



АҚПАРАТТЫҚ-КОММУНИКАЦИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР
ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES

АВТОМАТТАНДЫРУ ЖӘНЕ БАСҚАРУ
АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
AUTOMATION AND CONTROL

DOI 10.51885/1561-4212_2024_4_103
MFTAA 01.50.85

А.Ж. Алимханова¹, С.В. Григорьева², А.Б. Болатова³

Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
Өскемен қ., Қазақстан

¹E-mail: aslima_alimhanova@mail.ru

²E-mail: sgrigorieva@ektu.edu.kz

³E-mail: bolatova.anar@mail.ru*

ДЕРЕКТЕРДІ КӨРІНЕТІН ЖАРЫҚ АРҚЫЛЫ БЕРУГЕ БОЛАТЫН МОДУЛЯЦИЯ ӘДІСТЕРІН ЗЕРТТЕУ

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ МОДУЛЯЦИИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПО ВИДИМОМУ СВЕТУ

RESEARCH OF MODULATION METHODS FOR DATA TRANSMISSION VIA VISIBLE LIGHT

Аңдатпа. Байланыс саласындағы оптикалық диапазонға негізделген жаңа бағыттардың пайда болуы қазіргі заманғы сымсыз инфрақұрылымды ұйымдастырудағы бар проблемалармен түсіндіріледі. Қазіргі уақытта деректерді беру үшін кеңінен қолданылатын радиожиілік жолағы шамадан тыс жүктелген және жылдам өсіп келе жатқан трафикті және сымсыз деректер қызметтеріне сұранысты қанағаттандыра алмайды. Оптикалық диапазонды пайдалануға негізделген сымсыз жүйелерді қосымша енгізу бар мәселелерді шешуге көмектеседі. Көрінетін жарық байланысы оптикалық сымсыз байланыстың құрамдас бөлігі ретінде желідегі деректерді беру жылдамдығына қойылатын талаптарды жүзеге асыруға және қолданыстағы сымсыз желілердің өткізу қабілетіне жүктемені азайтуға мүмкіндік береді. Мақалада сымсыз оптикалық байланыс желісіндегі модуляция әдістері талқыланады. Жүйе өнімділігі үшін маңызды модуляция сипаттамалары зерттеледі. Импульстік модуляция түрлері үшін берілген сигнал-шұыл қатынасы бар уақыттық толқын пішіндерін алу үшін қуат спектрінің тығыздығы есептеледі және зерттеледі. Қосымша ақ гаусс шуы болған кезде ООС-NRZ үшін идеалды жіберу және қабылдау жүйесінің моделі құрастырылған, ол ішкі көрінетін жарықты деректерді беру жүйелеріне жарамды. Сигналдардың пішіндері және аспаптық және сыртқы шудың әсері зерттеледі. Эксперименттік деректер негізінде бит қателік ықтималдығының есептелген мәндері берілген. Ұсынылған имитациялық модель жарық беру жүйесіндегі нақты қабылдағыш құрылғыларды жобалауда қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: модуляция әдісі; оптикалық арна; көрінетін жарық байланысы; деректерді беру; сымсыз жүйе; симуляциялық модель.

Аннотация. Появление новых направлений на основе оптического диапазона в сфере связи объясняется существующими проблемами в организации современной беспроводной инфраструктуры. В настоящее время полоса радиочастот, широко используемая для передачи данных, перегружена и не может удовлетворить быстро растущий трафик и спрос на услуги беспроводной передачи данных. Дополнительное внедрение беспроводных систем, основанных на использовании оптического диапазона, может помочь в решении существующих проблем. Связь по видимому свету, как неотъемлемая часть оптической беспроводной связи, способна реализовать требования к скорости передачи данных в сети, и снизить нагрузку на пропускную способность уже существующих беспроводных сетей. В статье рассмотрены методы модуляции в беспроводной оптической сети связи. Изучены модуляционные характеристики имеющие важное значение

для производительности системы. Для типов импульсной модуляции рассчитана и исследована спектральная плотность мощности для получения временных форм сигнала с заданным отношением сигнал/шум. Построена модель идеальной системы приема-передачи для OOK-NRZ в присутствии аддитивного белого гауссовского шума, которая подходит для систем передачи данных по видимому свету внутри помещений. Исследованы формы сигналов и влияние инструментальных и внешних шумов. Приведены расчетные значения вероятности битовой ошибки по экспериментальным данным. Предлагаемая имитационная модель может быть использована при проектировании реальных приемопередающих устройств в системе связи по видимому свету.

Ключевые слова: метод модуляции; оптический канал; связь по видимому свету; передача данных; беспроводная система; имитационная модель.

Abstract. The emergence of new directions based on the optical range in the field of communications is explained by existing problems in organizing modern wireless infrastructure. Currently, the radio frequency band widely used for data transmission is overloaded and cannot meet the rapidly growing traffic and demand for wireless data services. Additional implementation of wireless systems based on the use of optical range can help solve existing problems. Visible light communication, as an integral part of optical wireless communication, can realize the requirements for data transmission speed in the network, and reduce the load on the bandwidth of existing wireless networks. The article discusses modulation methods in a wireless optical communication network. Modulation characteristics that are important for system performance are studied. For types of pulse modulation, the power spectral density is calculated and studied to obtain time waveforms with a given signal-to-noise ratio. A model of an ideal transmission and reception system for OOK-NRZ in the presence of additive white Gaussian noise is constructed, which is suitable for indoor visible light data transmission systems. Signal shapes and the influence of instrumental and external noise were studied. Calculated values of the bit error probability based on experimental data are given. The proposed simulation model can be used in the design of real transmitting and receiving devices for a visible light communication system.

Keywords: modulation method; optical channel; visible light communication; data transfer; wireless system; simulation model.

Кіріспе. Соңғы бірнеше жылда көрінетін жарық коммуникациялары мен жарықтандыру үшін де, деректерді беру үшін де жарық диодтарын пайдалану идеясын зерттеудің өсуі байқалды. Бұл технология Visible Light Communication (VLC) деп аталады. Бұл технологияның негізгі драйверлері қатты күйдегі жарықтандырудың танымалдылығы, дәстүрлі жасанды жарық көздерімен салыстырғанда жоғары жарықтығы бар жарықдиодты шамдардың қызмет ету мерзімі, жоғары деректерді өткізу жылдамдығы, деректер қауіпсіздігі, денсаулыққа қауіпті және энергияны аз тұтыну. VLC ұсынатын қосарлы функционалдылық (яғни, жарықтандыру және бірдей жарық диодты шамдар арқылы деректерді беру) бірқатар қызықты қолданбаларды, соның ішінде үй желісін, кеңселердегі жарықтандыру инфрақұрылымы арқылы жоғары жылдамдықты деректерді беруді, көліктен көлікке байланыс орнатуды қамтамасыз етті. Ұшақ кабиналары, пойыздардағы деректер байланысы, бағдаршамды басқару және көлік коммуникациялары, бірнеше атауға болады. Бүгінгі күні жарықдиодты шамдар ұсынатын энергия тиімділігі мен сенімділік деңгейі жарықтандыру үшін қолданылатын дәстүрлі қыздыру шамдарынан әлдеқайда асып түседі. VLC-дегі соңғы зерттеулер кеңседегі және үйдегі қысқа қосылымдар арқылы 500 Мбит/с асатын деректерді беру жылдамдығын сәтті көрсетті. Әрі қарайғы зерттеулер мен әзірлемелер заманауи инфрақызыл, радио-микротолқынды байланыс жүйелерімен және жарықтандыру технологияларымен байланысты кейбір мәселелерді ішінара шешуге жана мүмкіндіктер ашады.

Бұл жұмыс процесті басқару жүйелерінде көрінетін жарыққа негізделген сымсыз оптикалық байланыс технологиясын пайдалану мүмкіндігін қарастырады. Бұл саладағы зерттеулерге жеткіліксіз көңіл бөлінді жоғары жылдамдықты қамтамасыз ете отырып, әртүрлі форматтағы және үлкен көлемдегі деректерді беру үшін.

Кез келген байланыс жүйесін жобалау кезінде модуляция әдісін таңдау принципті болып табылады. Талдау жүргізілетін және модуляция әдістері бағаланатын критерийлерді

анықтау қажет. Оптикалық сымсыз арна үшін біз ең маңызды критерийлерді анықтадық – энергия тиімділігі, өткізу қабілеттілігінің тиімділігі және тасымалдау сенімділігі (Ahmad R., Srivastava A., Selmy H, 2018; Yu T.-C., Huang W.-T., Lee W.-B., Chow C.-W., Chang S.-W., Kuo H.-C., 2018; Yu T.-C., Huang W.-T., Lee W.-B., Chow C.-W., Chang S.-W., Kuo H., 2021; Vappangi, S., Venkata Mani, V., & Sellathurai, M., 2021).

1) Энергия тиімділігі. Көз қауіпсіздігі стандарттарына сәйкес оптикалық сымсыз таратқыш шығаратын орташа оптикалық қуат шектеулі. Сонымен қатар, аккумулятормен жұмыс істейтін портативті жабдықта қуат тұтынуды минималды деңгейде ұстаған жөн, бұл оптикалық тарату қуатына да шектеулер қояды. Сондықтан ішкі оптикалық сымсыз байланыс жүйелері үшін қолайлы модуляция әдістерін бағалаудың ең маңызды критерийі энергия тиімділігі болып табылады. Әрбір модуляция схемасы белгілі бір орташа оптикалық қуатты ұсынады. Сондықтан олар әдетте қалаған бит қателік жылдамдығына (BER) және сигнал-шуыл қатынасына (SNR) қол жеткізу үшін қажетті орташа оптикалық қуат тұрғысынан салыстырылады.

2) Өткізу қабілетінің тиімділігі. Теориялық тұрғыдан оптикалық тасымалдаушыны «шексіз өткізу қабілеттілігі» бар деп санауға болады. Дегенмен, фотодетектор аймағы және арна сыйымдылығы сияқты жүйе құрамдастары байланыс жүйесіне іс жүзінде қол жетімді өткізу қабілетінің көлемін бұрмалаусыз шектейді. Оптикалық сигналдың диффузиялық арнада (атмосфералық ауа) және көрінбейтін (NLOS) кейінгі көп жолды таралуы да қолжетімді арна өткізу қабілеттілігін шектейді.

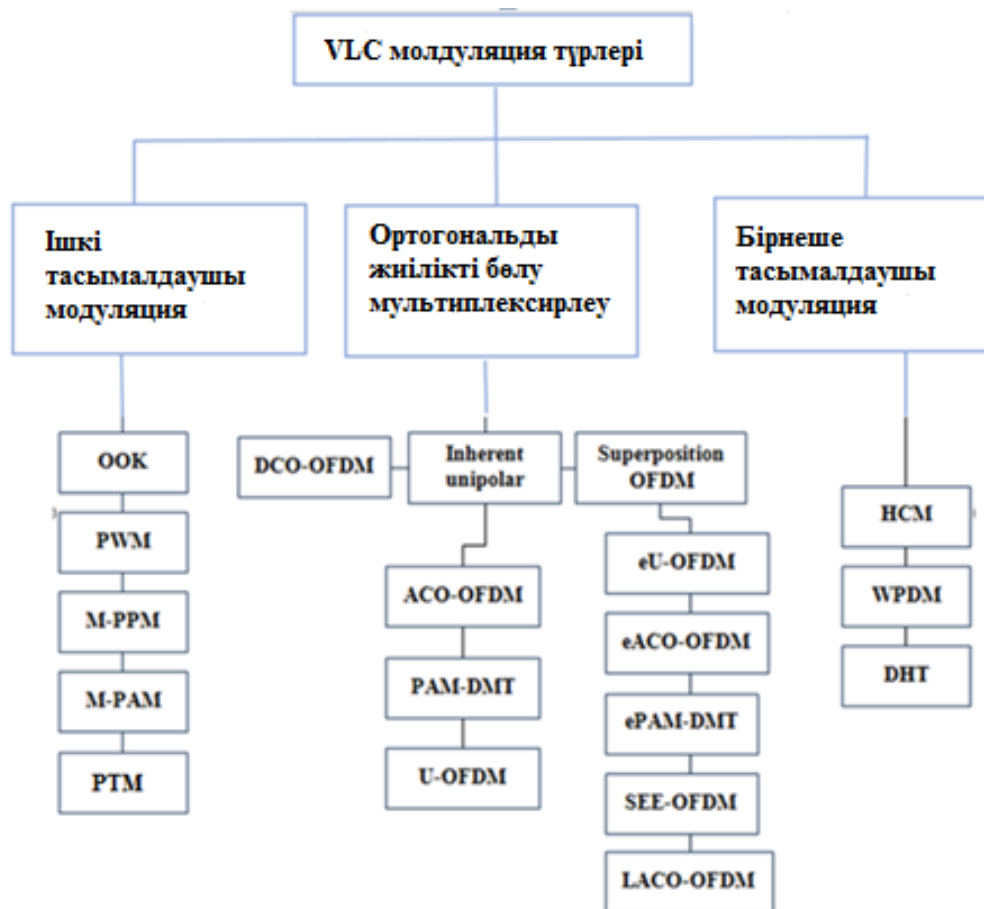
Өткізу қабілетінің тиімділігі бит жылдамдығының таратқыштың өткізу қабілетіне қатынасы ретінде анықталады.

Түсірілім шуы басым шуыл көзі болған кезде, нәтижесінде сигнал-шу арасындағы қатынас фотодетектордың бетінің ауданына пропорционал болады. Демек, бір элементті қабылдағыштар үлкен аумақты фотодетекторларды пайдалануды жөн көреді. Дегенмен, үлкен аумақты фотодетекторлармен байланысты жоғары сыйымдылық қабылдағыштың өткізу қабілетін шектейді. Бұған қоса, көп бағытты көру сызығы және диффузиялық арна конфигурациялары үшін арна өткізу қабілеті көп жолды таратумен шектеледі. Демек, үлкен өткізу қабілеттілігін қажет ететін модуляция схемалары таңба аралық кедергіге (ISI) көбірек сезімтал, сондықтан қуаттың жоғары жоғалуына әкеледі. Осылайша, модуляция әдістерін бағалаудың екінші маңызды критерийі өткізу қабілеттілігінің тиімділігі болып табылады.

3) Беріліс сенімділігі. Модуляция әдісі қолайсыз жағдайларда ең аз рұқсат етілген қателік жылдамдығын қамтамасыз етуі керек және сонымен қатар деректер сигналының тұрақты құрамдас бөлігінің көпжолды таралуынан және вариациялардан туындаған таңбааралық кедергілерге төзімді болуы керек. 0-ден 1-ге өтудің ұзақ уақыт болмауы қиындық тудыруы мүмкін, себебі сандық фазалық құлыпталған цикл арқылы тактілік жиілікті қалпына келтіру ықтималдылығы болмауы мүмкін. Сонымен қатар, жоғары деңгейлі бірнеше ретті импульстерден аулақ болу керек, себебі алынған сигнал қабылдағыштағы жоғары жиілікті сүзгі арқылы бұрмаланады. Сонымен қатар, модуляция әдісі сигнал қуатының өзгеруіне байланысты тактілік сигналдың жалған фазалық модуляциясы, диффузиялық құрамдастың үлкен уақыт тұрақтысы есебінен импульстің ұзаруы және сигналға байланысты импульстің бұрмалануы сияқты бірқатар факторларға төзімді болуы керек.

Оптикалық арна радиожиілік арналарынан айтарлықтай ерекшеленеді. Зерттеудің мақсаты басқару жүйелері үшін көрінетін жарық арқылы сымсыз арналарда модуляция әдісін таңдау болып табылады. Біз атап өткен критерийлер бойынша ең танымал болып табылатын бірнеше модуляция әдістерін қарастырайық: энергия тиімділігі, өткізу қабілеттілігі тиімділігі және сенімділік.

Әдебиеттерге шолу: VLC жүйелеріндегі модуляция схемалары оптикалық арналардың модуляция схемаларынан ерекшеленеді. 1-сурет VLC технологиясына қолданылатын модуляция әдістерін көрсетеді (<http://tadviser.com/index.php>)



1-сурет. VLC технологиясының модуляция әдістерінің классификациясы

Ескерту – автормен құрастырылған

Басқару жүйелерінде деректерді беру үшін жарық диодтарын пайдалануды ұсынамыз. Сондықтан таңдалған модуляция әдісі іске асыру үшін жеткілікті қарапайым болуы қажет. Жоғары қуат пен өткізу қабілеттілігінің тиімділігіне қол жеткізудің мағынасы жоқ, егер дизайн іске асыру соншалықты күрделі болса, оны жүзеге асыру мүмкін емес. Модуляция әдісін таңдауды бағалаудың тағы бір факторы – жасанды сыртқы жарық көздерінің кедергілерін басу мүмкіндігі. Сыртқы жарықтың қуат деңгейін төмендетудің ең қарапайым жолы – электрлік жоғары жиілікті сүзгілеу.

Сондай-ақ дизайн көп жолды таралу нәтижесінде пайда болатын таңбааралық кедергіге (ISI) төзімді болуы қажет (Chowdhury M., Hossain M., Islam A., Jang Y, 2018; Olanrewaju H.G., Thompson J. Popoola W, 2018). Қарқынды модуляцияны тікелей анықтайтын ішкі оптикалық сымсыз арна үшін қолайлы модуляция әдістерін үш негізгі топқа топтастыруға болады: ішкі тасымалдаушы модуляция (SCM), ортогональды жиілікті бөлу мультиплексірлеу (OFDM), мультитасымалдаушы модуляция (MCM)[7, 8]. OFDM модуляциясы деректерді жарық ағыны бойымен тасымалдау үшін жақсы өнімділікке ие,

бірақ оны жүзеге асыру қиын және техникалық қымбат. Бұл модуляция көбінесе екі бағытты ағын бойынша деректерді беруді ұйымдастыру туралы мақалаларда қарастырылады (Aziz A.F., Aly O.A.M., Mohammed U.S., 2019; Palacios P., Azurdia-Meza C.A., Roman Cañizares M., Montejo Sánchez S, 2020; Selvendran S., Sivanantha Raja A., Esakki Muthu K., Lakshmi A., 2019) Бірнеше ішкі тасымалдаушылары бар модуляция зерттелуде (Yang Y., Zeng Z., Cheng J., Guo C., Feng C., 2019)

Ішкі тасымалдаушы модуляциясы базалық жолаққа кіреді. Бұл модуляцияның артықшылығы – деректерді беру және оны жүзеге асыру сенімділігі. Қосу/өшіру модуляциясы (ООС) және импульстік уақыт модуляциясы (РТМ) әдістерін қоса алғанда, бірақ олармен шектелмейтін негізгі жолақ схемалары көп жолды әсерлерге төзімдірек.

ООК-NRZ модуляциясы ғылыми еңбектерде көрсетілген модуляцияланған жарық арналарын талдауға байланысты қызығушылық тудырады. 1-кестеде қосу/өшіру нөлге қайтару модуляциясы әдісімен люминофорлық жарықдиодты пайдаланып алынған VLC жүйесінің өнімділігі көрсетілген.

1-кесте. VLC жүйелерінің өнімділігі

LED түрі	Модуляция схемасы	Модуляция өткізу қабілеттілігі	Деректерді тасымалдау жылдамдығы
Люминофорлы жарық диодтары	ООК-NRZ	50 МГц	100 Мбит/с (BER < 10 ⁻⁹) [17]
Люминофорлы жарық диодтары	ООК-NRZ	50 МГц	230 Мбит/с (BER < 10 ⁻³) [18]
Люминофорлы жарық диодтары	ООК-NRZ	50 МГц	80 Мбит/с (BER < 10 ⁻⁶) [19]
Люминофорлы жарық диодтары	ООК-NRZ	50 МГц	250 Мбит/с (BER < 10 ⁻⁹) [20]
<i>Ескерту – автормен құрастырылған</i>			

Бұл зерттеуде бастапқы деректерді бұрмаламай ақпаратты берудің дәлдігін арттыру басымдылық көрсеткіші болып табылады; 50 МГц өткізу қабілеттілігі сигнал сапасын төмендетпей жарық ағыны бойынша деректерді беруді ұйымдастыру үшін жеткілікті. Тасымалдау жылдамдығы 250 Мбит/с шегінде. Техникалық жүйелерді басқаруды ұйымдастыру үшін бұл параметр негізгі емес, бірақ ол міндетке жауап береді. Кестеде көрсетілген бит қателерінің жылдамдығы ITU-TG.821 және G.826 ұсыныстарына сәйкес келетінін атап өткен жөн.

Материалдар мен зерттеу әдістері. Тікелей анықтауы бар қарқынды модуляция (IM/DD) көбінесе қарапайым ООК модуляциясымен біріктірілед (Kurniawan P., Sujatmoko K., Pamukt B., 2019; Dwivedy P., Dixit V., Kumar A., 2023; Baklanov A., Grigoryeva S., Alimkhanova A., Grigoryev E., Sayun V., 2019; Grigoryeva S., Grigoryev Ye., Sayun V., Baklanov A., Alimkhanova A., 2020)

Ақпаратты беру кезінде бір разряд бит ұзақтығының барлығын немесе бір бөлігін құрайтын кернеуі 5 В болатын оптикалық импульспен беріледі, ал нөлдік бит 0 В кернеуі бар оптикалық импульспен беріледі. Диаграммада көрсетілген. берудің екі түрі: нөлге қайтарумен (RZ) және нөлге қайтарусыз (NRZ). Екі түрін де қарастырамыз NRZ схемаларында ұзақтығы бит ұзақтығына тең оптикалық импульс 1-ді көрсету үшін беріледі, ал RZ схемасында импульс тек ішінара бит ұзақтығын алады.

1 және 2 формулалар ООК-NRZ және ООК-RZ спектрлік тығыздықтарын сипаттайды

($\gamma=0,5$) бір және нөл тәуелсіз және тең таралған деп есептелетін жағдайлар үшін. (Найкин С., Моер М., 2010)

$$S_{OOK-NRZ}(f) = (P_r R)^2 T_b \left(\frac{\sin \pi f T_b}{\pi f T_b} \right)^2 \left[1 + \frac{1}{T_b} \delta(f) \right] \quad (1)$$

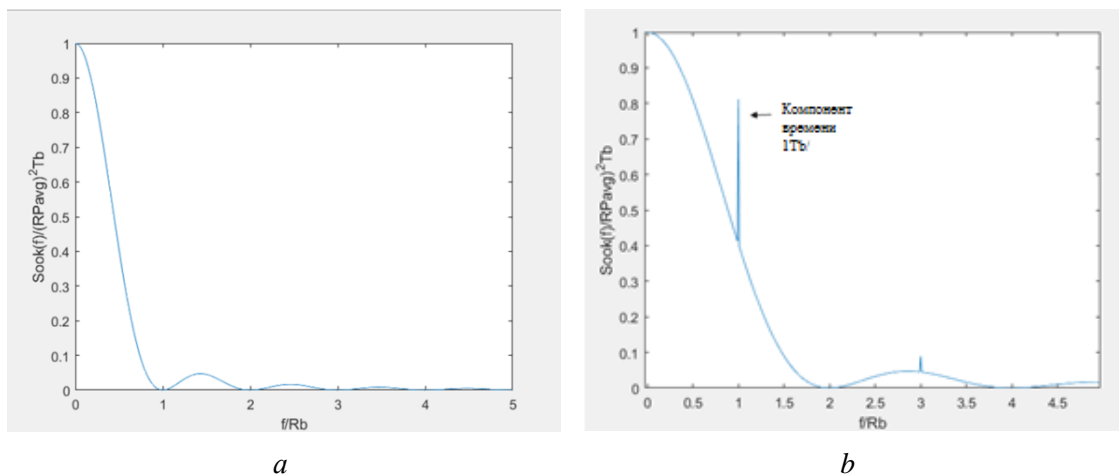
$$S_{OOK-RZ(\gamma=0.5)}(f) = (P_r R)^2 T_b \left(\frac{\sin(\pi f T_b / 2)}{\pi f T_b / 2} \right)^2 \left[1 + \frac{1}{T_b} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(f - \frac{n}{T_b}\right) \right] \quad (2)$$

мұндағы: P_r – орташа қуат; R – фотодетектордың сезімталдығы; T_b – бит ұзақтығы; $\delta(t)$ – Дирак дельта функциясы; f – жиілік импульсі.

ООК-NRZ және ООК-RZ үшін электр қуатының спектрлік тығыздығы MATLAB жүйесінде жүзеге асырылады (1-сурет).

Қуат осі орташа электр қуатының разряд ұзақтығына $(PrR)^2 T_b$, ал жиілік осі разряд жылдамдығына ($R_b = 1/T_b$) нормаланады. Екі қисық бірдей орташа оптикалық P_r қуатын пайдаланып салынған.

Импульстік базалық жолақ сигналдары әдетте жоғары жиіліктерге бармайды және олардың спектрлері нөлге, яғни тұрақты токқа бағытталған. Мұнда спектр жиілік диапазонын 0 Гц (DC) бастап қуат нөлге дейін төмендейтін бірінші нүктеге дейін қамтиды. Күтілгендей, ООК-RZ ($\gamma = 0,5$) ООК-NRZ өткізу қабілеттілігінен екі есе артық, өйткені импульстік ені екі есе кең. ООК-NRZ және ООК-RZ екеуі де ($\gamma = 0,5$) Pr^2 салмағы бар тұрақты ток кезінде дискретті мәндері бар қатарлы мүшелер бар. Жиілік импульсі бит жылдамдығына тең $f = R_b$ және оны ООК-NRZ қабылдағышындағы импульстік сигналды қайта құру үшін пайдалануға болады.



1-сурет. Электр энергиясының спектрлік тығыздықтары: а – ООК-NRZ, б – ООК-RZ ($\gamma = 0,5$)
Ескерту – автормен құрастырылған

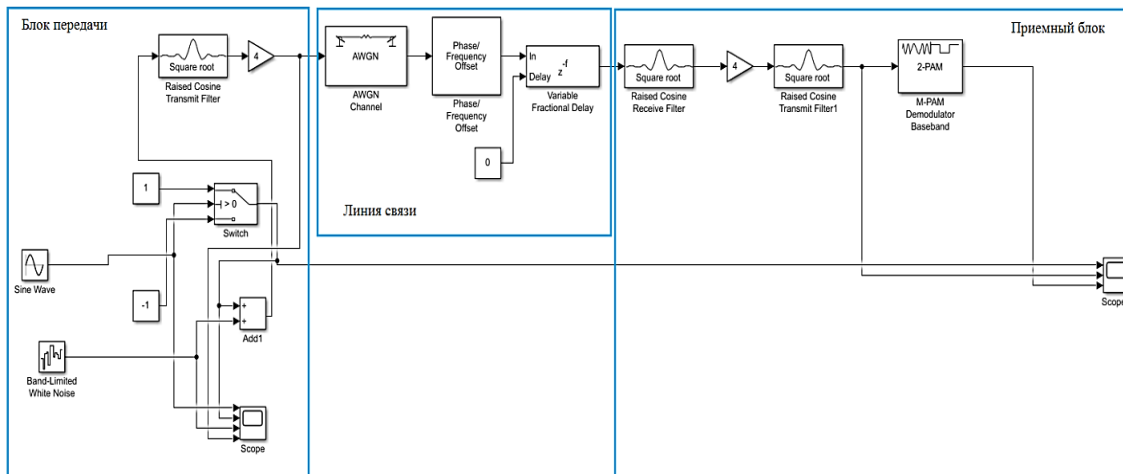
ООК-NRZ және ООК-RZ тұрақты ток пен төмен жиілікте айтарлықтай энергия тұтынуға ие. Бұл сипаттама қоршаған ортаның жасанды жарық көздерінің кедергісін азайтуда электрлік жоғары жиілікті сүзгілеудің тиімсіз екенін білдіреді, себебі жоғары кесу жиіліктерін негізгі сызықтың айтарлықтай ауытқуынсыз пайдалану мүмкін емес. Екі қисық астындағы аудандарды салыстыра отырып, берілген орташа оптикалық тарату қуаты үшін ООК-RZ ($\gamma=0,5$) ООК-NRZ екі есе электр қуатына ие.

ООК-NRZ энергия тиімділігі η_p 1-ге тең және өткізу қабілеттілігі η_B 1-ге тең. Егер

OOK-RZ нөлдік модуляцияны қарастырсақ, онда энергия тиімділігі η 1-ге және өткізу қабілеттілігі η_B -ге тең. 2. Амплитудалық модуляцияның екі қарапайым түрі үшін OOK-RZ және OOK-NRZ бір бит беру үшін бірдей энергия тиімділігі бар OOK-RZ өткізу қабілеттілігі екі есе үлкен болады. Өткізу қабілеттілігі жұмыс цикліне байланысты, себебі ол сигнал спектрінің мақсаттылығына тікелей әсер етеді. Сондықтан өткізу қабілеттілігінің тиімділік коэффициенті OOK-NRZ үшін жоғарырақ. Сонымен қатар, RZ қабылдағыштың сағатын қайта өзгертуде қиындықтарға тап болады, бұл сигнал ұзақ уақыт бойы нөлдік деңгейде қалып қоятын жағдайларды жасайды, өткізу қабілеттілігінің тиімділігін одан әрі төмендетеді.

Алынған есептеу деректеріне сүйене отырып, сымсыз оптикалық желілер арқылы трансивер жолының үлгісін құру үшін OOK-NRZ модуляциясын таңдаймыз. Аддитивті ақ Гаусс шуы болған кезде OOK-NRZ үшін идеалды максималды ықтималды жіберу-қабылдау жүйесін құрастырайық.

Нәтижелер және оларды талқылау. 2-суретте MATLAB қолданбалы пакетінің көмегімен жасалған модельдеу моделі көрсетілген. Схема өзара байланысты үш функционалды блокты қамтиды: таратқыш, байланыс арнасы және қабылдағыш. Қабылдау-беру жүйесін модельдеу кезіндегі көзқарасымыздың айырмашылығын көрсету үшін блоктардың әрқайсысына тоқталып, оларды толығырақ сипаттайық.



2-сурет. Аддитивті ақ гаусс шуы болғандағы OOK-NRZ функционалды диаграммасы
Ескерту – автормен құрастырылған

Жүйе таратқышының кірісіне амплитудасы 5В синусоидалы сигнал береміз.

2-суретте көрсетілген схемада модуляторды OOK-NRZ схемасы бойынша құрастырамыз. Модулятор тізбегінде қосу/өшіру қосқышы (Switch) пайдаланылады, жоғарғы деңгей үшін екі тұрақты +1 және төменгі үшін -1, 1 және 3 кірістерге (деректер порттары) беріледі, ал 2 басқару кірісіне синусоидалы сигнал беріледі. Кілттің шығысында NRZ сигналын байқауға болады (3, б-сурет).

Аспаптық шуды имитациялау үшін ақ шу блогы (Band-LimitedWhiteNoise) таңдалды, онда шу қуаты $1 \cdot 10^{-6}$ Вт етіп орнатылған.

Импульстік сигналға аспаптық шуды қою үшін жинақтау блогы (Add1) қолданылады.

Таратқыштың бұрмалануын азайту үшін Көтерілген косинус сүзгісі қолданылады; Косинус сүзгісінің импульстік реакциясы шексіз. Таратқышта орнатылған сүзгінің бір бит Тб созылатын бірлік амплитудасының $p(t)$ тік бұрышты импульстік реакциясы бар екенін

түсіндірейік. Модуляцияға дейінгі таратқыштың шығыс сигналы 2Pr фотодетекторымен жазылған оптикалық сигналдың қуатымен анықталады. Тасымалданатын сигналға тәуелсіз кездейсоқ процесс қосылады, ол екі жақты қуат спектрлік тығыздығы $N_0/2$ ақ Гаусс шуы ретінде модельденеді.

$$\frac{N_0}{2} = qI_B \quad (3)$$

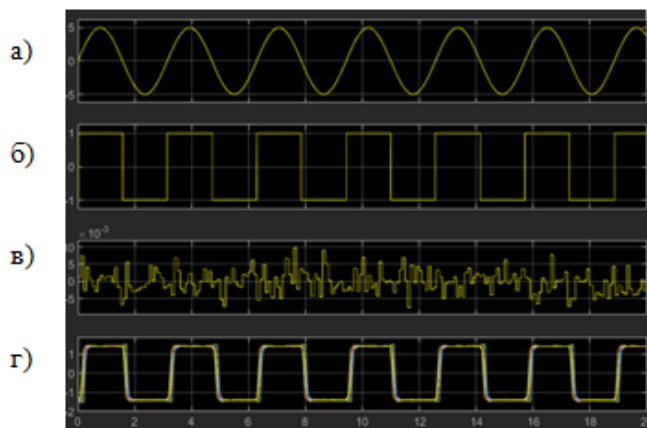
мұндағы q – электрон заряды; I_B – фон жарығы тудыратын орташа фототок.

Сәйкес келетін сүзгі кірісін келесідей модельдеуге болады:

$$i(t) = \begin{cases} I_p + n(t) & \text{для } a_i = 1 \\ n(t) & \text{для } a_i = 0 \end{cases} \quad (4)$$

мұндағы $n(t) \sim N(0, \sigma^2)$ – екі жақты қуаттылық спектрлік тығыздығы $N_0/2$, орташа нөлдік және дисперсиясы σ^2 болатын сыртқы жарық әсерінен болатын қосымша ақ Гаусс шуы, ал I_p – ең жоғары фототок.

Сүзгі шығысындағы таратқыш тізбегімен күшейтілген сигнал амплитудасы өте аз, сондықтан күшейткіш қондырғыны орнату қажет. 3, а-суретте кіріс синусоидалы сигнал көрсетілген. Модулятордан кейінгі сигнал 3, б-суретте көрсетілген, содан кейін схема бойынша аспаптық шу 3, в-суретте көрсетілген кіріс сигналының үстіне қойылды. Таратқыштағы сүзгіден кейін алынған сигнал 3, d суретте көрсетілген.



3-сурет. Уақыт доменінің толқын пішіндері: а – енгізусигнал; б – модулятордан кейінгі сигнал; в – аспаптық шудың сигналы; d – таратқыш сүзгіден кейінгі сигнал

Ескерту – автормен құрастырылған

MATLAB жүйесіндегі деректер сілтемесіндегі радиооптикалық шуды дұрыс модельдеу үшін AWGN блогы қосылады. Ақ Гаусс шуы жиілік спектрі бойынша біркелкі таралады және барлық жиіліктерде бірдей қуат спектрлік тығыздығына ие. Бұл шу сыртқы факторлардың әсерін имитациялайтын және сәйкесінше радиоарнадағы шудың нақты әрекетін көрсететін ақпараттық сигналға сызықты түрде қосылады.

Сондай-ақ, AWGNB блогының дұрыс жұмыс істеуі үшін біз тізбекке фаза мен жиілікті ауыстыру блогын (фаза/жиілік) енгіздік. Біз бұл блоктың параметрлерін нөлге қоямыз, өйткені бұл жобада біз фаза мен жиілікті ескермейміз.

Ақпаратты беру сапасын жақсарту үшін схемада уақытты кідірту блогы (Variable Fractional Delay) қолданылады. Бұл блок диапазоннан тыс сигналдарды сүзу және басу арқылы сигнал-шу қатынасын жақсартады. Бұл сигнал мен кедергі арасындағы тепе-

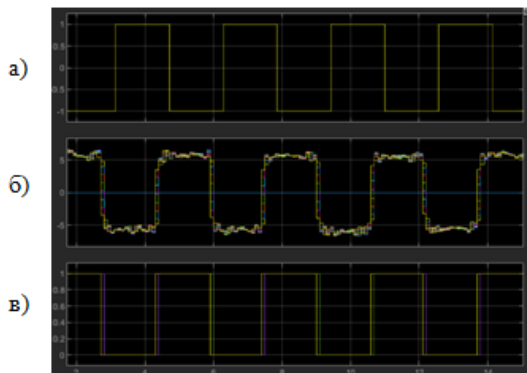
теңдікті қамтамасыз етеді.

Қабылдағыш бөлімі симуляцияланған тізбектің сигнал спектрін тегістеу үшін косинусты күшейтетін сүзгіні пайдаланады. Бұл сүзгі спектрлік тиімділікті жақсартады және таңба аралық кедергіні (ISI) азайтады.

Тізбектің келесі блогында М-импульстік демодулятор (М-РАМ) қолданылады. Демодулятор импульстік амплитудалық модуляция арқылы модуляцияланған жіберілген сигналды қалпына келтіреді.

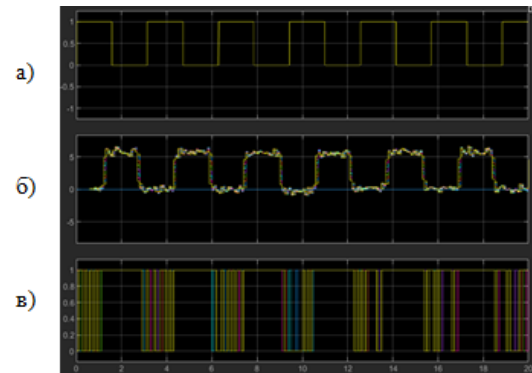
Схема екі сүзгіні пайдаланады. Бірінші сүзгі қабылданған сигнал қуатын стандартты мәнге дейін қалыпқа келтіреді. Екінші сүзгі сигналды байланыс арнасы бойынша беруге дайындайды, яғни оны дискретті түрге түрлендіреді. Символаралық кедергіні басу үшін ақырғы импульстік жауап косинус сүзгісі де қолданылады.

4 және 5-суреттерде сәйкесінше NRZ коды қосылған және NRZ жоқ ООС модуляциясы бар қабылдау құрылғысының шығысындағы осциллограммалар көрсетілген. Екі осциллограмманы салыстыра отырып, сіз NRZ кодын қоспасаңыз, шығыс сигналы шумен бітеліп қалатынын көруге болады.



4-сурет. ООС-NRZ бар қабылдау құрылғысының шығысындағы осциллограмма: а – модулятордан сигнал; б – фильтрден кейінгі сигнал; с – шығыс сигналы

Ескерту – автормен құрастырылған



5-сурет. ООС-RZ бар қабылдау құрылғысының шығысынан осциллограмма: а – модулятордан сигнал; б – фильтрден кейінгі сигнал; с – шығыс сигналы

Ескерту – автормен құрастырылған

Біз идеалды жіберуші және қабылдаушы жүйенің жағдайын қарастырдық.

Нақты беріліс жүйесін жобалау үшін жіберу қателерінің ықтималдықтарын ескеру қажет. Егер қабылданған сигнал шекті деңгейден жоғары болса, «1» цифрлық белгісі, ал басқа жағдайда «0» қабылданған болып саналады.

Сондықтан қателік ықтималдығы былай беріледі

$$P_e = p(0) \int_{i_{th}}^{\infty} p(i/0) di + p(1) \int_0^{i_{th}} p(1) di \quad (5)$$

мұндағы i – шекті сигнал деңгейі; $p(0)$ және $p(1)$ – «нөл» және «бір» ықтималдықтары, ал шекті ықтималдықтар келесідей анықталады:

$$p(i/1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(\frac{-(i)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

$$p(i/1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(\frac{-(i-I_p)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

Бірдей ықтималды белгілер үшін $p(0) = p(1) = 0,5$, сондықтан оңтайлы шекті нүкте i_{th}

= 0,5 I_p , ал шартты қате ықтималдығы төмендейді.

$$P_e = Q\left(\frac{I_{th}}{\sigma}\right) \quad (8)$$

Мұнда Гаусс құйрығы астындағы аудан болып табылатын Маркумның Q-функциясы берілген

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\alpha^2/2} d\alpha \quad (9)$$

OWC байланысының өнімділігіне шу көздері, сондай-ақ байланыс байланысында туындаған жиілік пен бұрмалану әсер етеді. Сонымен қатар, тарату арнасына қабылдағыштың электронды жабдығының шуы және қабылданған фототокпен индукцияланған атыс шуы әсер етеді. Бұл шулар қабылдағыш кірісіндегі шудың ең басым көздері болып табылады. Байланыс арнасында пайда болатын кедергілерді басу үшін сәйкес сүзгі қолданылады.

OOK-NRZ сигналы кез келген кедергілерді елемей, амплитудасы $1/$ және ұзақтығы T_b болатын тік бұрышты импульстік жауапқа ие. $\sqrt{T_b}$

Сәйкес сүзгі үшін сүзгі шығысындағы шу үлгілерінің дисперсиясы тек кіріс шуының қуат спектрлік тығыздығына және сәйкес келетін сүзгінің импульстік реакциясының энергиясына байланысты болады. Осылайша, егер кіріс $N_0/2$ екі жақты спектрлік қуат тығыздығы бар AWGN болса, сәйкес келетін сүзгі шығысындағы шу дисперсиясы мына түрде беріледі:

$$\sigma^2 = \frac{N_0}{2} \int_{t=0}^{T_b} r^2(t) dt \quad (10)$$

Демек, стандартты ауытқу σ болады

$$\sigma = \sqrt{\frac{N_0 E_p}{2}} \quad (11)$$

Демек, (5), (9) және (11) қосу, яғни E_p -ді I_p -ге және σ -ге ауыстыру, береді $\sqrt{(N_0 E_p) / 2}$.

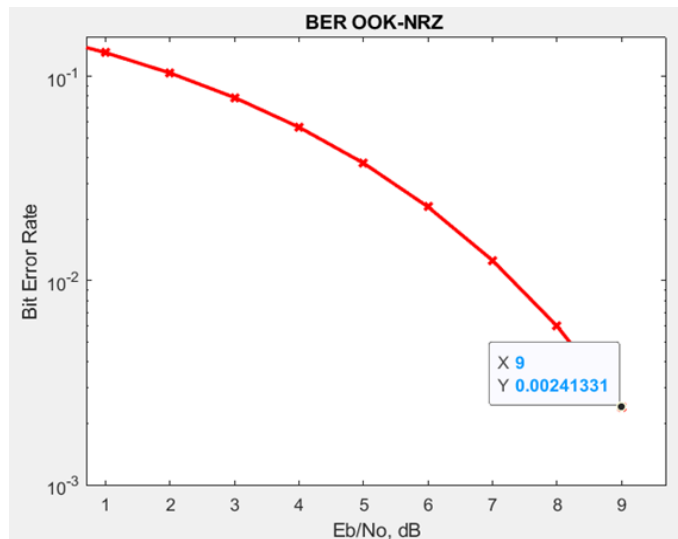
$$P_{e_bit_OOK} = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (12)$$

мұндағы орташа энергия бір бит E_b арқылы берілген

$$E_b = \frac{E_p}{2} = 2(RP_r)^2 T_b \quad (13)$$

Бит қателігінің ықтималдығы 12 формула арқылы есептелді. Модельдеу нәтижесінде алынған параметр мәндері көрсетілді. Есептелген көрсеткіштер негізінде OOK-NRZ үшін бит қателік ықтималдығының E_b/N_0 тәуелділігінің графигі тұрғызылды. График (6-сурет) E_b/N_0 9,8 дБ тең болғанда қателік деңгейі 10⁻³ болатынын көрсетеді.

Осылайша, біз ұсынатын модельдеу моделі көрсетілген талаптарды қанағаттандырады және VLC технологиясын қолданатын нақты қабылдағыш құрылғыларды жобалауда қолдануға болады.



6-сурет. OOK-NRZ үшін бит қателік жылдамдығының графигі

Ескерту – автормен құрастырылған

Қорытынды. Екі OOK модуляциясының кодтау схемаларына салыстырмалы талдау жүргізілді. Есептеу нәтижелері бір бит беру үшін бірдей энергия тиімділігі мәнімен OOK-RZ өткізу қабілеттілігі OOK-NRZ өткізу қабілетінен екі есе үлкен болатынын көрсетті. Өткізу қабілетінің тиімділігі жұмыс цикліне байланысты. Тиісінше, өткізу қабілеттілігінің тиімділігі OOK-NRZ үшін жоғарырақ. Оған қоса, RZ ресиверде сағатты қалпына келтіруді қолдамайды, себебі ол 0-ден 1-ге дейін ауыспай ұзақ төмен сигналға мүмкіндік береді және өткізу қабілеттілігінің тиімділігін одан әрі төмендетеді.

MATLAB бағдарламасында сымсыз оптикалық желі арқылы OOK модуляция беру арнасының имитациялық моделі құрастырылған. Модулятор блогы NRZ сызықтық кодтамасы бар OOK модуляция схемасына салынған. Сымсыз оптикалық желі арқылы трансивер жолының үлгісінде OOK-NRZ модулятор блогын пайдалану жаңа. Модельдеу нәтижелері уақыт кідірісі бар таратқыш және қабылдау блоктарынан бірдей толқын пішіндерін көрсетті. Бұл ұсынылған модельдеу моделінің сәйкестігін растайды.

Модельдің сенімділігі жіберу қатесінің ықтималдығының есептеулерімен расталады. Есептелген деректер негізінде OOK-NRZ үшін E_b/N_0 қателік ықтималдығының тәуелділігінің графигі тұрғызылды. График E_b/N_0 9,8 дБ тең болғанда қате жылдамдығы 10^{-3} болатынын көрсетеді, яғни әрбір 1000-нан 1 бит қате болады.

Әдебиеттер тізімі

- Ahmad R., Srivastava A., Selmy H. Advanced Modulation Techniques for Low PAPR in VLC System // 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Bucharest, Romania. – 2018. doi: 10.1109/ICTON.2018.8473679.
- Yu T.-C., Huang W.-T., Lee W.-B., Chow C.-W., Chang S.-W., Kuo H.-C. Visible Light Communication System Technology Review: Devices, Architectures, and Applications // Crystals. – 2021, 11, 1098. <https://doi.org/10.3390/cryst11091098>
- Vappangi, S., Venkata Mani, V., & Sellathurai, M. (2021). Visible Light Communication: Comprehensive Theory and Applications with MATLAB® (1st ed.). CRC Press. – 2021. – P. 520.
- Internet of Things, IoT, M2M world market. [Online]. Available: <http://tadviser.com/index.php>.
- Chowdhury M., Hossain M., Islam A., Jang Y. A Comparative Survey of Optical Wireless Technologies: Architectures and Applications // Access. – 2018. – Vol. 6. – P.9819–9840. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2792419.
- Olanrewaju H. G., Thompson J. Popoola W. O. Performance of Optical Spatial Modulation in Indoor Multipath

- Channel // Transactions on Wireless Communications. – 2018. – vol. 17, no. 9. – P. 6042-6052. doi: 10.1109/TWC.2018.2854573.
- Jamaluddin Z., Mohd Fadzli M.d S. Wavelet Based Multicarrier Modulation (MCM) Systems: PAPR Analysis. – 2020. DOI: 10.5772/intechopen.94579.
- Behnam K. Orthogonal Frequency Division Multiplexing and Multiple Access. – 2018. – 151-188. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing and Multiple Access. // AeroMACS. – 2018. – P.151–188. doi:10.1002/9781119281139.ch4
- Aziz A.F., Aly O.A.M., Mohammed U.S. High Efficiency Modulation Technique for Visible Light Communication (VLC) // 36th National Radio Science Conference (NRSC), Port Said, Egypt. – 2019. – P.100-107. doi: 10.1109/NRSC.2019.8734568.
- Palacios P., Azurdia-Meza C. A., Roman Cañizares M., Montejo Sánchez S. Performance Analysis of OFDM-Based VLC Schemes in NLOS Channels // South American Colloquium on Visible Light Communications (SACVC), Santiago, Chile. – 2020. 10.1109/SACVLC50805.2020.9129862.
- Selvendran S., Sivanantha Raja A., Esakki Muthu K., Lakshmi A. Certain Investigation on Visible Light Communication with OFDM Modulated White LED Using Optisystem Simulation // Wireless Personal Communications. – 2019. doi:10.1007/s11277-019-06617-2.
- Yang Y., Zeng Z., Cheng J., Guo C., Feng C. A Relay-Assisted OFDM System for VLC Uplink Transmission // IEEE Transactions on Communications. – 2019. – Vol.67. – Is.9. doi:10.1109/tcomm.2019.2923237
- Kurniawan P., Sujatmoko K., Pamukt B. Performance of OOK-RZ and NRZ Modulation Techniques in Various Receiver Positions for Li-Fi // IEEE International Conference on Signals and Systems (ICSigSys). – 2019. – P.173-177. doi:10.1109/icsigsys.2019.8811047.
- Dwivedy P., Dixit V., Kumar A. NOMA cooperative VLC systems: design and performance analysis with OOK and L-PPM modulation // Applied Optics. – 2023. – Vol.62. – Is.25. – P.6639-6651. doi: 1364/AO.496935.
- Baklanov A., Grigoryeva S., Alimkhanova A., Grigoryev E., Sayun V. Audio Transmission System Using White LEDs // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Tomsk, Russia/ – 2019. doi: 1109/SIBCON.2019.8729564/
- Grigoryeva S., Grigoryev Ye., Sayun V., Baklanov A., Alimkhanova A. A New Approach to Physical Encoding in VLC Data Transmission Technology // 21th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Chemal, Russia. – 2020. – P.221-225. doi: 10.1109/EDM49804.2020.9153488/
- Jiemei Wang, Chunhui Lu, Shangbin Li, Zhengyuan Xu. 100 m/500 Mbps underwater optical wireless communication using a NRZ-OOK modulated 520 nm laser diode // Optics Express. – 2019. – Vol. 27, Issue 9. – P. 12171-12181. doi: 10.1364/OE.27.012171.
- Sönmez M. The Performance Analysis of K-Nearest Neighbors Based Detection Algorithm in Visible Light Communication Systems // International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP). – 2021. – Vol.11(12). – P.479-483. doi: 10.29322/IJSRP.11.12.2021.p12069.
- Zaiton A.M., Joyce Y.P.L., Ahmad Z., Jasman F., Hassan W.H.W. Performance Evaluation of NRZ-OOK and Carrier-Less Amplitude Phase Modulation in Li-Fi Environment // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. doi: 10.1088/1742-6596/2411/1/012016.
- Performance improvements of a VLC system, in a V2X context, using a different multiplexing technique // TELKOMNIKA Telecommunication Computing Electronics and Control. – 2023. – Vol. 21, No. 4. – P. 725-735. doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v21i4.24042.
- Haykin S., Moher M. Introduction to Analog and Digital Communications. Second Edition. – 2010. – 537 p.

Information about authors

Alimkhanova Aslima – PhD, senior lecturer, «D. Serikbayev East Kazakhstan technical university», Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan, e-mail: aslima_alimhanova@mail.ru

Grigoryeva Svetlana – PhD, associate professor, «D. Serikbayev East Kazakhstan technical university», Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan, e-mail: SGrigorieva@ektu.edu.kz

Bolatova Anar – doctoral student of «D. Serikbayev East Kazakhstan technical university», Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan, e-mail: bolatova.anar@mail.ru
