

DOI 10.53364/24138614\_2023\_29\_2\_21  
FTAXP 50.05, 50.41  
ӘОЖ: 519.6

Әлібекқызы Қарлығаш, Д. Серікбаев атындағы "ШИТиИС" қауымдастырылған профессоры, ШҚТУ PhD философия докторы  
Өскемен қ., Қазақстан.

*E-mail: Karlygash.eleusizova@mail.ru*

## КӨРІНЕТІН ЖАРЫҚ БАЙЛАНЫСЫ IMAGING-MIMO μLED ЖӘНЕ КІРІКТІРІЛГЕН ҚАБЫЛДАҒЫШТЫ ҚОЛДАНАТЫН ЖҮЙЕ

**Аңдатпа.** Көп кірісті көп шығыс (MIMO) берілісін көрінетін жарық байланысы (VLC) жүйелерінің сыйымдылығын арттыру үшін пайдалануға болады. Бұл тәсіл микрожарық шығаратын диод (μLED) 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.

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

## СВЯЗЬ В ВИДИМОМ СВЕТЕ IMAGING-MIMO СИСТЕМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ μLED И ВСТРОЕННОГО ПРИЕМНИКА

Алибекқызы Карлығаш, ассоциированный профессор «ШИТиИС», доктор философии PhD ВКТУ им.Д. Серикбаева,  
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*E-mail: Karlygash.eleusizova@mail.ru;*

**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 (μLED).

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.

## COMMUNICATION IN VISIBLE LIGHT IMAGING-MIMO SYSTEM USING $\mu$ LED AND BUILT-IN RECEIVER

Associate Professor of "SOITaIS", Doctor of Philosophy PhD of D. Serikbayev EKTU  
Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan.

*E-mail: Karlygash.eleusizova@mail.ru*

**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 ( $\mu$ 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.

**Кіріспе.** Li-Fi деп те аталатын Visible Light Communications (VLC) жүйелері болашақ сымсыз байланыста маңызды рөл атқаруы мүмкін. Бұл жүйені орналастыру оңай және қамту жақсы жиіліктерде қолжетімді спектрдің болмауына байланысты радиожиілік (РЖ) жүйесінің өнімділігі шектелетінін ескере отырып маңызды.

VLC құны төмен компоненттерді пайдалана отырып, жүздеген ТГц лицензиясыз спектрге қол жеткізу мүмкіндігін ұсынады. Сонымен қатар, VLC тиімді жарықтандыруды коммуникациялармен біріктіріп, көп мақсатты арзан коммуникациялық инфрақұрылымның әлеуетін ұсынады.

Коммерциялық жарық диодтарының көпшілігі (жарық диодтары) сары люминофордың көмегімен көк жарықдиодты түс түрлендіруге негізделген. Сары люминофор жарық диодты шамның көк жарығын жұтып, кең сары спектрді қайта шығарады, ол көк толқын ұзындығымен дұрыс пропорцияда араласқанда ақ түс береді. Бұл құрылғылардың жаппай өндірісі үшін құны төмен болғанымен, өткізу қабілеттілігі төмен (бірнеше МГц) [1]. Жақында GaN негізіндегі көк және жасыл микро жарық шығаратын диодтар ( $\mu$ LED) 400 МГц-тен асатын оптикалық модуляция өткізу жолағын қамтамасыз ете алатыны көрсетілді [2]. Бір көк  $\mu$ LED көмегімен 3 Гб/с дейін қатесіз деректерді жіберу қысқа қашықтыққа ортогональды жиілікті бөлу мультиплексірлеуін (OFDM) қолдану арқылы көрсетілді [3].

VLC деректерінің ықтимал жылдамдығын арттыру үшін бірнеше кірісті көп шығыс (MIMO) жүйелері ұсынылды және зерттелді [4-7]. Кеңістіктік мультиплекстеу (SMP) көмегімен спектрлік тиімділіктің жақсаруын көрсететін әртүрлі MIMO схемаларының салыстырмалы зерттеулері. Кескінді көрсетуі бар және көрсетілмейтін төрт арналы MIMO жүйелері арна ұзындығы 1 м болатын [4, 5] көрсетілген.

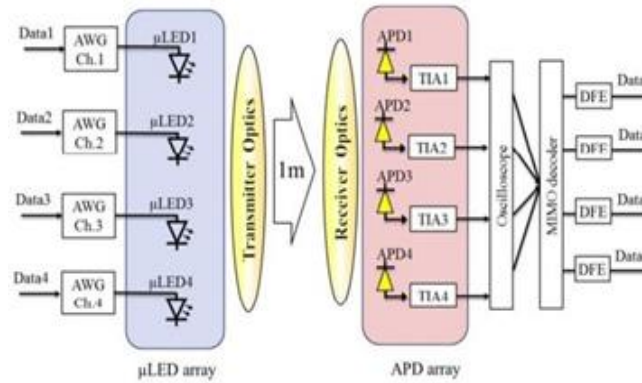
50 Мбит/с жиынтық деректер жылдамдығымен кескінді өңдеусіз MIMO VLC жүйелерін енгізу [4] сипатталған. OFDM және бейнелеу оптикасын қолдану арқылы MIMO Gbps жүйесі [5] көрсетілді. Жоғарыда аталған екі жүйеде эмитенттердің арасындағы қашықтық үлкен (15 см және одан жоғары) коммерциялық ақ жарықдиодты шамдарды пайдаланды. Бұл мұндай жүйелердің ауқымдылығын шектейді, әсіресе өте параллель қосылымдар қажет болса.

Бұл мақалада біз көк  $\mu$ LED және ендірілген CMOS негізіндегі қабылдағышты пайдаланып MIMO-VLC көрсетеміз. microLED және фотодетекторлардың массивтері сәйкесінше 1,5 мм және 0,25 мм қадам өлшеміне ие. Арнайы әзірленген таратқыш оптика мен кескінді қабылдағыш оптикасын пайдалана отырып, біз төрт арналы MIMO жүйелерін пайдалану мүмкіндігін көрсетеміз. Қазіргі уақытта бұл жылдамдық құрамдастардың өнімділігімен шектеледі, ал жетілдірілген ішкі жүйелер деректердің әлдеқайда жоғары

жылдамдығын қамтамасыз етуі керек.

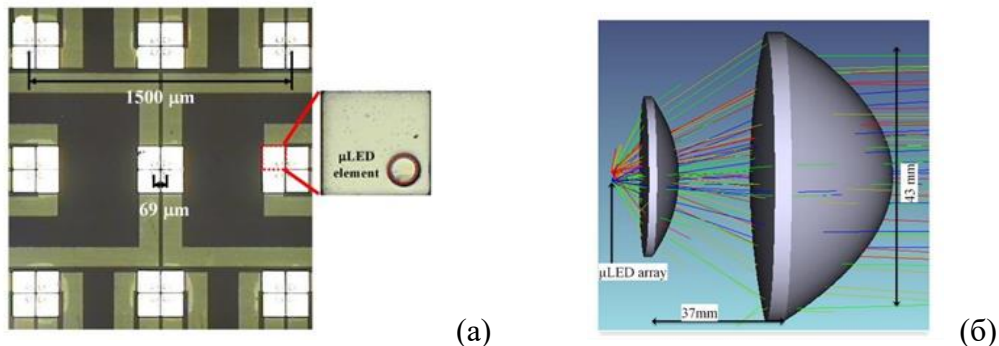
Бұл мақалада MIMO-VLC жүйесін пайдалану арқылы осы уақытқа дейін алынған практикалық енгізу және нәтижелер сипатталған. Мақала келесідей ұйымдастырылған: II бөлімде практикалық жүйеге шолу жасалады, ал III бөлімде эксперимент нәтижелері егжей-тегжейлі сипатталады. Қорытынды және алдағы жұмыс IV бөлімде берілген.

**Жүйе сипаттамасы.** Суретте. 1 осы мақалада қарастырылған MIMO-VLC жүйесінің құрылымдық диаграммасын көрсетеді. Таратқыш 450 нм толқын ұзындығында жұмыс істейтін 6x6 микро-жарық диодты жиымнан тұрады, олардың әрқайсысының спектрлік ені 20 нм толық енде максималды жартысы бар. Бұл құрылғылар сапфирде өсірілген коммерциялық InGaN/GaN көк жарықдиодты вафлилерден жасалған. MicroLED массиві элементтер екі көршілес microLED элементтері арасында 69 мкм қадаммен 2x2 кластерлерге топтастырылатындай етіп ұйымдастырылған. Элементтер арасындағы қашықтық 1,5 мм (2(a)-суретті қараңыз). Әрбір  $\mu$ LED диаметрі 39 мкм және өлшенген оптикалық қуат пен әртүрлі  $\mu$ LED өлшемдерімен қойылған өткізу қабілеттілігі шектеулеріне негізделген оңтайландырылған [2]. Бұл құрылғылар үшін күтілетін өткізу қабілеті 125 МГц. Бұл өткізу қабілеттілігі 100 мА ығысу тоқында қол жеткізіледі. Оптикалық қуатты азайту есебінен кішірек құрылғылармен жоғары өткізу қабілетіне қол жеткізуге болады.



Сурет 1. MIMO-VLC жүйесінің құрылымдық схемасы

Суретте. 2(b) таратқыш оптикасының диаграммасын көрсетеді. Бұл әрбір  $\mu$ LED шамдарынан ламбертиан сәулелерін жинайды және олардың алшақтығын басқарады. Содан кейін жарық қабылдағыштың оптикалық жүйесіне таралады. Қабылдағышта MIMO арнасын сәтті бөлу үшін арна N-матрицасы талапқа сай толтырылуы керек.



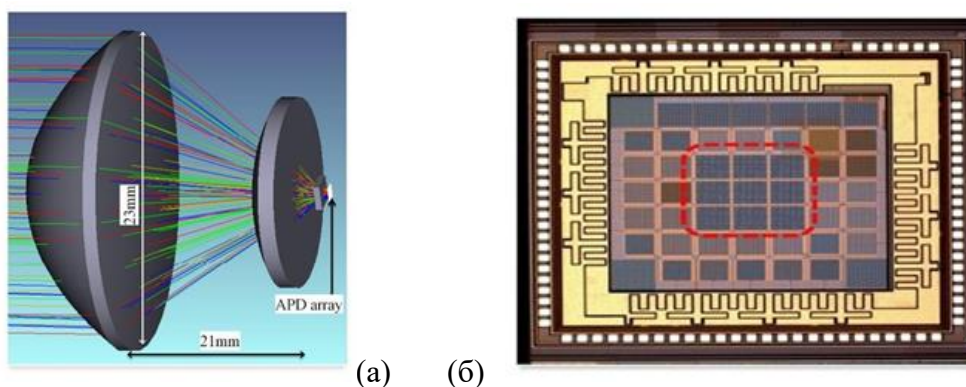
Сурет 2. а) MIMO құрылғысының  $\mu$ LED массивінің кескіндері. Әдеттегі  $\mu$ LED элементінің жоғары үлкейтетін кескіні және б) таратқыштың оптикалық жүйесінің диаграммасы енгізілген.

Бұл жағдайда таратқыштың оптикасы 7,5 градус (жалпы) дивергенция бұрышын қамтамасыз етуге арналған, ал қабылдағыш оптикасы (3(a) сурет) 3 градустық FOV (жалпы) қамтамасыз етеді. Таратқыш пен қабылдағыш оптикасының қолайлы жүйесі бар. коммерциялық қолжетімді линзалар арқылы әзірленген және сәулелік бақылау бағдарламалық құралымен оңтайландырылған.

Қабылдағыштың көру өрісі қабылдағыш массивіндегі детекторлардың санымен шектеледі, ол келесі бөлімде сипатталады.

Қабылдағыш арнайы әзірленген 0,18 мкм қосымша металл оксиді жартылай өткізгішінен (CMOS) көшкін фотодиодынан (APD) тұрады, әрбір детекторға енгізілген трансимпеданс күшейткіші (TIA) бар.

Әрқайсысының өлшемі  $200 \times 200$  мкм<sup>2</sup> болатын  $3 \times 3$  APD массиві 240 мкм (см) қадаммен орындалды күріш. 3(b).



Сурет 3. а) Қабылдағыштың оптикалық жүйесінің диаграммасы және б) APD массивінің кескіні, 9 APD қызыл шаршымен белгіленген.

Бұл құрылғылар 450 нм толқын ұзындығында жарықтандырылған кезде 12,75 В кері ығысу кезінде 2,61 А/Вт сезімталдыққа ие. APD таңдалды, себебі олардың PIN-PD-ге қарағанда сезімталдығы жоғары. [8] негізіндегі конструкциялар.

Ақырында, жіберілген сигналдар MIMO декодтау алгоритмін және жабық цикл эквалайзерін (DFE) қолданғаннан кейін бағаланады.

**Нәтижелер мен пікірталас.** Тәжірибелер қабылдағыштағы сигнал-шуылдың максималды қатынасын (SNR) алу үшін теңестірілген таратқыш пен қабылдағыштан 1 м қашықтықта жүргізілді. Төрт параллельді MIMO арналары қарастырылады, сондықтан төрт бұрыштық  $\mu$ LED массивтері пайдаланылады.  $\mu$ LED сызықты LIV жауап режимінде жұмыс істейтініне көз жеткізу үшін  $\mu$ LED шамдары 35 мА орташа токпен қозғалды. Орташа оптикалық қуаты 0,5 мВт болатын бір пикселді қоспағанда, осы қиғаш токта өлшенген орташа шығыс оптикалық қуат 1,5 мВт құрайды.

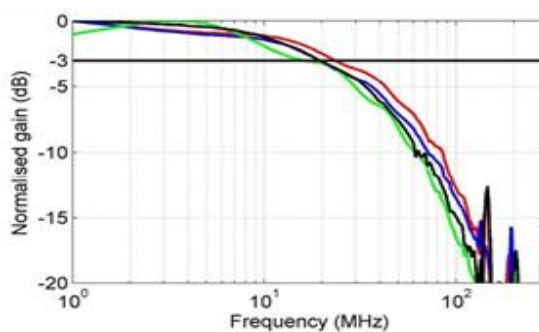
Суретте. 4-суретте шеткі бұрыштарда орналасқан төрт  $\mu$ LED бір мезгілде іске қосылған 1 м қашықтықта оптикалық жарықтандырудың кескіні көрсетілген. Әрбір шеңбер  $\mu$ LED оптикалық қарқындылық профиліне сәйкес келеді. Бұл жарық профилі симуляцияланған сәулелік бақылау профиліне тығыз сәйкес келеді.



Сурет 4. Таратқыштан 1 м қашықтықтағы оптикалық жарықтандырудың суреті.

MIMO жүйесі барлық төрт MIMO арнасы қабаттасатын орталық аймақта ғана жұмыс істей алатынын ескеріңіз. Сыртқы аймақтарда барлық төрт арнаның сигнал күші төрт арнадан алынған деректерді сәтті декодтау үшін жеткіліксіз. Жарық фотодетекторларға симметриялы түрде түскенде өнімділіктің қатты төмендеуін тудыратын кәдімгі  $N \times N$  MIMO жүйесінен айырмашылығы, мұқият қарастырылған өлшемдер мен  $4 \times 9$  MIMO құрылымының арқасында мұнда ұсынылған дизайн симметрия мәселесінен іс жүзінде босатылғанын ескеріңіз.

Төрт арна үшін жүйенің өлшенген жиілік жауаптары күріш. 5. Жүйенің өткізу қабілеті 18-22 МГц диапазонында. Өткізу қабілеті негізінен оңтайландырылмаған APD массивіне байланысты шектелген, оның өткізу қабілеті 22 МГц-тен аз. Қолжетімді таратқыш өткізу қабілеттілігін толық пайдалану үшін қазіргі уақытта таратқыш өткізу қабілеттілігіне сәйкес келетін модификацияланған APD зерттелуде.



Сурет 5. MIMO арналарының өлшенген электроэлектрлік жиілік жауаптары

Қосу-өшіру (OOK) модуляция схемасын қолдану арқылы MIMO жүйесінің өнімділігі бағаланды. Matlab® бағдарламасында төрт тәуелсіз 1013-1 ұзындығы PRBS жасалды және төрт MIMO арнасын басқаратын екі сигнал генераторына (Agilent 81150A) жүктелді. Төрт APD-дан алынған сигналдар осциллографтың (MSO7104B) көмегімен жазылды, содан кейін сигналды одан әрі өңдеу желіден тыс орындалды. Қабылдағыштағы жүйенің өткізу қабілеті шектеулі болғандықтан, 12 кідіріс сызығы (TDL) және 2 тұйық цикл TDL бар ішінара шешімнің кері байланысының әртүрлілігін теңестіру құралы (DFE) қабылданды.

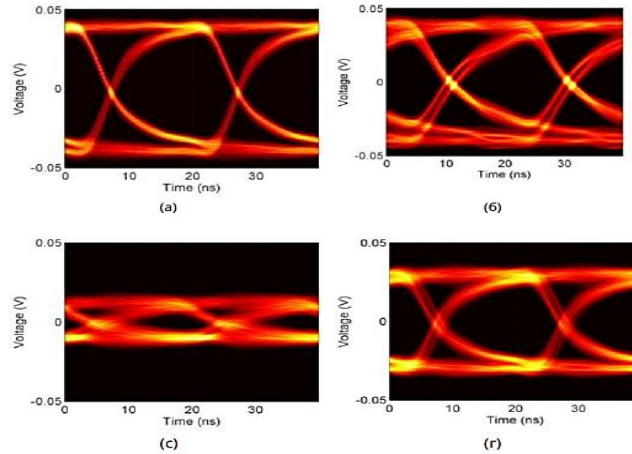
Алынған екілік деректер бит қателік жылдамдығын (BER) бағалау үшін жіберілген деректермен салыстырылады.

Таратқыш пен қабылдағыш модулінің тамаша туралануы бар MIMO бейнелеу жүйесінің өлшенген арнасының H-матрицасы I кестеде берілген, мұнда  $TX_i$  және  $RX_j$  таратқыш пен қабылдағыш элементтерін білдіреді. Арнаның максималды күшеюі 0 дБ дейін қалыпқа келтірілген.

Кескін қабылдағыштың арқасында арналар арасындағы оптикалық байланыс өте төмен, -14дБ төмен (яғни, электрлік айқас -28дБ төмен) екенін көруге болады. MIMO арналарын декодтау үшін әртүрлі декодтау алгоритмдерін қолдануға болады, соның ішінде минималды орташа квадратты бағалау (MMSE), нөлдік мәжбүрлеу (ZF) және Bell зертханаларының тік

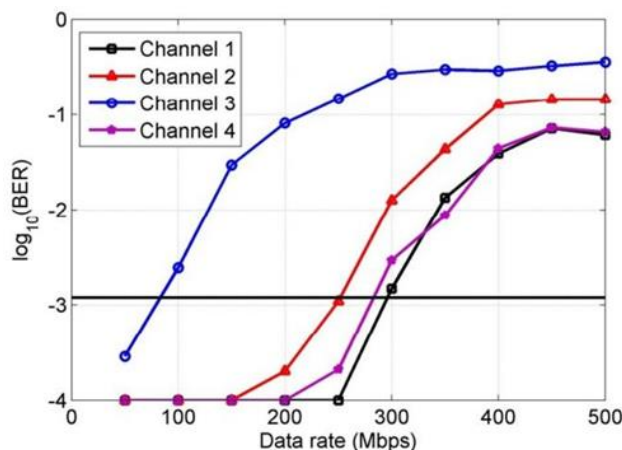
кеңістік-уақыт қабаты (V-BLAST). Дегенмен, өзара сөйлесудің төмен деңгейіне байланысты, деректерді осы алгоритмдерді қолданбай-ақ қалпына келтіруге болады.

Бұл бақылау сонымен қатар суретте көрсетілгендей көз диаграммаларымен, 50 Мбит/с жылдамдықтағы әртүрлі арналармен расталады. 6 көрінетін айқасу байқалмаған жерде. Әрбір арнаның көз диаграммалары басқа арналар жұмыс істеп тұрған кезде түсірілді.



**Сурет 6.** 50 Мбит/с жылдамдықпен қабылданған ООК сигналдарының көз диаграммасы (a) 1 арна (b) 2 арна (c) 3 арна және (d) 4 арна.

MIMO бейнелеу жүйесінің төрт арнасы үшін BER-мен салыстырғанда деректер жылдамдығы суретте көрсетілген. 7. Қабылданған сигнал DFE көмегімен адаптивті түрде теңестірілетінін ескеріңіз. 200 ООК битіне сәйкес келетін алғашқы 400 үлгі эквалайзерді үйрету үшін пайдаланылады, ал қалған деректер BER бағалау үшін пайдаланылады. Алдын ала қатені түзету (FEC) шегінен  $1,2 \times 10^{-3}$  асатын қол жеткізуге болатын деректер жылдамдығы 920 Мбит/с жиынтық деректер жылдамдығы үшін 1-4 арналар үшін тиісінше 300, 285, 85 және 250 Мбит/с құрайды. 3-арнаның төмен деректер жылдамдығы төмен берілетін оптикалық қуатпен байланысты. 3-арнаның тасымалданатын оптикалық қуаты басқа арналарға қарағанда  $\sim 2,5$  есе аз (бұл I кестедегі H-матрица арнасында да көрсетілген). Бұл құрылғыларды өндіру процесіндегі ақауға байланысты. Нәтижесінде көрші  $\mu$ LED шамдарына айтарлықтай ағып кету тогы болды, нәтижесінде тиімділік төмен болды. Бұл мәселе шешілуде және  $\mu$ LED жаңа буыны өткізу қабілеттілігі мен оптикалық қуат бойынша біркелкі өнімділікке ие болады деп күтілуде. Осыған қарамастан, бұл жұмыс MIMO кескіндеу жүйесі жақын орналасқан  $\mu$ LED және біріктірілген құрамдас бөліктерді пайдалану арқылы мүмкін болатынын көрсетеді.



**Сурет 7.** MIMO арналары үшін BER-мен салыстырғанда деректер жылдамдығы.

**Қорытынды және одан әрі жұмыс.** Бұл құжат жақын орналасқан  $\mu$ LED және біріктірілген CMOS негізіндегі қабылдағышты пайдаланатын біріктірілген MIMO жүйесінің сәтті көрсетілімі туралы хабарлайды. ~920 Мбит/с жиынтық деректер жылдамдығы ООК модуляция схемасы арқылы көрсетілді. Жоғары жылдамдықтар күрделірек модуляция схемаларын қолдануы мүмкін және интеграцияланған тәсіл деректер жылдамдығын бір мезгілде жақсарту арқылы жүйелерге көптеген параллельді арналарды пайдалана отырып масштабтауға мүмкіндік береді.

Болашақ жұмыс  $\mu$ LED ішіндегі ток ағып кету мәселесін шешуді қамтиды және қазірдің өзінде жүріп жатыр. APD массивінің екінші буыны да жүздеген МГц өткізу қабілеттілігіне ие болады деп күтілуде. Өткізу қабілеті жоғары APD және екінші буын  $\mu$ LED-лер арқылы әлдеқайда жоғары деректер жылдамдығы мүмкін болады.

Әрі қарайғы сынақтар өнімділікті оңтайландыру үшін қамтуды және әртүрлі MIMO алгоритмдерін пайдалануды бағалайды.

### Қолданылған әдебиеттер

1. Хоа Ле М., О'Брайен Д., Фолкнер Г., Любин З., Кёнву Л., Даекванг Дж., YunJe O. и Eun Tae W., «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. McKendry JJD, Massoubre D., Zhang S., Rae BR, Green RP., Гу Е., Хендерсон Р. К., Келли А.Е и Доусон М.Д., «Связь в видимом свете с использованием массива микросветодиодов, управляемого КМОП», Journal of Lightwave Technology, vol. 30, стр. 61-67, 2012.
3. Цонев Д., Чун Х., Раджбхандари С., Маккендри Дж., Видев С., Гу Э., Хаджи М., Уотсон С., Келли А., Фолкнер Г., Доусон М., Хаас Х. и О'Брайен Д., «Беспроводная линия VLC на основе OFDM с одним светодиодом со скоростью 3 Гбит / с с использованием  $\mu$ LED из нитрида галлия», IEEE Photonics Technology Letters, vol. 26, стр. 637-640, 2014.
4. Бертон А., Хоа Ле М., Гассемлой З., Бентли Э. и Ботелла К., «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. Azhar AH, Tran TA и O'Brien D., «Беспроводная передача Gigabit/s в помещении с использованием связи видимого света MIMO-OFDM». IEEE Photonics Technology Letters, том. 25, стр. 171-174, 2013.
6. Любин З., О'Брайен Д., Хоа М., Фолкнер Г., Кёнву Л., Дэкванг Дж., Юндже О. и Ын Тэ В., «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. Фат Т., Хаас Х., «Сравнение производительности методов MIMO для оптической беспроводной связи в помещениях», IEEE Transactions on Communications, vol. 61, стр. 733-742, 2013.
8. Fang X., Khalighi M., Bourennane S., «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. Hoa Le M., O'Braien D., Folkner G., Lýbın Z., Kěnvý L., Daekwang Dj., YunJe O. ı Eun Tae W., «Svıaz v vıdımom svete NRZ so skorostıú 100 Mbit / s s ispolzovanıem belogo svetodioda s postkorreksıeı», IEEE Photonics Technology Letters, vol. 21, str. 1063-1065, 2009.
2. McKendry JJD, Massoubre D., Zhang S., Rae BR, Green RP., Gý E., Henderson R. K., Kellı A.E ı Doýson M.D., «Svıaz v vıdımom svete s ispolzovanıem massıva mıkrısvetoızlýchaıúıh díodov, úpravlıaemogo KMOP», Journal of Lightwave Technology, vol. 30, str. 61-67, 2012.

3. Tsonev D., Chýn H., Radjbhandari S., Makkendri Dj., Videv S., Gy E., Hadji M., Ýotson S., Kelli A., Folkner G., Doýson M., Haas H. 1 O'Braien D., «Besprovodnaia liniia VLC na osnove OFDM s odnim svetodiodom so skorostý 3 Gbit / s s ispolzovaniem  $\mu$ LED iz nitrida gallia», IEEE Photonics Technology Letters, vol. 26, str. 637-640, 2014.
4. Berton A., Hoa Le M., Gassemlou Z., Bentli E. 1 Botella K., «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. Azhar AH, Tran TA 1 O'Brien D., «Besprovodnaia peredacha Gigabit/s v pomeeni s ispolzovaniem sviazi vidimogo sveta MIMO-OFDM». IEEE Photonics Technology Letters, tom. 25, str. 171-174, 2013.
6. Lýbyn Z., O'Braien D., Hoa M., Folkner G., Kěnvý L., Dekvang Dj., IýnDje O. 1 Yn Te V., «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. Fat T., Haas H., «Sravnenie proizvoditelnosti metodov MIMO dlia opticheskoi besprovodnoi sviazi v pomeeniakh», IEEE Transactions on Communications, vol. 61, str. 733-742, 2013.
8. Fang X., Khalighi M., Bourennane S., «Vlianie razlichnyh istochnikov shýma na harakteristiki priemnikov FSO na osnove PIN 1 APD», v Telekomúnikatsii (ConTEL), Materialy 11-ı Mejdýnarodnoi konferentsii 2011 g., 2011 g., str. 211-218.