

DOI 10.53364/24138614\_2023\_29\_2\_40  
FTAXP 50.05, 50.41  
ӘОЖ: 519.6

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

Адиканова С., IT және жаратылыстану ғылымдары жоғары мектебінің деканы, PhD  
философия докторы, С.Аманжолов атындағы ШҚУ, Өскемен қ., Қазақстан  
E-mail: [madina\\_vkgtu@mail.ru](mailto:madina_vkgtu@mail.ru).

**Аңдатпа.** 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/шум қатынасын (SNR) қамтамасыз етеді. Бұл зерттеуде жүйенің биттік қателік коэффициенті (BER) өнімділігі ұзындығы 4 км металл құбыр үшін модельденеді. 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 көшкіні диоды (SPAD).

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

Адиканова С., декан Высшей школы IT и естественных наук, доктор философии PhD,  
ВКУ им.С.Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Казахстан,  
E-mail: [madina\\_vkgtu@mail.ru](mailto:madina_vkgtu@mail.ru).

**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).

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

**Adikanova S.**, Dean of the Higher School of IT and Natural Sciences, PhD, Sarsen Amanzholov east kazakhstan university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

*E-mail: ersal\_7882@mail.ru*

**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 communication

**Кіріспе.** Сымсыз қызметтер мен қолданбалардың жылдам өсуімен шектелген радиожилік (РЖ) спектрі болашақ деректер жылдамдығы қажеттіліктерін қанағаттандыру үшін жеткіліксіз болуы мүмкін. Өміршең қосымша тәсіл ретінде оптикалық сымсыз байланыс (OWC) қатты күйдегі жарықтандыру технологиясындағы соңғы технологиялық жетістіктерге байланысты айтарлықтай назар аударды. OWC артықшылығы оның 400-790 терагерц (Тц) диапазонындағы көрінетін жарық спектрін қоса алғанда, инфрақызылдан (ИК) ультракүлгінге (УК) дейін шексіз дерлік өткізу қабілеттілігін ұсынады. OWC-тің басқа маңызды артықшылықтары мыналарды қамтиды: лицензиясыз жұмыс, жоғары байланыс қауіпсіздігі, арзан сыртқы интерфейстер және РЖ жүйелеріне кедергі жоқ. Соңғы артықшылығы OWC және RF жүйелерін бір уақытта қолдануға болатындығын білдіреді.

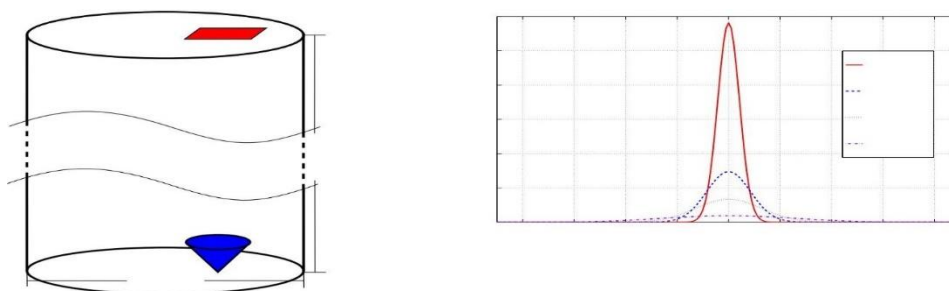
Қазіргі көрінетін жарық байланысы (VLC) жүйелері негізінен таратқыш ретінде жарық шығаратын диодтарды (жарық диодтар) пайдаланады. Қабылдағышта оң-ішкі-теріс (PIN) диодтар, көшкін фотодиодтары (APD) және жалғыз фотонды көшкін диодтары (SPAD) сияқты жоғары сезімтал фотодиодтар (PD) бар. Бір жарық диодты қолданатын бүгінгі күннің ең жылдам сымсыз VLC жүйесі 3 Гбит/с асатын жылдамдыққа қол жеткізе алады. Дегенмен, жарық диодының когерентсіз шығысы ақпаратты тек қарқындылық деңгейінде кодтауға болатындығын білдіреді. Нәтижесінде деректерді модуляциялау үшін тек нақты және оң сигналдарды пайдалануға болады. Бұл күрделі және биполярлық сигналдарды пайдаланатын РЖ жүйелеріне мүлдем қарама-қайшы. Осылайша, VLC жүйелері әдетте қарқындылықты модуляциялау (IM) және тікелей анықтау (DD) жүйелері ретінде модуляцияланған болып саналады. Қосу-өшіру (OOK), импульстік позиция модуляциясы (PPM) және импульстік

амплитудалық модуляция (PAM) IM/DD жүйелерімен бірге қолданылатын танымал модуляция схемаларының кейбірі болып табылады.

Деректерді жоғары жылдамдықпен жіберу үшін адаптивті биттік жүктеуді және қуатты пайдалану арқылы арна сыйымдылығын жақындату үшін оптикалық ортогональды жиілікті бөлу мультиплексирлеуі (O-OFDM) қолданылады. VLC-де тұрақты офсетті оптикалық OFDM (DCO-OFDM), асимметриялық кескіш оптикалық OFDM (ACO-OFDM), бірполярлы OFDM (U-OFDM) және тікелей офсеттік OFDM сияқты әртүрлі O-OFDM модуляция схемалары енгізілген және қолданылған. ток. (NDC-OFDM)

Алдыңғы зерттеулерде VLC ішкі сымсыз байланыс, қауіпті ортадағы сымсыз байланыс және су астындағы байланыс сияқты қолданбалар үшін қарастырылды. Бұл зерттеудің басты мақсаты газ өнеркәсібінде VLC. Газ өнеркәсібінде байламдар мен брондалған кабельдерді пайдалану жер бетіндегі жақсы байланыстар үшін кең таралған тәжірибе болып табылады, бірақ бұл қондырғылар техникалық қызмет көрсету және сенімділік мәселелерін тудырады. Сонымен қатар, сымды шешімдердің орнату шығындары жоғары, ал олардың жұмыс істеуі өндірісті тоқтатуды талап етеді, бұл оператордың тоқтап қалуына байланысты қосымша шығындарға әкеледі. Сымсыз шешімдер, сондай-ақ балшық импульстік телеметрия, төмен жиілікті электромагниттік толқындар және акустикалық толқындар сияқты ұңғыманы бақылауда пайдалану үшін қарастырылды, бірақ олардың өнімділігі алыс қашықтыққа байланыс үшін қанағаттанарлық емес. Төмен деректер жылдамдығы, анықталмайтын жағдайлар және қоршаған ортаға әсерлер осы контексте сымсыз байланыс жүйелерінің дамуын шектейтін негізгі факторлар болып табылады.

Бұл мақала VLC көмегімен сымсыз шешімді ұсынады.



Сурет 1. Болат құбыр үлгісі

Шешім жоғары жылдамдықпен және байланыс сенімділігімен төмен қуат тұтынуды қамтамасыз етуге арналған. Радио бақылау жүйесінен айырмашылығы, антенналардың орнына жарықдиодты таратқыш қолданылады. Осылайша, ұсынылған жүйе қауіпсіз шешім болып саналады.

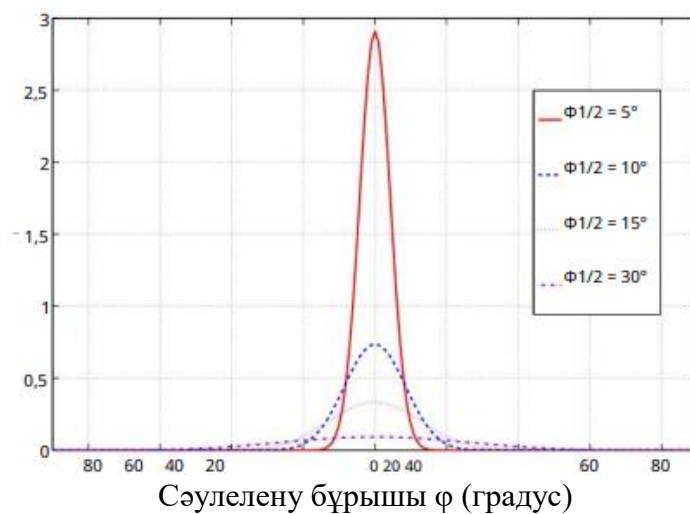
**Жүйе моделі.** Бұл бөлімде ұсынылған жүйенің практикалық үлгісі берілген. Жалпы VLC жүйелеріне негізделген байланыс жүйесі көк жарық диоды мен SPAD массивінен тұрады. Ұзын болат құбыр беру арнасын анықтайды.

Құбыр параметрлері

Суретте көрсетілгендей. 1, байланыс жүйесі ұзындығы 4000 м және диаметрі 1,5 м ұзын цилиндрлік болат құбырда жүзеге асырылады деп болжанады. Өлшемдері осындай түтіктің нақты орналасуынан алынады. Болаттың шағылыстыру қабілеті 58,5% құрайды.

Бұл зерттеуде ақпаратты тасымалдаушы жарықтың шағылысуы құбырдың ішкі бетіндегі спекулярлық шағылысу ретінде қарастырылады. Ұңғымаларды бақылау жүйесінде адасушы жарық жоқ. Сондықтан түтіктің жоғарғы жағына жеткен фотондар тікелей жолдан немесе түтік ішіндегі шағылысулардан келеді. Бұл құбыр таралу арнасын білдіреді және арна үлгісін жасау үшін сәулелік бақылау әдісі қолданылады. Іс жүзінде газ осы құбыр арқылы

тасымалданады. Жарық толқындарының жылдамдығы газ тәрізді ортада сыну көрсеткішіне сәйкес төмендейтіндіктен, әсер таңбааралық кедергі (ISI) арқылы күшейеді, бұл анықтау кателерінің ықтималдығын арттырады. Бұл зерттеу негізгі өнімділікті орнату және жалпы орынды түсіну үшін құбырдың вакуумда болуын болжайды.



Сурет 2.  $\Phi 1/2 = 5, 7,5, 10$  және  $P_t = 0,1$  Вт кезіндегі Ламберт сәулелену қарқындылығы

Жарық диодты таратқыш С. SPAD қабылдағышы және фотонды санау күріште көрсетілгендей. 1, құбырдың төменгі жағындағы жарық диодты таратқыш ретінде пайдаланылады. Жарық диодты толқын ұзындығы 450 нм болатын көк жарық шығарады. Жарық диодты таратқыштың жарық сәулеленуін жалпылама ламберттік сәуле шығару қарқындылығы үлгісін [11] пайдаланып модельдеуге болады:

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

мұндағы  $\beta = \ln 2 / \ln(\cos(\Phi 1/2))$ , а  $\Phi 1/2$  — жартылай қуат бұрышын білдіретін таратқыштың жарты бұрышы.  $\varphi$  айнаымалысы сәулелену бұрышын білдіреді,

$P_t$  жарық диодының орташа қуаты болып табылады. Қарастырылған ұзын түтік байланыс жүйесінде дизайн мақсаты жарық шығарылған кезде SPAD қабылдағышына жеткілікті фотондардың түсуін қамтамасыз ету болып табылады. Маңызды параметр - таратқыштың жартылай бұрышы. Суретте. 2 В жартылай бұрыштарында ламберттік сәулеленудің қарқындылығының таралуын көрсетеді. эмитент Көрсетілгендей, 5 15 үлкен және 30 жарық диодты қуаты төменгі таратқыштың жарты бұрыштары үшін төменгі сәулелену бұрыштары ( $-5^\circ$ ) диапазонында 0,1 шоғырлануы мүмкін. Бұл құбыр қабырғасына түсетін жарық сәулелерінің мөлшерін азайтады және осылайша шағылысудан болатын шығынды азайтады.

Фотондардың көру сызығында SPAD-ға (LOS) түсу мүмкіндігін арттыру үшін жарық диоды мен SPAD бетінде тігінен тураланады. Бұл зерттеуде 5-тен 1-ге дейінгі жарты бұрыш мәндері қарастырылады.

SPAD қабылдағышы және фотонды санау

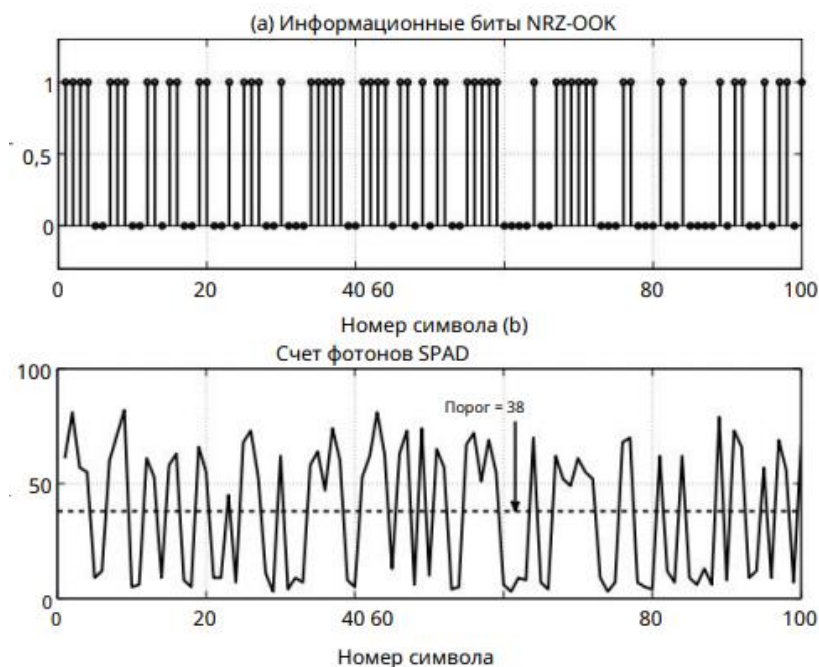
Ұзақ қашықтыққа (4000 метр) беріліс болғандықтан, жоғарғы беттегі радиация максималды қашықтық бірнеше метр болатын стандартты ішкі VLC сценарийлеріне қарағанда төмен. Шындығында, белгілі бір сценарийде қабылдағыштағы фотондар саны тек ондаған фотондар аймағында болуы мүмкін. Әдеттегі APD күшейту сигналды одан әрі өңдеу үшін жеткілікті сигнал қуатын алу үшін жеткіліксіз. Сондықтан ұңғымаларды бақылау жүйесінде пайдалану үшін жоғары сезімтал қабылдау құрылғысы SPAD ұсынылады. Бұл диод Гейгер деп аталатын аймақта кері ыдырауға ұшырамайтын APD болып табылады. Бұл жұмыс режимінде

SPAD әрбір анықталған фотон үшін миллиардтаған электронды-тесік жұптарын генерациялай бастайды. Нәтижесінде құрылғы өте сезімтал және бір фотонды дәл анықтауға қабілетті. Сонымен қатар, SPAD келесі мақсаттарда ұңғымаларды бақылау жүйесінде пайдалану үшін қарастырылуда:

Ұңғымада сыртқы жарықтан бос орта жасалады. Сондықтан SPAD қабылдағышының жоғары сезімталдығы қоршаған шумен төмендемейді. ii SPAD жоғары сезімталдығына байланысты, беру ауқымы мен оптикалық қуат батареяның қызмет ету мерзімін тиімді түрде қысқартуы мүмкін. iii Килобит пен секундына бірнеше мегабит аралығындағы қажетті деректер жылдамдығы қосу-өшіру кілтін (ООК) пайдалану үшін жеткілікті төмен. ООК қарапайым табалдырықты анықтау әдістерін Гейгер баллдық принципімен бірге пайдалануға мүмкіндік береді. iv SPAD трансимпеданс күшейткішін (TIA) қажет етпейді және шығыс импульстік тізбегі болып табылады (3(b)-суретте көрсетілгендей), бұл қабылдағыш шуын айтарлықтай азайтады.

$\phi(nR)$  өрнегі шағылысу функциясы ретінде сәулелену бұрышы;  $nR$  - шыңға жету үшін қажетті шағылысулар саны. SPAD-ке жету үшін қажетті шағылысулар саны жарық сәулесі жарық диодты шамнан шығатын сәуле шығару бұрышын анықтайды, сондықтан біз  $\phi$  мәнін  $nR$  функциясы ретінде көрсетуді шештік. Болаттың шағылыстыру қабілеті CR түрінде көрсетіледі.

Тәжірибеде қоршаған жарық, қараңғы санау қатынасы (DCR), өшу коэффициенті, салыстырмалы қарқындылық шуы және сағаттық діріл бір уақыт аралығындағы есептелген фотондар санына қосылады [3]. Сөну коэффициенті, салыстырмалы қарқындылық шуы және сағаттық діріл әсері сыртқы жарық пен DCR әсерінен әлдеқайда аз болғандықтан, модельдеу кезінде олар ескерілмейді [3]. Жүйе сыртқы жарық жоқ ұзын болат құбырда жүзеге асырылатындықтан, DCR басым шу көзі болып саналады. SPAD термиялық медиа арқылы пайда болатын PD қараңғы токқа ұқсас DCR көрсетеді. Бұл DCR фотондар SPAD жетпеген кезде де бар екенін білдіреді. Іс жүзінде DCR әрбір уақыт аралығында есептелген фотондардың санын көбейтеді.



Сурет 3. Мысал: SAD үшін NRZ-OOK модуляциясы және демодуляциясы.

Модуляция схемасы

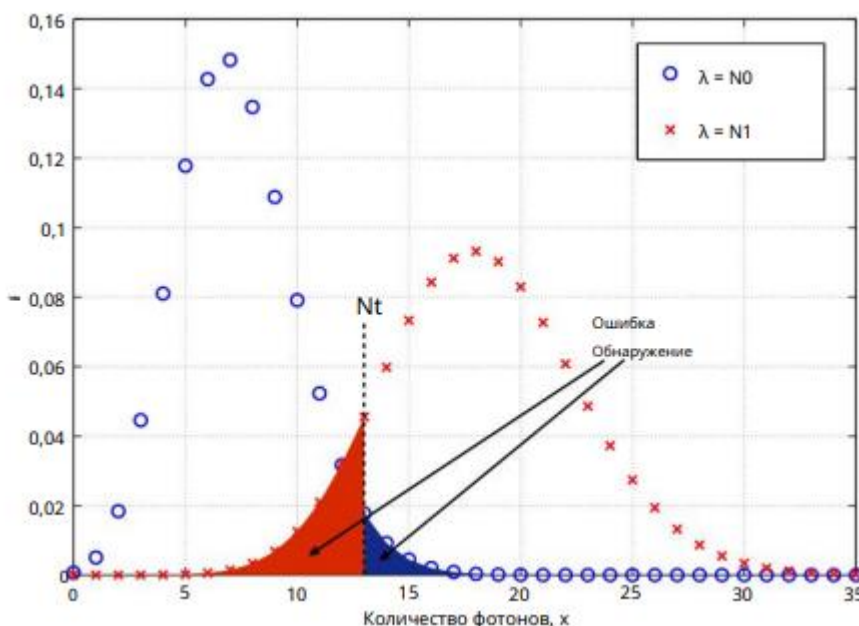
Бұл зерттеу нөлге қайтарусыз ООК пайдаланады (NRZ-OOK).

Таратқышта кіріс биттік ағыны цифрлық-аналогтық түрлендіргіш (D/A) арқылы тікелей аналогтық сигналға түрлендіріледі.

Екілік «1» екілік «0» көрсететін кернеуден әлдеқайда жоғары оң кернеумен көрсетіледі.  $NP(NR) = CPDE$  Таратқышта кіріс биттік ағыны цифрлық-аналогтық түрлендіргіш (D/A) арқылы тікелей аналогтық сигналға түрлендіріледі. Биттерге тағайындалған кернеу деңгейлері жүйенің қуат шектеулеріне байланысты. Бұл зерттеуде  $P1$  «1» үшін тағайындалған қуатты білдіреді және  $P0$  «0» үшін тағайындалған қуатты білдіреді. (2)  $Pt = 2$  (3) Кездейсоқ құрылған нөлдер мен бірліктер біркелкі үлестірімге сәйкес болғандықтан,  $Pt$ ,  $P1$  және  $P0$  келесі қатынастарға ие:

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

Сигнал жарық диоды арқылы берілгенде, кернеулер сәйкес жарық қарқындылығына түрленеді. Нәтижесінде «1» ең жоғары жарық қарқындылығымен, ал «0» нөлге жақынырақ төмен қарқындылықпен көрсетіледі. Суретте көрсетілгендей. 3(b), ақпаратты тасымалдаушы жарық SPAD арқылы қабылданады және фотондар санымен көрсетіледі. Түпнұсқа цифрлық биттермен салыстырғанда (3(a)-сурет) жіберу кезінде «1» көп фотондар есептелетінін, ал «0» қабылдағышта әлдеқайда аз фотондармен көрсетілгенін көруге болады. Алынған фотондар мен DCR шуы кездейсоқ оң бүтін сандарды [12] тудыратын Пуассон үлестіріміне сәйкес болғандықтан, екеуі де есептелген фотондардың санын көбейтеді. Нәтижесінде, суретте. 3(b), демодуляция қателерін тудыруы мүмкін тұрақты емес ауытқулар байқалады. Бұл зерттеу бит жылдамдығы төмен (1 кбит/с) және қабылдағышқа түсетін тікелей және шағылысқан жарық арасындағы уақыт аралығы қысқа деп болжайды. Демек, таңба ұзақтығы ) кідірістің таралуынан әлдеқайда жоғары. Сондықтан ISI елемей мүмкін.



Сурет 4. Ықтималдық қателерді анықтау талдауы

Бұл зерттеуде NRZ-OOK демодуляциясы үшін есептелген фотондардың орташа санына тең шекті мән таңдалды. Шек оңтайлы емес.

Оңтайлы шекті анықтау бұл жұмыстың ауқымынан тыс. Ақылға қонымды жуықтау - жасалған жорамалдағы фотондардың орташа саны. Мысалы, күріш. 3(b), табалдырық 38-ге орнатылады. Бұл фотондар саны 38-ден асқанда сигналдың "1"-ге демодуляцияланатынын білдіреді. Әйтпесе, «0» алынады.

**BER теориялық талдауы.** Пуассон үлестірімі шудың теориялық мәнін есептеу үшін қолданылады. Пуассонның таралу ықтималдығы тығыздығы функциясы (PDF):

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

$\lambda$  — таралу ортасы. Пуассон үлестірімінің жинақталған таралу функциясы (CDF):

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

Стандартты VLC және RF жүйелерінде қосымша ақ Гаусс шуы (AWGN) әдетте ең көрінетін шу құрамдас бөлігі болып табылады. AWGN арнасындағы әртүрлі модуляция сұлбаларының BER сипаттамаларын есептеуге арналған теңдеулер [13] берілген. Пуассон шуы үшін ұқсас принципті қолдануға болады. Суретте. 4 қате ықтималдық талдауын көрсетеді. Көк шеңберлері бар қисық «0» жіберілген кезде есептелген фотондардың PDF форматын білдіреді. Қабылдағыш таратқыштың фотондарын және DCR шу процесін есептейтіндіктен, бұл PDF файлының орташа мәні

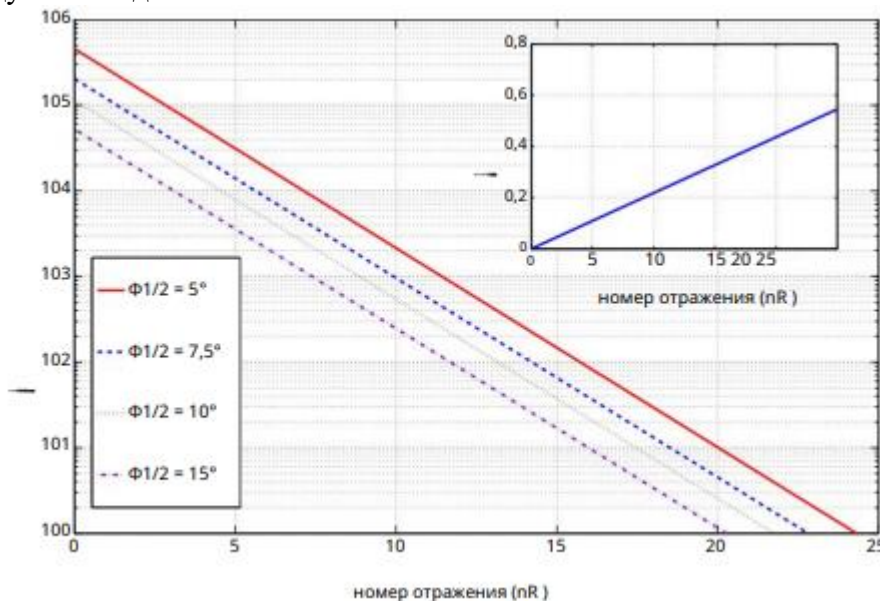
$$0 = Nr0 + Ne. \quad (5)$$

Қызыл «x» таңбалары бар қисық «1» жіберілген кезде есептелген фотондардың PDF форматын білдіреді. PDF мәні

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

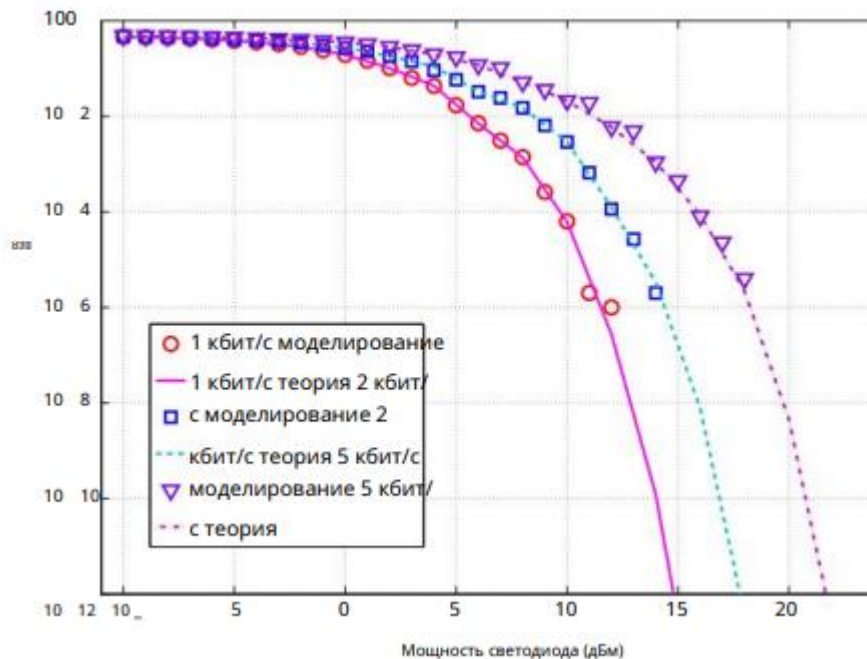
**Модельдеу нәтижелері.** Модельдеу кезінде жарықдиодты эмитент төменгі бетінің ортасынан жарты радиусқа тең қашықтықта орналасады. Вакуумдағы көк жарық (450 нм) үшін фотон энергиясы (EP)  $4,42 \times 10^{-19}$  Дж құрайды. Жарық диодты жарты бұрыш ( $\Phi/2$ ), жарық диодты қуаты (Pt) және өткізу қабілеттілігі (фут) сияқты басқа LED параметрлері айнымалы мәндер болып табылады. симуляцияда.

Бұл айнымалылардың әртүрлі мәндері қолайлы мәндерді таңдау үшін модельденеді. Жарық диодты қуаты -10-дан сыналған



Сурет 5. Фотондар саны

SPAD шағылысу санынан кейін қабылдай алатын фотондар саны,  $P_t = 0,1$  Вт және  $\Phi_{1/2} = 5, 7,5, 10^\circ$  және  $15^\circ$  үшін 25 дБм дейін және қарастырылатын өткізу жолағы 1 кГц, 2 кГц және 5 кГц. Бұл мақалада «0», P0 үшін тағайындалған қуат 0 Вт деп есептеледі. Демек, (3) нүктесінен '1', P1-ге берілген қуат  $2P_t$ . Модельдеуде [3] берілген SPAD екі себеп бойынша пайдаланылады: а) бұл фотондарды қабылдау ықтималдығын арттыратын 1024 SPAD элементтері бар үлкен массив ( $2,4 \times 2,1$  мм); және б) бұл құрылғы іс жүзінде бар, бұл өте маңызды, өйткені мақсат осы зерттеудегі модельдеу нәтижелерін сынау үшін демонстратор құру. CPDE мәні 20%, ал NDCR R 7,27 кГц тең [3]. I кестеде модельдеуде қолданылатын барлық параметрлер келтірілген. Қабылданған фотондар саны. 5-суретте қабылдағышқа жету үшін сәулелену бұрышы мен шағылысу арасындағы байланыс көрсетілген. 25 шағылысу санында бұрыш тек 0,55, ал косинус 0,9999 екенін көруге болады. Себебі жүйе ұзын құбырда жүзеге асырылады, ал жоғарғы бетінің ауданы салыстырмалы түрде аз. Демек,  $\varphi(nR)$  сәулелену бұрышын 0-ге жақындатуға болады, тіпті 20-дан астам шағылысу болса да. Осылайша,  $\cos\beta$  ( $\varphi(nr)$ ) егер (2)  $\beta$  үлкен болса. 1-ге тең, тіпті әрбір шағылысу сәулесінде алынған фотондардың санын есептеңіз, (2) келесідей жеңілдетуге болады: осылайша,  $\cos\beta$  ( $\varphi(nr)$ ) егер (2)  $\beta$  үлкен болса. 1-ге тең, тіпті әрбір шағылысу сәулесінде алынған фотондардың санын есептеңіз, (2) келесідей жеңілдетуге болады: осылайша,  $\cos\beta$  ( $\varphi(nr)$ ) егер (2)  $\beta$  үлкен болса. 1-ге тең, тіпті әрбір шағылысу сәулесінде алынған фотондардың санын есептеңіз, (2) келесідей жеңілдетуге болады: осылайша,  $\cos\beta$  ( $\varphi(nr)$ ) егер (2)  $\beta$  үлкен болса. 1-ге тең, тіпті әрбір шағылысу сәулесінде алынған фотондардың санын есептеуге болады, (2) ретінде жеңілдетуге болады: 5 - суретте қабылдағышқа жету үшін жарық сәулесі өтуі керек шағылысу санының ұлғаюымен қабылданған фотондар саны күрт азаяды.

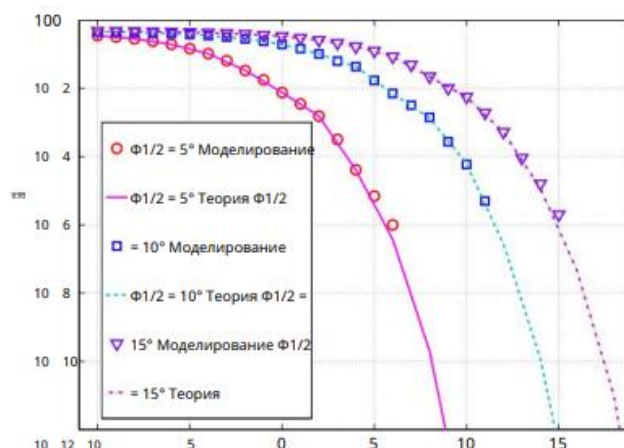


**Сурет 6.**  $\Phi_{1/2} = 10$  кезінде 1 кбит, 2 кбит/с және 5 кбит/с үшін BER SPAD құбыры BE ұпайлары

Осы параметрлерді пайдалана отырып, алынған фотондардың мәнін есептеуге болады. Фотондар саны орташа жарық диодты қуаты  $P_t$  артады. Суретте. 6 тұрақты жарық диодты жарты бұрышы бар SPAD қабылдағышының BER сипаттамаларын көрсетеді ( $\Phi_{1/2} = 10$ ). Бұл жағдайда тасымалдау жылдамдығы 1 кбит, 2 кбит және 5 кбит деп есептеледі. Суретте. 6 модельдеу нәтижелері мен теория арасындағы жақсы келісімді көрсетеді. Көрсетілгендей,



жарық диодты қуат тұтынуы BER 109 үшін 1 кбит/с жылдамдықта шамамен 13,5 дБм құрайды. 2 кбит/с және 5 кбит/с сияқты жоғары бит жылдамдықтары үшін қуат талаптары сәйкесінше 16 дБм және 20,5 дБм болады. (11) 7 1 кГц деректер жылдамдығында SPAD үшін BER сипаттамаларын көрсетеді. күріштен айырмашылығы. 6, сур. 7 жарты бұрыш өзгерген кезде BER өнімділігін көрсетеді,  $\Phi/2 = 5$  10 және 15.  $\Phi/2 = 5$  болғанда, жарық диоды 109 қажет. жалпы 7,5 дБм,  $\Phi/2 = 15$  және BER = BER 109 жету үшін жарық диодының қуат тұтынуы 17,5 дБм болады. Жартылай бұрыш ұлғайған сайын жарық диодты таратқыштың қуат тұтынуы артады. Нәтижесінде жүйе төменгі жарты бұрышта жоғары энергия тиімділігіне қол жеткізеді. Іс жүзінде ұзағырақ немесе қысқарақ арна пайдаланылуы мүмкін және әртүрлі сценарийлерде бит жылдамдығы талаптарында айырмашылық бар. 8-суретте жарты бұрыш ( $\Phi/2 = 10$ ) бекітілген және BER 103 деп қабылданған кезде таратқышқа қажетті қуатты көрсетеді. 8-суретте. құбырдың ұзындығы 1000-нан 1000 метрге дейін өзгереді деп болжанады.



Жарық диодты қуаты (дБм)  
Сурет 7.  $\Phi/2 = 5, 10$  және  $15$  үшін BER SPAD құбыры 1 кбит/с

**Қорытынды.** Бұл мақалада ұзын құбырдағы газ ұңғымасы үшін ұңғыманы бақылау жүйесіне арналған энергияны үнемдейтін VLC қолданбасы ұсынылған. Кәдімгі PD қолданатын кәдімгі VLC жүйелерінен айырмашылығы, ұсынылған жүйе фотондар санын санауға қабілетті SPAD қабылдағышына негізделген. SPAD массивін пайдаланған кезде, жарық диодты таратқышқа ұзындығы 4000 м газ ұңғымасының құбырына пилоттық сигнал жіберу үшін тек 8 дБм қуат қажет.

Төменгі жарықдиодты таратқыш батареядан қуат алуы керек болғандықтан, жоғары энергия тиімділігі жүйенің ұзақ қызмет ету мерзімін қамтамасыз етеді.

#### Әдебиеттер тізімі:

1. Эльгала Х., 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. Меслех Р., Мехмуд Р., Эльгала Х. и Хаас Х. «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. Фишер Э., Андервуд И. и Хендерсон Р. «Реконфигурируемый интегрирующий приемник с подсчетом одиночных фотонов для оптической связи», IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 48, № 7, стр. 1638–1650, июль 2013г.
4. 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 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. Кан Дж. М. и Барри Дж. Р., «Беспроводная инфракрасная связь», Труды IEEE, том. 85, нет. 2, стр. 265–298, 1997.

6. Махдираджи А. и Захеда Э. «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. Цонев Д., Синанович С. и Хаас Х. «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. Ли Ю., Цонев Д. и Хаас Х. «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. Джордж Дж. Дж., Мустафа М. Х., Осман Н. М., Ахмед Н. Х. и Хамед Д. М. «Обзор связи в видимом свете», Международный журнал инженерии и компьютерных наук, том. 3, стр. 3805–3808, февраль 2014 г.

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

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

12. Алсолами И., Читнис Д. О'Брайен Д. и Коллинз С. «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. Гловер И. А. и Грант П. М. Цифровые коммуникации. Прентис Холл, 1998.

### References

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

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

3. Fisher E., Andervýd I. i Henderson R. «Rekonfigýrýemyi integrirýýui priemnik s podshetom odnochnyh fotonov dlia opticheskoi sviazi», IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 48, № 7, str. 1638–1650, nýl 2013g.

4. Tsonev D., Chýn H., Radjbhandari S., MakKendri Dj., Videv S., Gy E., Hadji M., Ýotson S., Kelli A., Folkner G., Doýson M., Haas H. i O'Braien D. «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 apreha 2014 g.

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

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

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

8. Li Ý., Tsonev D. i Haas H. «OFDM bez smeennia 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 g.

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

2014 г.

10. Kaye GWC і Laby TH. Tablitsy fizicheskih і himicheskih konstant. Longman, 1995.
11. Barri Dj. R. Besprovodnaja infrakrasnaja svyaz. Springer, 1994, vyp. 280.
12. Alsolami I., Chitnis D. O'Braien D. і Kollinz S. «Veanie po kanalam podscheta fotonov s pomoiу PPM s neskolkim razresheniamі: realizatsіia і eksperimentalnye rezыltaty», v Communications Letters, IEEE, vol.16, no.12, str. 2072-2074, dekabr 2012 g.
13. Glover I. A. і Grant P. M. Tsifrovye kommunikatsіi. Prentis Holl, 1998.