечивать полосу пропускания оптической модуляции, превышающую 400 МГц [2]. Безошибочная передача данных со скоростью до 3 Гбит/с с использованием одного синего μ LED была продемонстрирована с использованием мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM) на небольшом расстоянии [3].

Чтобы увеличить потенциальную скорость передачи данных VLC, были предложены и изучены системы с несколькими входами и несколькими выходами (MIMO) [4-7]. Сравнительные исследования различных схем MIMO которые показывают улучшение спектральной эффективности с использованием пространственного мультиплексирования (SMP). Четырехканальные системы MIMO с отображением и без отображения изображения были продемонстрированы в [4, 5] при длине канала 1 м.

Реализация систем MIMO VLC без обработки изображений с совокупной скоростью передачи данных 50 Мбит/с описана в [4]. Используя OFDM и визуализирующую оптику, система MIMO Gbps была продемонстрирована в [5]. В обеих вышеупомянутых системах использовались коммерческие белые светодиоды с большим расстоянием между излучателями (15 см и выше). Это ограничивает масштабируемость таких систем, особенно если требуются высокопараллельные соединения.

В этой работе мы демонстрируем MIMO-VLC с использованием синих μ LED и встроенного приемника на основе CMOS. Матрицы микросветодиодов и фотодетекторов имеют размер шага 1,5 мм и 0,25 мм соответственно. Используя специально разработанную оптику передатчика и оптику приемника изображений, мы показываем возможность использования четырехканальных систем MIMO. В настоящее время эта скорость ограничена производительностью компонентов, и усовершенствованные подсистемы должны обеспечивать гораздо более высокие скорости передачи данных.

В этой статье описывается практическая реализация и результаты, полученные на данный момент с использованием системы MIMO-VLC. Статья организована следующим образом: в разделе II дается обзор практической системы, а в разделе III подробно излагаются экспериментальные результаты. Выводы и будущая работа представлены в Разделе IV.

Описание системы. На рис. 1 показана блок-схема системы MIMO-VLC, исследуемой в данной статье. Передатчик состоит из массива 6x6 микросветодиодов, работающих на длине волны 450 нм, каждый со спектральной шириной 20 нм при полной ширине на половине максимума. Эти устройства изготовлены из коммерческих синих светодиодных пластин InGaN/GaN, выращенных на сапфире. Массив микросветодиодов организован таким образом, что элементы сгруппированы в кластеры 2x2 с шагом 69 мкм между двумя соседними элементами микросветодиодов. Сквозное расстояние между элементами составляет 1,5 мм (см. рис. 2(a)). Каждый μ LED имеет диаметр 39 мкм и оптимизируется на основе измеренной оптической мощности и ограничений полосы пропускания, накладываемых различными размерами μ LED [2]. Ожидаемая полоса пропускания для этих устройств составляет 125 МГц. Эта полоса пропускания достигается при токе смещения 100 мА. Более высокая пропускная способность может быть достигнута с использованием меньших устройств за счет снижения оптической мощности.

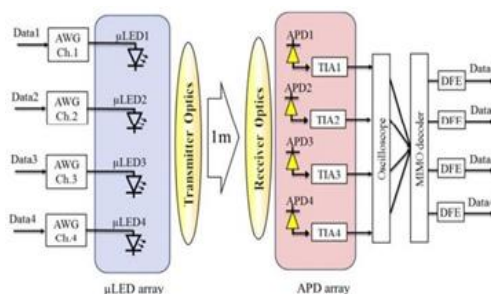


Рисунок 1. Блок-схема системы MIMO-VLC.

На рис. 2(b) показана схема оптики передатчика. Это собирает ламбертовские лучи от каждого из μ LED и контролирует их расходимость. Затем свет распространяется на оптическую систему приемника. Для успешного разделения каналов MIMO на приемнике Матрица канала должна быть заполнена квалифицировать.

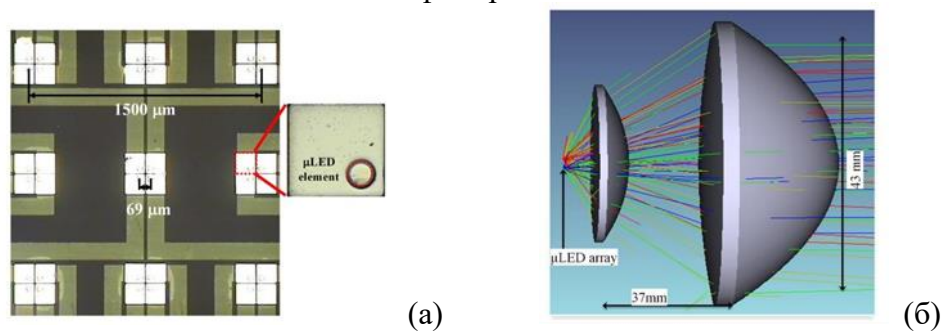


Рисунок 2. а) Изображения массива μ LED устройства MIMO. Вставлено изображение с большим увеличением для типичного элемента μ LED и б) схема оптической системы передатчика.

В этом случае оптика передатчика спроектирована так, чтобы обеспечить угол расхождения 7,5 градусов (полное), а оптика приемника (рис. 3(a)) обеспечивает FOV 3 градуса (полное). Подходящая система оптики передатчика и приемника была разработана с использованием коммерчески доступные линзы и оптимизированы с помощью программного обеспечения для трассировки лучей.

Поле зрения приемника ограничено количеством детекторов в массиве приемника, которые будут описаны в следующем разделе.

Приемник состоит из специально разработанной матрицы лавинных фотодиодов (APD)

на основе комплементарных металл-оксид-полупроводник (CMOS), изготовленной по технологии 0,18 мкм, с трансимпедансным усилителем (ТИА), встроенным в каждый детектор.

Массив 3×3 APD размером 200×200 мкм² каждый был реализован шаг 240 мкм (см) рис. 3(б).

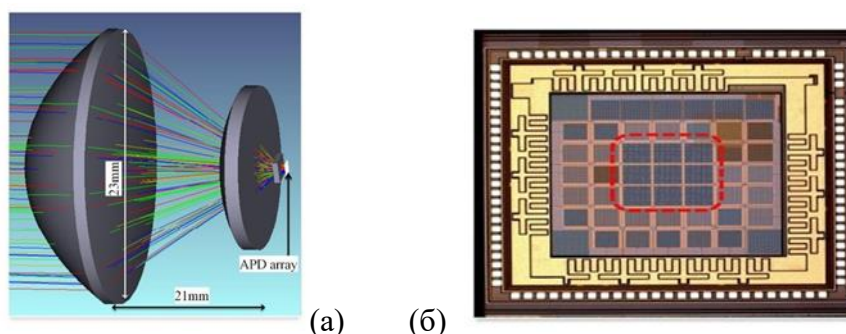


Рисунок 3. а) Схема оптической системы приемника и б) изображение массива ЛФД, 9 ЛФД выделены красным квадратом.

Эти устройства имеют чувствительность 2,61 А/Вт при напряжении обратного смещения 12,75 В при освещении на длине волны 450 нм. ЛФД были выбраны, поскольку они имеют более высокую чувствительность, чем ПИН-ФД. конструкции на основе [8].

Наконец, передаваемые сигналы оцениваются после применения алгоритма декодирования ММО и эквалайзера с обратной связью (DFE).

Результаты и обсуждение. Эксперименты проводились на расстоянии 1 м от передатчика и приемника, выровненных для получения максимального отношения сигнал-шум (SNR) в приемнике. Рассматриваются четыре параллельных канала ММО, поэтому используются четыре угловых μ LED массива. μ LED управлялись средним током 35 мА, чтобы гарантировать, что μ LED работает в линейном режиме отклика LIV. Измеренная средняя выходная оптическая мощность при этом токе смещения составляет 1,5 мВт, за исключением одного пикселя, который имеет среднюю оптическую мощность 0,5 мВт.

На рис. 4 показано изображение оптической освещенности на расстоянии 1 м при одновременном включении четырех μ LED, расположенных в крайних углах. Каждый кружок соответствует профилю оптической интенсивности μ LED. Этот профиль освещенности точно соответствует смоделированному профилю, полученному с помощью трассировки лучей.



Рисунок 4. Изображение оптической освещенности на расстоянии 1 м от передатчика.

Обратите внимание, что система ММО может работать только в центральной зоне, где все четыре канала ММО перекрываются. Во внешних регионах мощность сигнала всех

четырёх каналов недостаточно для успешного декодирования данных из четырёх каналов. Обратите внимание, что в отличие от обычной системы $N \times N$ MIMO, вызывающей серьезное снижение производительности при симметричном попадании света на фотодетекторы, представленная здесь конструкция практически лишена проблемы симметрии благодаря тщательно продуманным размерам и структуре MIMO 4×9 .

Измеренные частотные характеристики системы для четырёх каналов показаны на рис. 5. Полоса пропускания системы находится в диапазоне 18–22 МГц. Полоса пропускания ограничена в основном из-за неоптимизированного массива APD, полоса пропускания которого составляет менее 22 МГц. Чтобы полностью использовать доступную полосу пропускания передатчика, в настоящее время исследуется модифицированный ЛФД, который, как ожидается, будет соответствовать полосе пропускания передатчика.

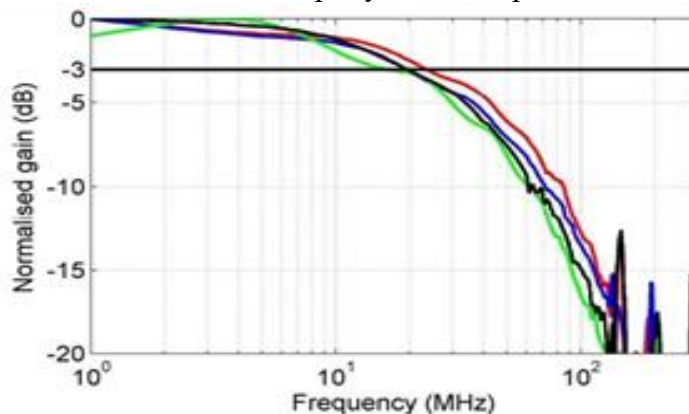


Рисунок 5. Измеренные электро-электрические частотные характеристики каналов MIMO.

Используя схему модуляции on-off keying (OOK), была оценена производительность системы MIMO. Четыре независимые псевдослучайные двоичные последовательности длиной 1013-1 были сгенерированы в Matlab® и загружены в два генератора сигналов (Agilent 81150A), которые управляют четырьмя каналами MIMO. Принятые сигналы от четырех ЛФД регистрировались с помощью осциллографа (MSO7104B), после чего дальнейшая обработка сигналов выполнялась в автономном режиме. Из-за ограниченной полосы пропускания системы в приемнике был принят эквалайзер с частично разнесенной решающей обратной связью (DFE) с 12 линиями задержки с прямой связью (TDL) и 2 TDL с обратной связью.

Полученные двоичные данные сравниваются с переданными данными для оценки частоты ошибок по битам (BER).

Измеренная H -матрица канала системы формирования изображения MIMO с идеальным выравниванием модулей передатчика и приемника представлена в таблице I, где TX_i и RX_j представляют элементы передатчика и приемника. Максимальное усиление канала нормализовано до 0 дБ.

Благодаря приемнику изображения видно, что оптические перекрестные помехи между каналами очень малы, ниже -14 дБ (т.е. электрические перекрестные помехи менее -28 дБ). Для декодирования каналов MIMO могут использоваться различные алгоритмы декодирования, включая оценку минимального средневладратичного значения (MMSE), форсирование нуля (ZF) и многослойное пространство-время Bell labs по вертикали (V-BLAST). Однако из-за низкого уровня перекрестных помех данные можно восстановить даже без использования этих алгоритмов.

Это наблюдение также подтверждается с помощью глазковых диаграмм, разные каналы на скорости 50 Мбит/с, как показано на рис. 6, где видимых перекрестных помех не наблюдается. Глазковые диаграммы для каждого канала были захвачены, в то время как

другие каналы были в работе.

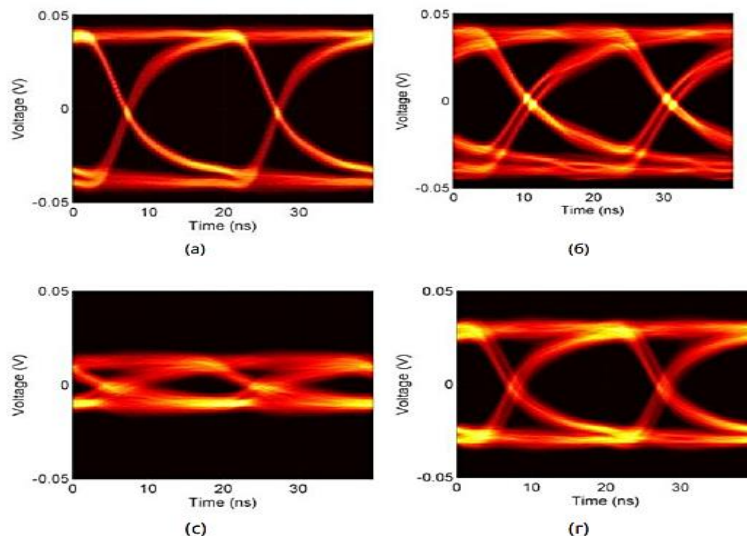


Рисунок 6. Глазковая диаграмма принимаемых сигналов ООК на скорости 50 Мбит/с (а) канал 1 (б) канал 2 (в) канал 3 и (г) канал 4.

Скорости передачи данных в зависимости от BER для четырех каналов системы формирования изображений ММО показаны на рис. 7. Обратите внимание, что принятый сигнал адаптивно выравнивается с использованием DFE. Первые 400 выборок, соответствующие 200 битам ООК, используются для обучения эквалайзера, а остальные данные используются для оценки BER. Достижимые скорости передачи данных выше порога прямого исправления ошибок (FEC), равного $1,2 \times 10^{-3}$, составляют 300, 285, 85 и 250 Мбит/с для каналов с 1 по 4 соответственно, при совокупной скорости передачи данных 920 Мбит/с. Более низкая скорость передачи данных канала 3 связана с более низкой передаваемой оптической мощностью. Передаваемая оптическая мощность канала 3 в $\sim 2,5$ раза меньше, чем у других каналов (что также отражено в H-матрице канала в таблице I). Это связано с проблемой в процессе производства устройств. В результате имел место значительный ток утечки на соседние μ LED, что приводило к низкой эффективности. Эта проблема решается, и ожидается, что новое поколение μ LED будет иметь более однородные характеристики с точки зрения полосы пропускания и оптической мощности. Тем не менее эта работа показывает, что система визуализации ММО возможна с использованием близко расположенных μ LED и интегрированных компонентов.

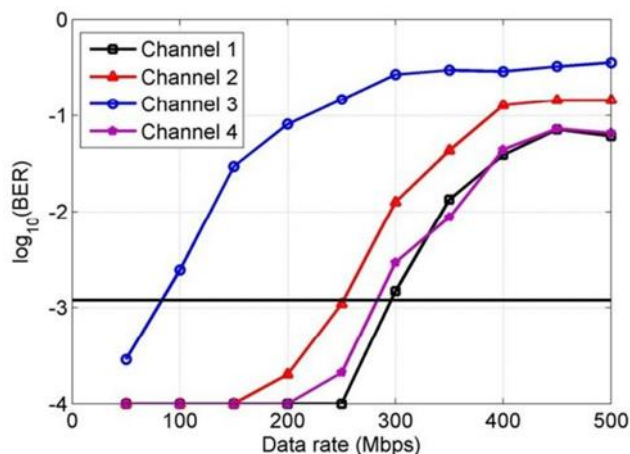


Рисунок 7. Скорость передачи данных в зависимости от BER для каналов ММО.

Заключение и дальнейшая работа. В этой работе сообщается об успешной

демонстрации интегрированной системы MIMO с использованием близко расположенных μ LED и интегрированного приемника на основе CMOS. Была продемонстрирована совокупная скорость передачи данных ~ 920 Мбит/с при использовании схемы модуляции ООК. Более высокие скорости, вероятно, используют более сложные схемы модуляции, а интегрированный подход позволит масштабировать системы, использующие гораздо больше параллельных каналов, с сопутствующим улучшением скорости передачи данных.

Будущая работа включает в себя решение проблемы утечки тока внутри μ LED, и она уже ведется. Также ожидается, что второе поколение массива APD будет иметь полосу пропускания в диапазоне сотен МГц. С APD с более высокой пропускной способностью и вторым поколением μ LED станут возможными гораздо более высокие скорости передачи данных.

Дальнейшие тесты также оценят покрытие и использование различных алгоритмов MIMO для оптимизации производительности.

Использованная литература

1. М. Хоа Ле, Д. О'Брайен, Г. Фолкнер, З. Любин, Л. Кёнву, Дж. Даекванг, О. ЮнДже и W. Eun Tae, «Связь в видимом свете NRZ со скоростью 100 Мбит / с с использованием белого светодиода с посткоррекцией», IEEE Photonics Technology Letters, vol. 21, стр. 1063-1065, 2009.
2. JJD McKendry, D. Massoubre, S. Zhang, BR Rae, RP Green, E. Gy, P. K. Хендерсон, А. Е. Келли и М. Д. Доусон, «Связь в видимом свете с использованием массива микросветодиодов, управляемого КМОП», Journal of Lightwave Technology, vol. 30, стр. 61-67, 2012..
3. 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 линия VLC на основе OFDM с одним светодиодом со скоростью 3 Гбит / с с использованием μ LED из нитрида галлия», IEEE Photonics Technology Letters, vol. 26, стр. 637-640, 2014.
4. А. Бертон, М. Хоа Ле, З. Гассемлой, Э. Бенгли и К. Ботелла, «Экспериментальная демонстрация связи в видимом свете со скоростью 50 Мбит/с с использованием MIMO 4 на 4», Photonics Technology Letters, IEEE, об. 26, стр. 945-948, 2014.
5. AH Azhar, TA Tran и D. O'Brien, «Беспроводная передача Gigabit/s в помещении с использованием связи видимого света MIMO-OFDM». IEEE Photonics Technology Letters, том. 25, стр. 171-174, 2013.
6. З. Любин, Д. О'Брайен, М. Хоа, Г. Фолкнер, Л. Кёнву, Дж. Дэкванг, О. ЮнДже и В. Ын Тэ, «Множественный ввод-вывод с высокой скоростью передачи данных (MIMO) оптическая беспроводная связь с использованием белого светодиодного освещения», IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 27, стр. 1654-1662, 2009.
7. Т. Фат и Х. Хаас, «Сравнение производительности методов MIMO для оптической беспроводной связи в помещениях», IEEE Transactions on Communications, vol. 61, стр. 733-742, 2013.
8. X. Fang, M. Khalighi и S. Bourennane, «Влияние различных источников шума на характеристики приемников FSO на основе PIN и APD», в Телекоммуникации (ConTEL), Материалы 11-й Международной конференции 2011 г., 2011 г., стр. 211-218.

References

1. M. Hoa Le, D. O'Braien, G. Folkner, Z. Lýbın, L. Kěnvý, Dj. Daekwang, O. YunJe ı W. Eun Tae, «Svıaz v vıdımom svete NRZ so skorostý 100 Mbit / s s ispolzovaniem belogo svetodioda s postkorreksıeı», IEEE Photonics Technology Letters, vol. 21, str. 1063-1065, 2009.
2. JJD McKendry, D. Massoubre, S. Zhang, BR Rae, RP Green, E. Gy, R. K. Henderson, A. E. Kelli ı M. D. Doýson, «Svıaz v vıdımom svete s ispolzovaniem massıva mikrosvetoızlýchayıh diodov, ýpravlıaemogo KМOP», Journal of Lightwave Technology, vol. 30, str. 61-67, 2012.

3. D. Tsonev, H. Chýn, S. Radjbhandari, Dj. Makkendri, S. Videv, E. Gy, M. Hadji, S. Ýotson, A. Kelli, G. Folkner, M. Doýson, H. Haas ı D. O'Braien, «Besprovodnaia liniia VLC na osnove OFDM s odnim svetodiodom so skorostý 3 Gbit / s s ispolzovaniem μ LED iz nitrida gallia», IEEE Photonics Technology Letters, vol. 26, str. 637-640, 2014.
4. A. Berton, M. Hoa Le, Z. Gassemlou, E. Bentli ı K. Botella, «Eksperimentalnaia demonstratsiia sviazi v vidimom svete so skorostý 50 Mbit/s s ispolzovaniem MIMO 4 na 4», Photonics Technology Letters, IEEE, ob. 26, str. 945-948, 2014.
5. AH Azhar, TA Tran ı D. O'Brien, «Besprovodnaia peredacha Gigabit/s v pomeeniı s ispolzovaniem sviazi vidimogo sveta MIMO-OFDM». IEEE Photonics Technology Letters, tom. 25, str. 171-174, 2013.
6. Z. Lıýbin, D. O'Braien, M. Hoa, G. Folkner, L. Kěnvý, Dj. Dekvang, O. IýnDje ı V. Yn Te, «Mnojestvennyı vvod-vyvod s vysokoi skorostý peredachi dannyh (MIMO) opticheskaia besprovodnaia sviaz s ispolzovaniem belogo svetodiodnogo osveeniia», IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 27, str. 1654-1662, 2009.
7. T. Fat ı H. Haas, «Sravnenie proizvoditelnosti metodov MIMO dlia opticheskoi besprovodnoi sviazi v pomeeniıah», IEEE Transactions on Communications, vol. 61, str. 733-742, 2013.
8. X. Fang, M. Khalighi ı S. Bourennane, «Vlianie razlichnyh istochnikov shýma na harakteristiki priemnikov FSO na osnove PIN ı APD», v Telekomunikatsıı (ConTEL), Materialy 11-ı Mejdýnarodnoi konferentsıı str. 211-218, 2011.

Материал поступил в редакцию 3.11.2022 г.