

https://doi.org/10.51885/3134-8025_IJCS_2026_3_1

XFTAP 50.01.85

КӨРІНЕТІН ЖАРЫҚ КӨМЕГІМЕН ҮЙ-ЖАЙЛАРДА ОБЪЕКТИЛЕРДІ ОРНАЛАСТЫРУ ЖҮЙЕСІН МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ТИІМДІ АЛГОРИТМДЕРДІ ТАҢДАУ

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИДИМОГО СВЕТА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ

MODELING OF AN INDOOR OBJECT POSITIONING SYSTEM USING VISIBLE LIGHT AND DETERMINING ITS EFFICIENCY

А.Ж. Алимханова ^{1*}, А.М. Амангельдина ¹,

Б.Е. Саттыкова ¹, А.А. Найзабаева ²

¹Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана қ., Қазақстан

²Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

*Жауапты автор: Найзабаева Асель Айбарқызы, e-mail: aselnaizabaeva@mail.ru

Түйінді сөздер:

VLC, позициялау,
триангуляция, RSS, AOA,
MATLAB

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл мақалада ғимарат ішіндегі навигация жүйелерінде спутниктік технологиялардың шектеулерін толықтыру мақсатында қолданылатын көрінетін жарыққа негізделген (VLC) позициялау жүйесі қарастырылады. Зерттеудің мақсаты – VLC негізіндегі позициялау алгоритмдерін талдау, олардың математикалық моделін құру және координаталарды анықтау дәлдігін бағалау. Жұмыста триангуляция, трилатерация, fingerprint және қозғалыс динамикасына негізделген алгоритмдер жіктеліп, LOS және NLOS компоненттерін ескеретін оптикалық арна моделі алынған. MATLAB ортасында AOA және RSS әдістері модельденіп, шу мен SNR көрсеткіштерінің позициялау қатесіне әсері зерттелді, сондай-ақ бұрыштық өлшеулер қателігінің триангуляцияға ықпалы бағаланды. Үш жарық көзін қолданғанда RSS алгоритмінің қателігі 0,15-0,25 м аралығында екені, ал AOA әдісінің шумға төзімділігі жоғары екені анықталды. Зерттеу нәтижелері VLC жүйелерін IoT құрылғыларымен және Smart Lighting платформаларымен интеграциялауға арналған практикалық ұсыныстар ұсынады.

Ключевые слова:

VLC, позиционирование,
триангуляция, RSS, AOA,
MATLAB

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается система внутридомового позиционирования на основе видимого света (VLC), предназначенная для компенсации ограничений спутниковых навигационных систем в закрытых помещениях. Цель работы – проанализировать алгоритмы позиционирования на базе VLC, выполнить их математическое моделирование и оценить точность определения координат.



Проведена классификация алгоритмов (триангуляция, трилатерация, fingerprint-подход, методы на основе динамики движения), получены модели оптического канала с учетом LOS и NLOS компонентов, рассчитано пространственное распределение оптической мощности. В среде MATLAB смоделированы алгоритмы на основе AOA и RSS, исследовано влияние шума и отношения сигнал/шум на погрешность позиционирования, а также чувствительность триангуляции к ошибкам угловых измерений. Показано, что при использовании трех источников света RSS-алгоритм обеспечивает ошибку 0,15-0,25 м, тогда как AOA демонстрирует более высокую устойчивость к шуму и меньший средний позиционный разброс. Сформулированы выводы о научной новизне и практической значимости подхода, а также рекомендации по выбору алгоритмов и параметров освещения для интеграции VLC-систем с IoT-устройствами и Smart Lighting платформами в реальных офисных и промышленных помещениях.

keywords:

VLC, indoor positioning, triangulation, RSS, AOA, MATLAB

ABSTRACT

This article examines a visible light communication (VLC)-based indoor positioning system designed to overcome the limitations of satellite navigation technologies in enclosed environments. The aim of the study is to analyze VLC-based positioning algorithms, develop their mathematical models, and evaluate coordinate estimation accuracy. The work classifies key algorithms—triangulation, trilateration, fingerprinting, and motion-based methods—and formulates an optical channel model that incorporates both LOS and NLOS components. AOA and RSS methods were simulated in MATLAB, and the influence of noise and SNR on positioning accuracy was investigated, as well as the sensitivity of triangulation to angular measurement errors. Results show that when using three light sources, the RSS algorithm provides an accuracy of 0.15–0.25 m, while AOA demonstrates higher robustness to noise and lower positional deviation. The study offers practical recommendations for integrating VLC positioning with IoT devices and Smart Lighting platforms, emphasizing its applicability in office and industrial indoor environments.

КІРІСПЕ

Қазіргі таңда кеңістіктегі физикалық объектілердің орналасуын дәл анықтап, оларды бақылау мәселесі ғылым мен инженерия саласында маңызды зерттеу бағытына айналды. GPS және басқа да ғаламдық навигациялық жүйелер ашық ортада жоғары дәлдік берсе де, ғимарат ішінде немесе жабық кеңістікте олардың жұмысы шектеулі болады. Осы мәселені шешу үшін жергілікті позициялау жүйелері (Indoor Positioning Systems — IPS) белсенді түрде дамуда (Wang R., et al. 2024, Zia M.T. 2020, Zhang S., et al. 2023). Сол технологиялардың ішінде көрінетін жарық арқылы позициялау (Visible Light Communication — VLC) ерекше орын алады. VLC әдісі жарықдиодты (LED) шамдарды ақпарат жеткізуші ретінде қолдануға мүмкіндік береді, бұл энергияны үнемдейтін және экологиялық тұрғыдан тиімді технология ретінде бағаланады (Pham N.Q., Rachim V.P., Chung W.-Y.)

Бұл зерттеудің мақсаты — көрінетін жарық негізінде объектілерді анықтау жүйесін талдап, оны модельдеу және ең тиімді алгоритмдерді анықтау. Зерттеу барысында позициялау жүйелерін жіктеу, VLC технологиясының жұмыс қағидаларын қарастыру, триангуляция мен RSS алгоритмдерінің нәтижелілігін салыстыру және MATLAB бағдарламалық ортасында модельдеу жұмыстарын орындау жоспарланған.

Жергілікті позициялау жүйелері (RTLS немесе IPS) – ғимарат ішінде адамдар мен объектілердің орналасқан орнын нақты уақыт режимінде анықтауға мүмкіндік беретін технологиялар кешені. VLC негізіндегі жүйелердің айырмашылығы — ақпаратты тарату үшін радиотолқындар емес, көрінетін жарық спектрі пайдаланылады (Almadani Y., et al. 2021). LED шамдары деректерді жоғары жиілікте модуляциялау арқылы жібереді, ал қабылдағыш ретінде фотодиод немесе камера қолданылады.

VLC технологиясының негізгі артықшылықтарына деректерді өте жоғары жылдамдықпен беру мүмкіндігі (100 Мбит/с және одан да жоғары), электромагниттік кедергілердің болмауы, қауіпсіздігі және инфрақұрылымның салыстырмалы түрде арзан болуы жатады. Алайда бұл жүйе жарық көзін тікелей көруді қажет етеді және көпсәулелі шағылысу орын алған жағдайда позициялау дәлдігі төмендеуі ықтимал (Apolo J.A., et al. 2025).

Жалпы алғанда, объектінің кеңістіктегі нақты орнын анықтау тек позициялау технологиясын дұрыс таңдауға ғана емес, сонымен қатар оны іске асыру тәсілдерін дұрыс анықтауға да тәуелді. Алдымен қабылдағыш пен жарық көзі арасындағы қашықтықты есептеу әдістері маңызды рөл атқарады, ал кейін олардың орналасу орны мен бұрышы шешуші мәнге ие болады. Осы элементтердің орналасу жағдайын анықтау үшін әртүрлі позициялау алгоритмдері қолданылады.

Жұмыстың ғылыми жаңашылдығы VLC-позициялауда RSS және AOA әдістерін модельдеу мен салыстырмалы талдаудан шу, SNR және бұрыштық өлшеу қателіктерінің әсерін ескеруден, сондай-ақ сигналдың көпсәулелі таралуы жағдайында алгоритмдердің тұрақтылығын бағалаудан тұрады.

Сонымен қатар, жұмыстың ерекшелігі MATLAB ортасында VLC арнасының кешенді моделін құру арқылы алгоритмдердің дәлдігіне әсер ететін негізгі факторлары (шу, SNR, бұрыштық өлшеу қателіктері және көпсәулелі таралу) бір модель аясында бағалаудан тұрады. Бұл тәсіл әртүрлі позициялау алгоритмдерінің жұмыс тиімділігін бірдей жағдайларда салыстыруға мүмкіндік береді және нақты үй-жайларда қолдануға арналған практикалық ұсыныстар жасауға негіз болды.

МАТЕРИАЛДАР МЕН ЗЕРТТЕУ ӘДІСТЕРІ

Козин Сергей өз зерттеу жұмысында позициялау жүйелерінде қолданылатын негізгі алгоритмдерді қарастырып, оларды талдаған. Бұл алгоритмдер төрт негізгі топқа жіктеледі. (Nguyen D.Q., Nguyen H.N. 2025):

Триангуляция және трилатерация. Триангуляция әдісінде белгілі координаттары бар маяктар мен объекті арасындағы бұрыштар өлшенеді, сол арқылы объектінің орналасу бағыты анықталады. Алынған бұрыштық мәндер негізінде теңдеулерді шешу арқылы объектінің нақты координаттарын табуға болады. Трилатерация тәсілі белгілі координаталарға ие, маяктарға дейінгі қашықтықты өлшеуге сүйенеді. Қашықтық мәндері белгілі болған кезде теңдеулерді шешу арқылы объектінің орналасқан нүктесі есептеледі.

Алгоритмдер радиосигналдардың ағымдағы параметрлерін талдау және оларды алдын ала өлшенген сигнал картасымен салыстыруға негізделген. Бұл әдіс сигнал деңгейлерін немесе кеңістіктегі басқа да параметрлерді алдын-ала “картаға” енгізуді талап етеді. BSPD алгоритмдері радио сигналдарының көздерін анықтау үшін әртүрлі деректер өңдеу тәсілдерін қолданады, мысалы:

- ықтималдық әдістері;
- нейрондық желілер;
- тірек векторлары әдісі (SVM);
- Марков модельдері;
- Байес тәсілі;
- ең кіші квадраттар әдісі және т.б. (Oh S.H., Kim J.G. 2024, Oh S.H., Kim J.G. 2024).

Радио сәулелену көзіне жақындықты талдауға негізделген алгоритмдер.

Бұл әдістің принципі — объектіге ең жақын сенсорды анықтау. Егер сенсорлардың саны көп болса, орналасудың дәлдігі айтарлықтай жоғарылайды. Сенсор ретінде RFID немесе Bluetooth сияқты жақын байланыс стандарттарына негізделген құрылғылар, сондай-ақ талшықты-оптикалық желілерді қолдануға болады.

Қозғалыс динамикасын талдауға негізделген алгоритмдер. Бұл алгоритмдер объектінің қозғалыс параметрлерін бағалайтын түрлі датчиктерді қолданады, мысалы: биіктік өлшегіштер, гироскоптар немесе 3D акселерометрлер (заманауи смартфондар құрамында); лазерлік қашықтық өлшегіштер; сондай-ақ Google Tango технологиясы, ол құрылғының камерасынан алынған деректерді пайдаланады (Cheng X., Lin P., Hu X. 2024, El Gamal M.M., Aly M.H., Ismail N.E. 2021, Yang Z., Wang Z., Zhang J., Huang C., Zhang Q. 2015).

Егер алгоритмдерді тереңірек қарастыратын болсақ:

Саусақ ізі (Fingerprint) алгоритмдері. Саусақ ізі әдісіне негізделген позициялау алгоритмдері қабылдағыштың нақты уақыттағы орнын бағалаудан бұрын оқу кезеңін талап етеді. Бұл кезеңде бөлме бірнеше нүктеден тұратын торға бөлінеді, және әр нүктеде сигналдың кейбір сипаттамалары, мысалы қабылданған сигнал қуаты, корреляция коэффициенттері (CSR), сөну коэффициенттері (ER) және т.б., өлшеніп, мәліметтер базасын құру үшін далалық сынақтар немесе модельдеу арқылы енгізіледі (Xie B., Tan G., Liu Y., et al. 2016). Дерекқор толтырылғаннан кейін, ресивердің орналасқан орны белгісіз жерде өлшенген мәндер мен сақталған деректерді салыстыру арқылы анықталады. Алдын ала анықталған критерий бойынша ең жақын сәйкестік координаттары ресивердің есептелген орналасуы ретінде қолданылады.

Бұл алгоритмнің басты қиындықтары – саусақ ізі дерекқорын жасауға көп уақыт кетуі және локализация процесінде өлшенген мәндерді сақталған деректермен салыстыру қажеттілігі. Бұл аспект жобаның жалпы локализация дәлдігін анықтауда маңызды рөл атқарады.

Көрінетін жарық диодтарына негізделген IPS модельдерінде әдетте RSS өлшеулері арқылы саусақ ізі әдісі қолданылады. Сонымен қатар, TDOA және AOA әдістерін пайдалана отырып да саусақ ізі тәсілін қолдануға болады.

Бір уақытта теңдеулер жүйесін шешу. Бұл орналасу әдісі кез келген өлшенетін сигнал сипаттамаларына қолданыла алады. Жарық диоды мен қабылдағыш арасындағы RI қашықтығын декарттық координаттар жүйесінде былай көрсетуге болады:

$$R_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}$$

Сондықтан, егер жарықдиодтың орналасу координаттары модуляцияланған ақпарат арқылы дұрыс қалпына келтірілген деп есептесек (тиісті мультиплекстеу протоколын пайдалана отырып), белгісіз орналасу координаттарын (x,y,z) (x, y, z) (x,y,z) RSS немесе TDOA негізіндегі сигналдарды өңдеу арқылы, кемінде үш тәуелсіз теңдеулер жүйесін шешу арқылы анықтауға болады.

RSS негізіндегі теңдеулер қолданылатын жағдайда, белгісіз координаттарды есептеу үшін кем дегенде төрт жарықдиодты таратқыш қажет болады. Ал TDOA әдісін пайдаланатын қабылдағыш үшін бес жарықдиодты таратқыш қажет, өйткені қосымша жарықдиод анықтамалық сигнал ретінде фазалық айырмашылықты және TDOA ақпаратын есептеуге мүмкіндік береді.

Корреляциялық қосынды коэффициенттері (CSR) алгоритмі RSS негізінде IP-адресстерді тағайындауда қолданылады. Әр жарықдиодқа бірегей мекен-жай беріледі, содан кейін қабылданған сигналдар мен жарықдиодтардың мекен-жайлары арасындағы корреляция есептеледі. Осы корреляция арқылы қабылдағыштың орналасқан орны анықталады. 2D кеңістікте қабылдағыштың координаттарын алу үшін CSR X және Y осьтері бойынша мына формула арқылы есептеледі:

$$CSR_X = \frac{C_{RA} + C_{RC}}{C_{RA} + C_{RB} + C_{RC} + C_{RD}}$$

$$CSR_Y = \frac{C_{RA} + C_{RB}}{C_{RA} + C_{RB} + C_{RC} + C_{RD}}$$

мұндағы, C_{RA} , C_{RB} , C_{RC} және C_{RD} – алынған сигналдар мен әрбір жарықдиод мекен-жайының арасындағы ішкі өнімді білдіреді (мұндағы R индексі қабылдағышты, ал A, B, C, D индекстері жарықдиодтарды көрсетеді). CSR_X мәні y координатасына тәуелді емес, ал CSR_Y мәні x координатасына тәуелді емес. Бұл әдіс екі өлшемді локализацияны қамтамасыз етеді және кем дегенде төрт жарықдиодты қажет етеді. Сонымен қатар, кейбір қосымша талаптар бойынша, осы жарықдиодтардың екеуінің X немесе Y координаталары бірдей болуы тиіс. Әр жарықдиодтың мекен-жайы ретінде қолданылатын код тізбегі жарықдиодтар санына тең болуы керек. Бөлменің барлық X және Y координаталары бойынша CSR мәндері есептеліп, мәліметтер базасында сақталады.

Содан кейін белгісіз орналасқан қабылдағыш үшін алынған CSR мәндері дерекқордағы мәндермен салыстырылады, және ең жоғары сәйкес келетін координаталар қабылдағыштың болжамды орны ретінде анықталады. Өйткені бұл әдіс үшін КҚК (корреляциялық қосынды коэффициенттері) мәндерінің дерекқоры қажет, алгоритм негізінен саусақ ізі (fingerprinting) әдісі ретінде қарастырылады.

Жою коэффициентін бөлу алгоритмі (ER) — бұл қарқындылықты модуляциялау кезінде қолданылатын көрсеткіш. Мұндай сигналдарда жарықдиодты таратқыш ток арқылы басқарылады және екі түрлі қуат (сол арқылы кернеу) деңгейіне ие болады: таратқыш қосылғандағы (сандық «1») және өшірілгендегі (сандық «0») деңгей. Қуаттың осы мәндері сәйкесінше P_1 (қосулы күйдегі қарқындылық) және P_0 (өшірулі күйдегі қарқындылық) деп белгіленеді. ER деп аталатын жою коэффициенті осы екі қарқындылық деңгейінің қатынасы ретінде анықталады.

$$\tilde{E} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_0} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{V_1}{V_0} \right)$$

Бұл жерде V_1 және V_0 таратқыштың сәйкесінше қосылған және өшірілген кездеріндегі кернеудің жоғары және төмен деңгейлерін көрсетеді. Бұл тәсілде тірек жазықтығының теңдеуін құру үшін әрбір жарықдиод бойынша ER мәндері үш түрлі нүктеде (тірек координаттарында) өлшенеді, әрі бұл нүктелер бір түзу бойында орналаспау керек. Қабылдағыштың орнын анықтауға арналған бастапқы жазықтық теңдеуі төмендегідей түрде беріледі.

$$A_i x + B_i y + C_i \tilde{E} + D_i = 0$$

мұндағы, A_i , B_i , C_i және D_i – i -ші жарық диодына қатысты тірек нүктелерінің координаталары мен сол нүктелердегі ER мәндері негізінде анықталатын тұрақты шамалар. x және y – қабылдағыштың орналасу орнын сипаттайтын белгісіз координаталар, ал $\tilde{E}$ – қабылдағыштың осы белгісіз координаталарындағы ER мәні.

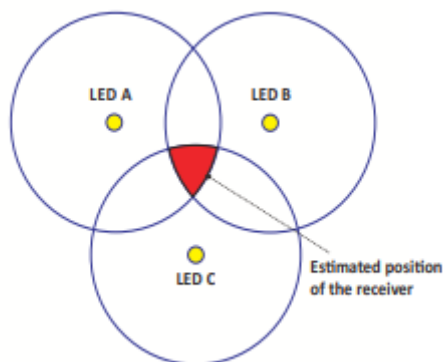
Қабылдағыш тірек жазықтығының теңдеуін білетіндіктен (бұл мәндер алдын ала өлшеніп, деректер базасында сақталады), i -ші жарықдиодқа сәйкес келетін ER өлшемін (E_{i_R}) алған соң, теңдеу сызықтық түрге келтіріледі.

$$y = -\frac{1}{B_i} (A_i x + \tilde{C})$$

Бұл жерде $\tilde{C} = C_i E_{i_R} + D_i$ тұрақты шама болып табылады. Қиылысу нүктелері алынған түзу теңдеулерінен анықталады: (x_{ij}, y_{ij}) координаталары i -ші және j -ші жарық диодтарына сәйкес түзулердің қиылысу нүктелерін көрсетеді. Қабылдағыштың болжамды орналасу нүктесі осы қиылысу нүктелерінің орташа мәнін есептеу арқылы алынады. ER

тірек координаттарының мәндерін дерекқорда сақтау қажеттілігіне байланысты бұл әдіс саусақ ізіне негізделген алгоритм ретінде жіктеледі.

Трилатерацияда қолданылатын жарықдиодтар саны неғұрлым көп болса, орынды бағалау соншалықты дәл болады. Екі өлшемді анықтау үшін үш сөйлеу диодын қолданатын мысал суретте көрсетілген. Бұл әдіс кез келген өлшеу параметрімен бірге (RSS, TDOA немесе AOA) жұмыс істей алады. Көптеген ғылыми жұмыстарда қабылдағыштың орны мен оның бағдарлануы дәлдікке қалай әсер ететінін зерттеу үшін AOA және RSS өлшемдері пайдаланылған.



1-сурет. Трилатерация алгоритмі бойынша жарық көздерінің орналасуы

Ескерту – авторлар құрастырған

Триангуляцияда кіріс бұрыштар әрбір жарықдиодты таратқыш пен қабылдағыш арасындағы жазықтықта анықталады. Бұл бұрыштар арқылы қабылдағыштың орналасу координаттарын табу үшін тригонометриялық теңдеулер қолданылады. Дәстүрлі триангуляцияда сандық шешімдерді алу мүмкіндігі бар, алайда кейде бұл шешімдер тұрақсыз болуы мүмкін. Сондықтан кейбір зерттеушілер екі сатылы тәсілді қолдануды ұсынады:

Бірінші кезең: тек RSS ақпаратын пайдаланып қабылдағыштың орналасуын өрескел бағалау.

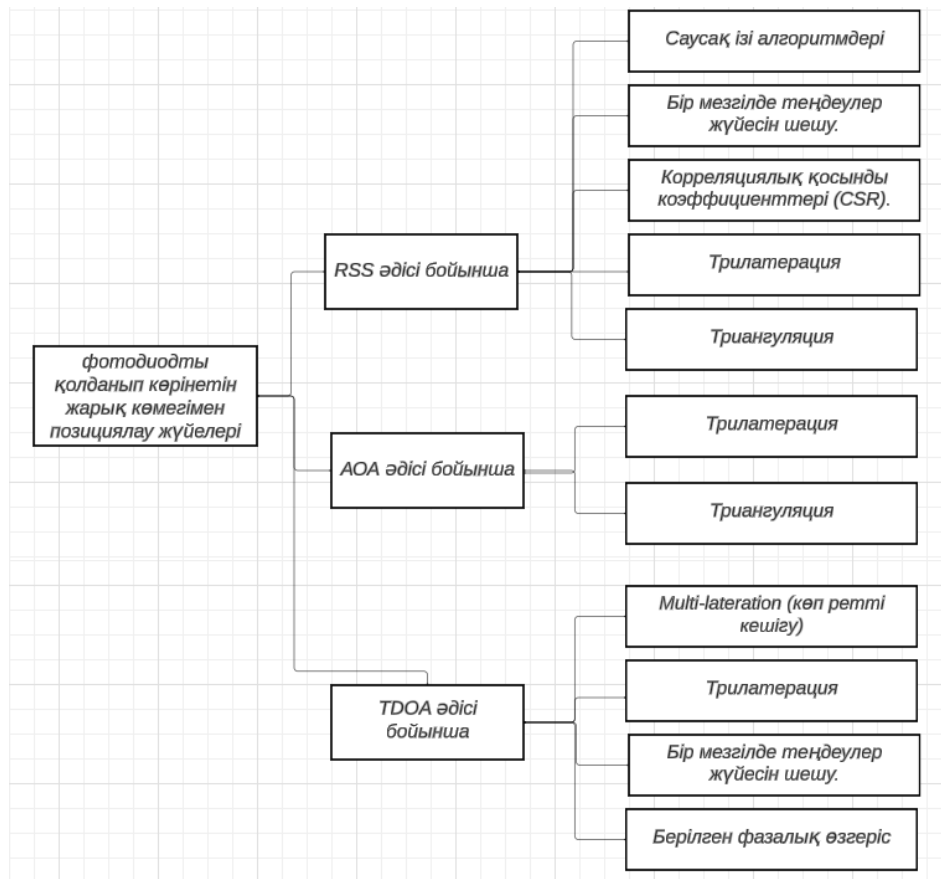
Екінші кезең: дәл позицияны анықтау үшін азимут және биіктік бұрыштарын есептеу.

Осылайша, ең нашар жағдайда, триангуляция сәтсіз болса да, RSS мәліметтері негізінде қабылдағыштың орнын өрескел бағалауға болады.

Фотодиодқа негізделген қабылдағыштар үшін оптикалық трансиверлер торына DAP әсерлері, ал кескін сенсорына негізделген позициялау үшін DOP әсерлері сандық түрде анықталады. AOA векторлары шамамен ортогональды болса, триангуляция төмен DOP мәніне ие, сондықтан позициялау қатесі аз болады. AOA векторлары шамамен параллель болса, триангуляция жоғары DOP мәніне ие, нәтижесінде позициялау қатесі артады.

LC (Visible Light Communication) жүйесі негізінен үш компоненттен тұрады: жарық диоды (таратқыш), мобильді құрылғы (қабылдағыш) және оптикалық арна (қоршаған орта). Жарық диоды шығаратын оптикалық қуат оның спектрлік сипаттамасына сәйкес беріледі және белгілі бір бағыт диаграммасына ($r(\varphi)$) бағынады.

Жарық сәулесі қабылдағышқа тікелей өтеді (LOS), немесе қабырғалар, еден және басқа беттерден шағылысып қабылдағышқа жетуі мүмкін (NLOS). Бөлмедегі шағылыстар мен өлшемдер жоғары деректер жылдамдығы жағдайында арнаның күрделі жауаптарын қалыптастырады. Дегенмен, үй ішіндегі орналасу үшін жоғары деректер жылдамдығы қажет болмағандықтан, арнаны жұмсақ деп қарастыруға болады, тек әлсіреу, өту уақыты, келу бұрышы сияқты параметрлер ескеріледі.



2-сурет. Көрінетін жарық көмегімен позициялау жүйелерінде қолданылатын арақашықтықты есептеу әдістерімен тиімді қолдануға болатын алгоритмдер
Ескерту – авторлар құрастырған

VLC-позициялау жүйесін модельдеу MATLAB ортасында жүзеге асырылды. Бастапқы параметрлер ретінде келесілер берілді: таратқыш қуаты $P_t = 10$ мВт, қабылдағыштың тиімді ауданы $A_r = 1$ см², жарықдиодты таратқыш пен қабылдағыш арасындағы қашықтық $d = 2$ м, жарық ағынының түсу бұрышы 30°, қабылдау бұрышы 45°, жарықдиодтың жартылай қуат бұрышы 60°.

Шағылған сигналды ескеру үшін шағылған жол ұзындығы $d_i = 2,5$ м, шағылысу бетіне түсу бұрышы 30° және шағылу бұрышы 45° деп алынды. Сонымен қатар, позициялау дәлдігіне әсерін зерттеу мақсатында қуаты 0,003 мВт болатын кездейсоқ шу мен әртүрлі SNR мәндерінің ықпалы модельденді.

Тәжірибелер AOA және RSS әдістері үшін жүргізіліп, нәтижелер позициялық қателік шамасы бойынша салыстырылды.

MATLAB модельдеу ортасы ретінде R2024a нұсқасы пайдаланылды. Модельде өлшемі 5×5×3 м болатын бөлме қарастырылып, жарықдиодты таратқыштар төбеге орналастырылды. Әрбір тәжірибеде қабылдағыштың координаталары өзгертіліп, оптикалық қуаттың таралуы, RSS және AOA параметрлері қайта есептелді. Шу деңгейінің әсерін бағалау үшін аддитивті ақ гаусстық шу енгізіліп, SNR мәндері бірнеше диапазонда өзгертілді. Әрбір тәжірибе алты рет қайталанып, нәтижелердің орташа мәндері есептелді.

Қабылдағыштағы фотодиод немесе кескін сенсоры оптикалық сигналды электр сигналына айналдырады. Алынған электр сигналы белсенді аймаққа (AR), спектрлік жауапқа және жарықтың түсу бұрышына байланысты өзгереді. Қабылдағышта қажет болған жағдайда объектив те болуы мүмкін (Khattat et al., 2022).

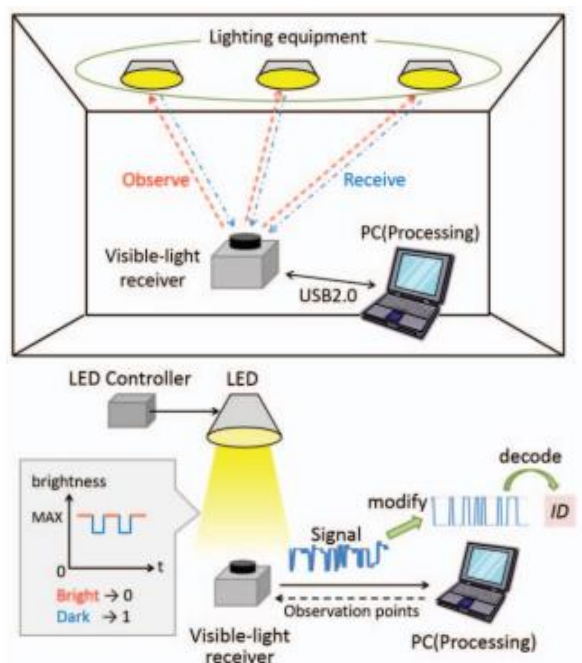
Көбінесе VLC технологиясы инерциялық жүйелермен біріктіріледі. Мұндағы инерциялық компонент қабылдағыштың жарық көзіне қатысты орнын анықтауға мүмкіндік береді. Бұл үшін ұялы телефондарда немесе қонақ үйдегі құрылғыларда орнатылған инерциялық датчиктер қолданылады. Сонымен қатар, VLC кейде белгілі бір жарық көзіне қатысты объектінің орнын анықтайтын айналмалы тар жолақты лазер жүйелерімен біріктіріледі.

НӘТИЖЕЛЕР МЕН ПІКІРТАЛАС

Бұл мақалада көрінетін жарық байланысына негізделген біртұтас бөлме ішіндегі орналасу жүйесі ұсынылған. Сондай-ақ, қабылдағыш деректерін өңдеудің бірнеше әдістері сипатталған. Шеткі кескіннен ақпарат алу процесі кесек сәйкестікке сүйенгенде жалпы сәйкестікке қарағанда декодтаудың сәттілігін арттырады. Қараңғы жолақтармен жабылған жағдайда да, жарық көзін дәл тануға мүмкіндік беретін әдіс ұсынылған.

Орналасқан жерді бағалау процесінде объективтің кескінді қалыптастыру принципі және ұялы телефонның орналасу сенсоры үй ішінде дәл орналасу үшін маңызды рөл атқарады. Өртүрлі биіктіктерде және тік/көлбеу бұрыштарда орналасу дәлдігі тексерілген. Эксперименттік нәтижелер ұсынылған жүйенің сантиметрлік деңгейде орналасу дәлдігін қамтамасыз ететінін көрсетеді.

Айта кету керек, ұсынылған әдістер негізінен дөңгелек жарықдиодты шамдарға арналған. Болашақта жарықдиодты шамдардың әртүрлі формалары зерттеліп, кескін сенсорларына негізделген VLC жүйесінің практикалық құндылығы арттырылуы мүмкін (Khan et al., 2024).



3-сурет. VLC жүйесі. Құрылғылар қызметі

Ескерту – авторлар құрастырған

Көрінетін жарық арқылы ғимарат ішінде позициялау әдістері мен алгоритмдеріне жүргізілген талдау көрсеткендей, триангуляция позициялау алгоритмі және жоғары дәлдік пен математикалық модельдеуге қолайлы AOA және RSS әдістері ең тиімді тәсілдер ретінде қарастырылды. Жалпы, көрінетін жарық көмегімен позициялаудың арнасын

модельдеу ең алдымен сигналдың алыну сапасын қамтамасыз етумен қатар сигналды тікелей жоғалтып алмау үшін өте маңызды болып табылады (Li Z., Jiang M., Zhang X., Chen X., Hou W.-K., 2017).

Арнаны модельдеудің маңыздылығын атап өтетін қосымша критерийлер:

Оптикалық қуаттың таралуын оңтайландыру: Арнаны модельдеу таратқыш пен қабылдағыштың ең тиімді параметрлерін анықтап, олардың жұмыс режимін дұрыс таңдауға мүмкіндік береді.

Сигнал сапасын қамтамасыз ету: Модельдеу таратылатын ақпараттың дәл және сенімді жетуі үшін қажетті SNR (оптикалық қуаттың шуға қатынасы) деңгейін дұрыс орнатуға жағдай жасайды.

Интерференция мен көпжолалы таралуды бағалау: Арнадағы шағылысулар, интерференция және кеңжолалы таралу әсерлерін талдап, олардың сигналға ықпалын бағалауға мүмкіндік береді.

Таратқыш пен қабылдағышты орналастыруды жоспарлау: Барлық жоғарыдағы факторларды ескере отырып, бөлме ішінде құрылғылардың ең тиімді орналасу нүктелерін болжауға болады.

Арна моделінің негізгі аспектілері:

Тікелей көріну (LOS): Сигналдың таратқыштан қабылдағышқа ешқандай бөгетсіз, тура жолмен жетуі.

Шағылыстар және көпжолалы таралу: Сигналдың қабырғалардан, төбеден және басқа кедергілерден шағылып, қабылдағышқа бірнеше жол арқылы келуі.

VLC-позициялаудың жоғары дәлдігіне қарамастан, ұсынылған жүйе ғимарат ішіндегі оптикалық сигналдың таралу ерекшеліктеріне байланысты бірқатар шектеулерге ие. Жүйенің тұрақты жұмыс істеуінің негізгі шарты — жарықдиодты таратқыш пен қабылдағыш арасында тікелей көру сызығының (LOS) болуы. Кедергілердің пайда болуы немесе жарық ағынының жартылай бөтелуі координаттарды анықтау дәлдігінің айтарлықтай төмендеуіне әкелуі мүмкін.

Қосымша әсер сигналдың қабырғалардан, төбеден, еденнен және бөлме ішіндегі басқа беттерден шағылуы нәтижесінде пайда болатын көпсәулелі таралуымен байланысты. Шағылған NLOS компоненттері оптикалық қуаттың таралуын өзгертеді және сигналдың қашықтығы мен келу бұрыштарын бағалау кезінде қателіктер туғызуы мүмкін. Көпсәулелі таралудың әсері әсіресе RSS әдісінде айқын байқалады, себебі шағылған сигналдар қабылданатын қуат деңгейін өзгертіп, позициялау қателігін арттырады.

АОА әдісі мұндай әсерлерге салыстырмалы түрде төзімдірек болғанымен, ол да бұрыштарды өлшеу дәлдігіне және жарықдиодтардың орналасу конфигурациясына тәуелді. Сонымен қатар, позициялау сапасына шу деңгейі, SNR параметрлері, бөлме геометриясы және жарық көздері мен қабылдағыштардың өзара орналасуы әсер етеді. Шашырау және әлсіреу: Қашықтық артқан кезде сигнал қуатының азаюы және жарық толқындарының кеңістікте шашырауы.

Қабылдағыштың қуаты:

$$P_r = \frac{P_t A_r}{d^2} \cos^m \varphi * \cos \theta$$

P_t – таратқыштың қуаты;

A_r – қабылдағыштың тиімді ауданы;

d – таратқышпен қабылдағыштың арасындағы қашықтық;

φ – қабылдағышқа түскен жарық бұрышы;

θ – қабылдағышқа перпендикуляр бағыт пен таратқышқа қарай бағыт арасындағы бұрыш;

m – жарық көзіне байланысты параметр.



Бұл өрнек қабылданатын оптикалық қуаттың таратқыштың қуатына, қабылдағыштың тиімді ауданына, жарықтың түсу бұрышына және таратқыш пен қабылдағыш арасындағы арақашықтыққа тәуелді екенін көрсетеді. Қашықтықтың ұлғаюы немесе түсу бұрышының өзгеруі қабылданатын қуатты төмендетіп, нәтижесінде позициялау дәлдігіне әсер етеді.

Жарықтың таралу жолы:

$$H_{LOS} = \frac{(m+1)A_r}{2\pi d^2} \cos^m \varphi * \cos \theta$$

Шағылысуларды ескеру үшін шағылысқан компонент қолданылады:

$$H_{NLOS} = \sum_i \left(\frac{p_i * A_r * \cos \varphi_i \cos \theta_i}{d_i^2} \right)$$

мұндағы, p_i – беттің шағылысу коэффициенті.

d_i – шағылысқан сәулелің жол ұзындығы

φ_i – шағылысу бетіне түсу бұрышы

θ_i – беттен шағылысу бұрышы

Арнаны модельдеу:

Белгілі параметрлер: P_t – 10мВт;

A_r – 1см²;

d – 2м;

φ – 45°;

θ – 30°;

Таратқыштың жартылай қуат бұрышы – $\Phi_1/2$ - 60°

Шағылысқан жол ұзындығы: $d_i = 2,5$ м, түсу және шағылысу бұрыштары $\varphi_i = 30^\circ$, $\theta_i = 45^\circ$.

m – жарық көзіне байланысты параметр

m параметрі:

$$m = -\frac{\ln(2)}{\ln\left(\cos\left(\frac{\Phi_1}{2}\right)\right)} = -\frac{\ln(2)}{\ln(\cos(60))} = -\frac{\ln(2)}{\ln(0,5)} = 1$$

H_{LOS} тікелей көріну:

$$H_{LOS} = \frac{(1+1) * 1\text{см}^2 * \cos 45^\circ \cos 30^\circ}{2\pi * 2^2}$$

$$H_{LOS} = \frac{2 * 1 * 0,7 * 0,866}{2\pi * 4}$$

$$H_{LOS} = \frac{1,224}{25,132} \approx 0,0487 \frac{\text{см}^2}{\text{м}^2}$$

Шағылысу компоненті:

$$H_{NLOS} = \frac{0,8 * 1\text{см}^2 * \cos 30^\circ * \cos 45^\circ}{2,5^2}$$

$$H_{NLOS} = \frac{0,8 * 1 * 0,866 * 0,707}{6,25}$$

$$H_{NLOS} = \frac{0,49}{6,25} \approx 0,0784 \text{см}^2/\text{м}^2$$

Каналдың жалпы беріліс функциясы:

$$H = H_{LOS} + H_{NLOS} = 0,0487 + 0,0784 \approx 0,1271 \text{см}^2/\text{м}^2$$

Арнаны модельдеу қабылданатын оптикалық қуатты анықтауға мүмкіндік береді:

$$P_r = P_t * H + N_{\sigma}$$

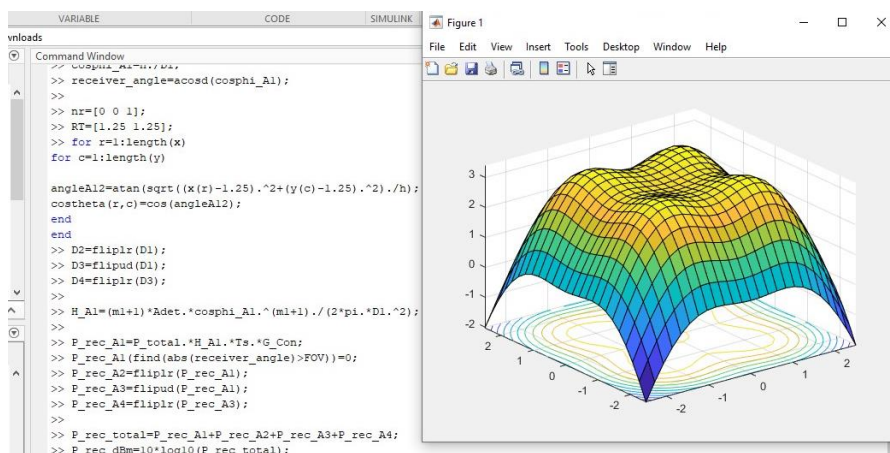
$$P_r = 0.01 * 0.1271 + 0.001 * 10^{-3}$$

$$P_r \approx 0.001272 \text{ Ватт} \approx 1,272 \text{ мВт}$$

VLC арнасын модельдеу әртүрлі компоненттерді, мысалы, тікелей көріну және шағылысқан жолдарды талдауды қамтиды. Бұл жалпы беру функциясын бағалауға және қабылдағыштағы қуатты есептеуге мүмкіндік береді. Бұл есептеулер VLC жүйелерін сенімді және тиімді байланыс үшін оңтайландыруға көмектеседі.

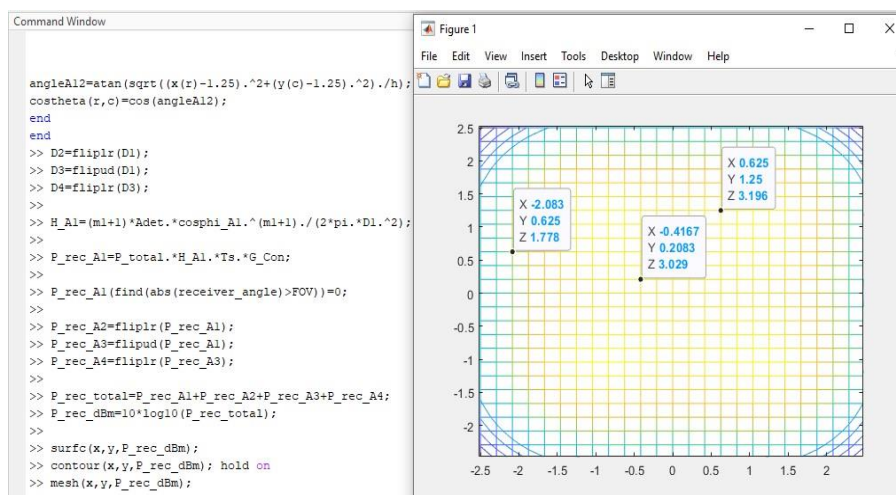
Сонымен, көрінетін жарық көмегімен позициялау арнасының негізгі аспектілерін MatLab ортасында модельдейтін болсақ:

Тікелей көріну (LOS) кезіндегі оптикалық қуат үлестірімін есептеудің MATLAB ортасындағы таралуы:



4-сурет. Тікелей көріну кезіндегі оптикалық қуаттың таралуы

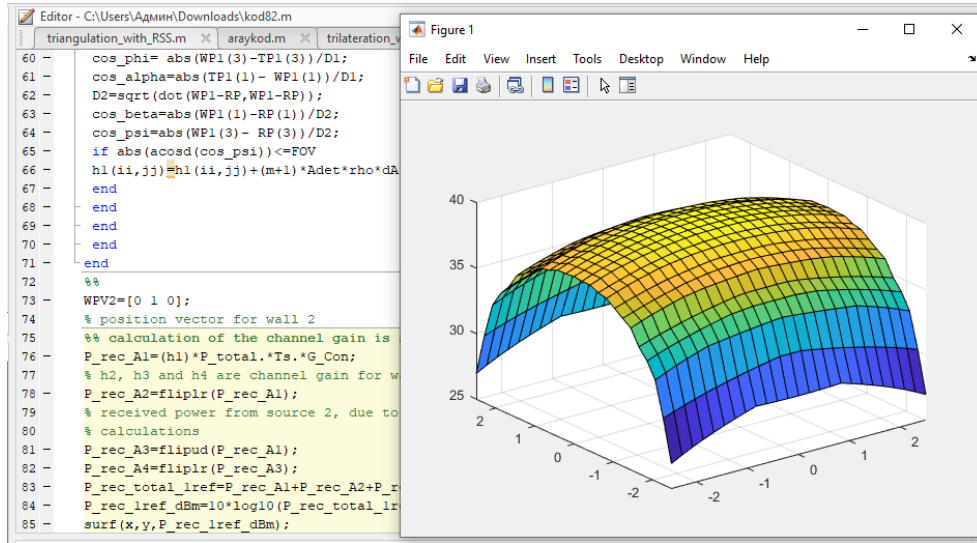
Ескерту – авторлар құрастырған



5-сурет. Тікелей көріну кезіндегі оптикалық қуаттың таралуы

Ескерту – авторлар құрастырған

Шағылысу болған жағдайдағы оптикалық қуат үлестірілімнің MatLab ортасындағы таралуы:



6-сурет. Шағылысу болған кездегі оптикалық қуаттың таралуы

Ескерту – авторлар құрастырған

Суретте көрсетілген оптикалық қуат таралымы бойынша сары зона ең дәлдігі жоғары позициялау аймағын көрсетсе, күлгін түспен ең дәлдігі төмен

AOA (Angel of Arrival) әдісі таратқыштардан келген сигналдардың келу бұрыштарын өлшеу арқылы құрылғының орынын анықтайды:

$$\theta_i = \tan^{-1}\left(\frac{y - y_i}{x - x_i}\right)$$

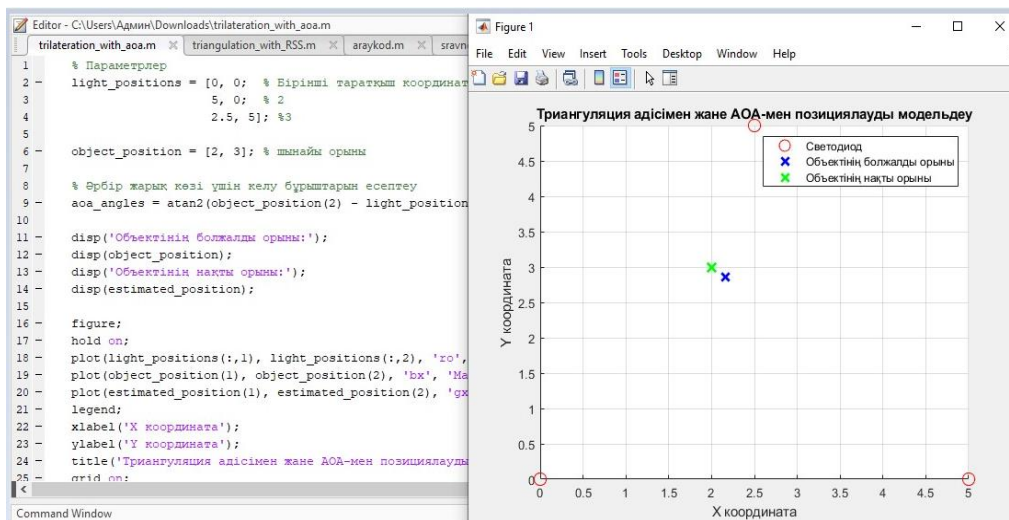
мұндағы, θ_i – таратқыштан i -ші сигналдың келу бұрышы;

(x, y) – қабылдағыштың координаттары;

(x_i, y_i) – таратқыштардың координаттары;

Бірнеше таратқыштар үшін әр таратқыштан сигналдың келу бұрышын сипаттайтын теңдеулер жүйесі алынады.

AOA әдісімен позициялауды MatLab ортасында модельдеу:



7-сурет. Триангуляция алгоритмін AOA негізінде модельдеу

Ескерту – авторлар құрастырған

RSS (Received Signal Strength) әдісі қабылданған сигнал деңгейін өлшеу арқылы қабылдағыш пен таратқыш арасындағы қашықтықты бағалайды:

$$P_r(d) = P_t - 10n \log_{10} d + X_g$$

мұндағы: $P_r(d)$ – d қашықтықта алынған сигналдың қуаты;

P_t – таратқыштың күші;

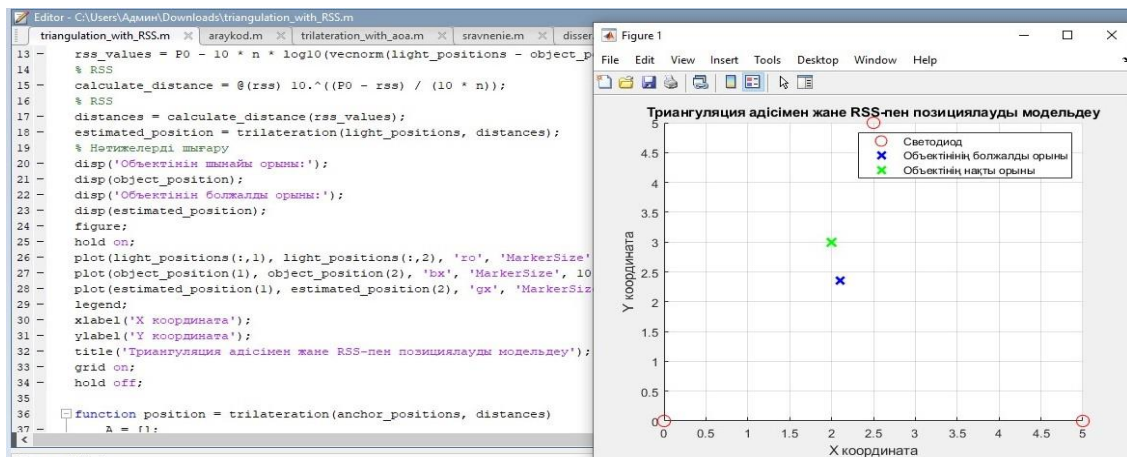
n – жолдағы шығындар көрсеткіші (әдетте, ғимарат ішінде 2-ден 4-ке дейін)

d – таратқышқа дейінгі қашықтық

X_g – сигналдың өшуін модельдейтін кездейсоқ шама.

RSS әдісінің негізгі идеясы – қабылданған сигнал қуаты бойынша жарық көзіне дейінгі қашықтықты бағалау. Кейін бірнеше жарық көзінен алынған қашықтықтар трилатерация арқылы өңделіп, қабылдағыш координаталары анықталады. Сондықтан сигнал қуатын бағалаудағы аз ғана қателік соңғы координаталардың дәлдігіне әсер етеді.

RSS әдісімен позициялауды MatLab ортасында модельдеу:



8-сурет. Триангуляция алгоритмін RSS негізінде модельдеу

Ескерту – авторлар құрастырған

Позициялау жүйелерінде қолданылып отырған жоғарыдағы екі әдісте шу деңгейі мен оптикалық қуат арасындағы өзара байланыс өлшеу дәлдігін әрі жалпы сенімділікті анықтайтын негізгі параметрлердің бірі болып саналады.

Шу – кез келген сигналда кездейсоқ туындайтын және оның амплитудасына әртүрлі дәрежеде ауытқулар енгізетін физикалық тербеліс.

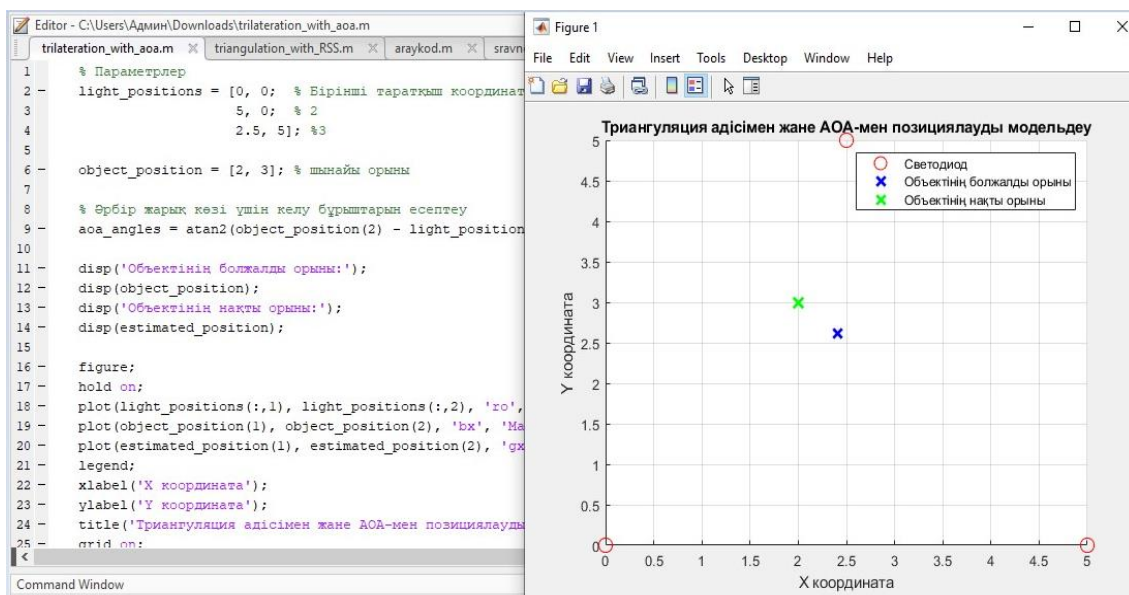
Ал оптикалық қуаттың шуға қатынасы (SNR – Signal to Noise Ratio) – сигнал қуатының шу деңгейіне салыстырмалы қатынасын сипаттайтын көрсеткіш, ол жүйенің қаншалықты сапалы жұмыс істейтінін бағалау үшін қолданылады және мәні децибелмен (дБ) өрнектеледі.

$$SNR = 10 * \log_{10} \frac{P_{signal}}{P_{noise}}$$

SNR көрсеткіші жоғары болған жағдайда, пайдалы оптикалық сигналдың қуаты шу деңгейінен едәуір басым болады, бұл өз кезегінде өлшеудің нақтылығын арттырып, позициялау дәлдігінің жоғарылауына ықпал етеді. Шуыл мен SNR мәнінің позициялаудың әдістеріне әсері

Кездейсоқ шу қуатының мәні: $N_{\sigma}=0,003\text{мВт}=0,003 \times 10^{-3}\text{Ватт}$ деп алып, АОА және RSS әдістерінің позициялау дәлдігі қалай өзгередінін модельдейік. MatLab ортасында модельдеуді жалғастырып, кодқа шуыл қуатын қосатын болсақ:

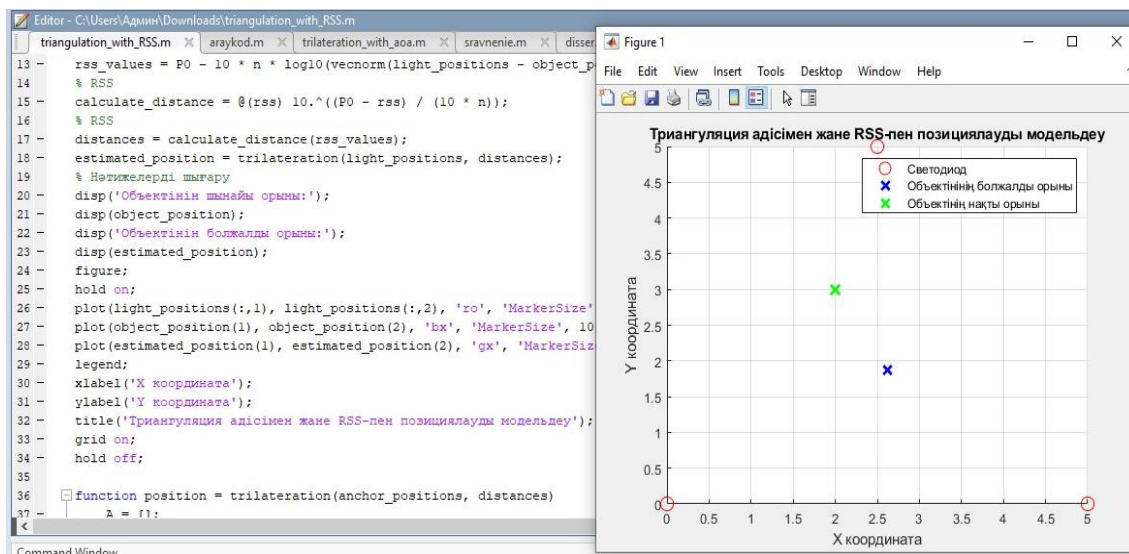
1. AOA әдісінің мәнінің өзгеруі:



9-сурет. Шуыл қуатының AOA әдісіне әсерін модельдеу

Ескерту – авторлар құрастырған

2. RSS әдісінің мәнінің өзгеруі:

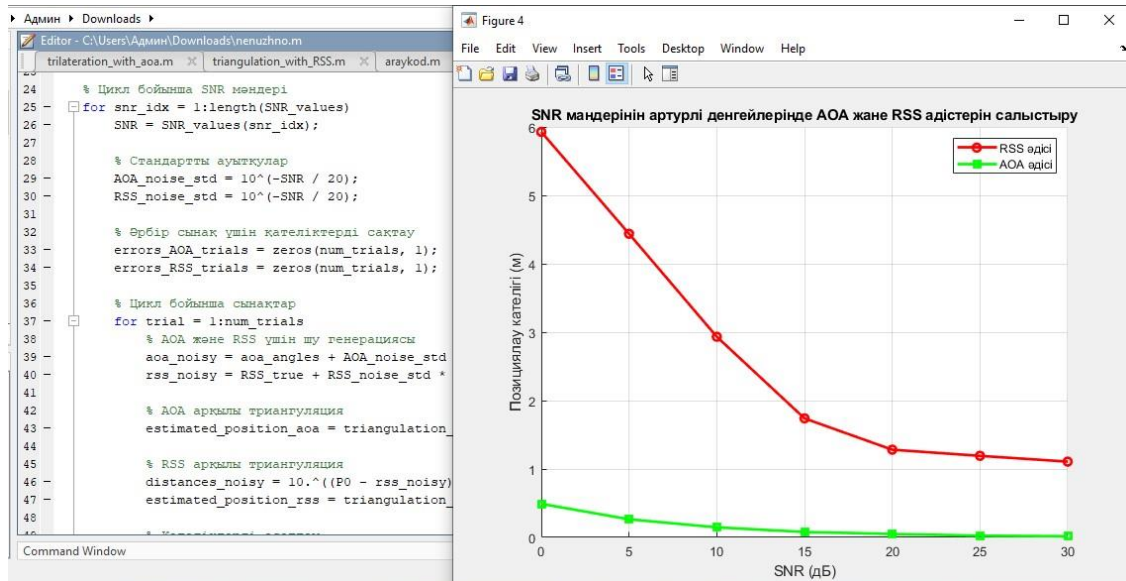


10-сурет. Шуыл қуатының RSS әдісіне әсерін модельдеу

Ескерту – авторлар құрастырған

Суреттерден екі әдіс үшін де шуыл қуатының позициялау дәлдігіне қандай да бір шамаға ауытқығанын көруге болады.

2-әдіс үшін де шуыл қуатының мәндерін өзгерте отырып, әртүрлі SNR мәндерін алып, тәжірбиені брет қайталау жүргізілді:



11-сурет. SNR-дің әртүрлі мәндерінде әдістердің қателігін салыстыру

Ескерту – авторлар құрастырған

11-суреттен AOA әдісінде позициялау қатесі RSS тәсілімен салыстырғанда тұрақты түрде әлдеқайда төмен екені анық байқалады. Бұл өз кезегінде AOA әдісінің шуыл әсеріне жоғары төзімділігін көрсетеді және көрінетін жарыққа негізделген ішкі позициялау жүйелерінде ең тиімді модельдеу әдістерінің бірі екенін дәлелдейді [8]. Сонымен қатар, оптикалық қуаттың түсу бұрышына қарағанда шуылдың жылдамырақ шашырап әлсіреуі AOA тәсілінің артықшылығын тағы бір мәрте растайды.

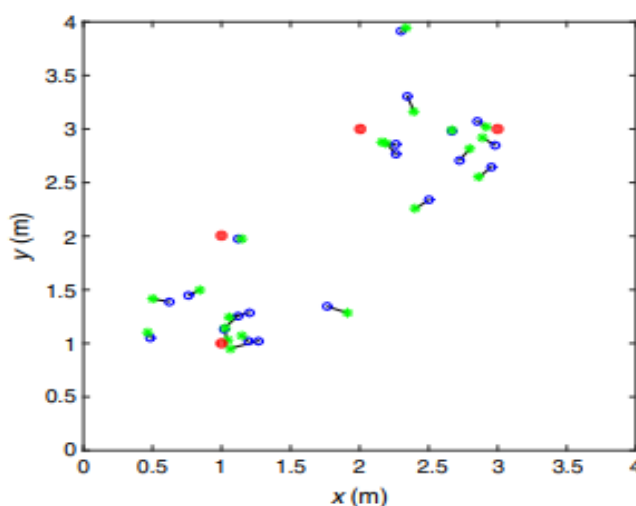
Алынған нәтижелер VLC-позициялау саласындағы заманауи зерттеулермен салыстырылды. Almadani және т.б. (2021), сондай-ақ Khan және т.б. (2024) еңбектерінде RSS және image sensor негізіндегі жүйелердің ғимарат ішінде жоғары дәлдікті позициялауды қамтамасыз ететіні көрсетілген, алайда олар күрделірек аппараттық жүзеге асыруды және жарықдиодты таратқыштардың көп санын талап етеді.

Осылайша, ұсынылған модель қазіргі әдебиетте келтірілген нәтижелермен сәйкес келетін дәлдікті қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, ұсынылған MATLAB моделі алгоритмдердің шуға төзімділігін, көпсәулелі таралу әсерін және бұрыштық өлшеулердің ықпалын бір модель аясында бағалауға мүмкіндік береді, бұл көптеген ұқсас жұмыстарда жеке қарастырылатын мәселелерді кешенді түрде зерттеуге жағдай жасайды.

Saleh және т.б. (2024) зерттеулерінде RSS тәсілі ішкі 3D-позициялау сценарийлерінде тұрақты жұмыс көрсеткенімен, шудың әсеріне сезімталдығы айтарлықтай болған. Осы жұмыста MATLAB ортасында RSS және AOA әдістерін модельдеу нәтижесінде AOA алгоритмінің шуға төзімділігі жоғары әрі RSS әдісімен салыстырғанда позициялық шашырауы аз екені анықталды.

Алынған 0,15–0,25 м позициялау қателігі VLC жүйелерінің қазіргі заманғы дәлдік деңгейіне сәйкес келеді және ұсынылған тәсілді кеңсе және өндірістік ғимараттарда практикалық қолдану мүмкіндігін растайды.

12-суретте AOA әдісімен орындалған он рет позициялаудың нәтижелері көрсетілген. Ондағы белгілеулер: төрт қызыл нүкте — таратқыштар, жиырма көк шеңбер — қабылдағыштардың нақты (шын) координаттары, және жиырма жасыл нүкте — қабылдағыштардың болжамды (есептелген) координаттары. Әр қабылдағыш тек екі көршілес жарықдиодпен тікелей байланыса алады, алайда жүйе арқылы басқа қабылдағыштармен де ақпарат алмасу мүмкіндігі бар.



12-сурет. АОА арқылы позициялауды 10 рет модельдеумен нақты жүзеге асыру.
(қызыл нүктелер таратқыштарды білдіреді, ал көк шеңберлер мен жасыл нүктелер
сәйкесінше қабылдағыштардың шынайы позициялары мен болжамды позициялары
болып табылады)

Осы модельдеу ортасын жалғастыра отырып, біз бұрыштарды өлшеудегі қателіктерге триангуляция алгоритмінің сезімталдығын модельдедік. Бұрыш өлшеулеріндегі қателіктер позициялау дәлдігін нашарлатады; сол себепті бұлар орналасу координаттарына қалай әсер ететінін сандық түрде бағаладық.

Мысал үшін келесі ерекше жағдайлар алынды: бірінші бұрыш — 270° , екінші бұрыш — 45° , үшінші бұрыш — 180° . Әрбір мысалда сәйкес бұрыш 5° -ға дейін ауытқиды (яғни өлшеу қатесі $\pm 5^\circ$). Бұндай бұрыштық қателер координаттарды метрлік жүйеде есептеген кезде шамамен 0.13 м (13 см) позициялық қате береді.

```
format bank
%step1
n=10;
k=1;
z=zeros(2,n)
for phi1=266:1:265+n
    [Xr, Yr]=ToTal(0, 0, -4, 2, -2, -2, phi1,45,180);
    z(k:(k+1))=[Xr, Yr];
    k=k+2;
end
%step2
h=zeros(2,10)
for s=1:2:19
    h(s)=(((z(9)-z(s))^2)+((z(10)-z(s+1))^2))^0.5;
end
%step3
n=10;
k=1;
```

```
v=zeros(2,n)
for phi2=41:1:40+n
[Xr, Yr]=ToTal(0, 0, -4, 2, -2, -2, 270, phi2,180);
v(k:(k+1))=[Xr, Yr];
k=k+2;
end
%step4
l=zeros(2,10)
for s=1:2:19
l(s)=(((v(9)-v(s))^2)+((v(10)-v(s+1))^2))^0.5;
end
%step5
n=10;
k=1;
m=zeros(2,n)
for phi3=176:1:175+n
[Xr, Yr]=ToTal(0, 0, -4, 2, -2, -2, 270,45,phi3);
m(k:(k+1))=[Xr, Yr];
k=k+2;
end
%step6
b=zeros(2,10)
for s=1:2:19
b(s)=(((m(9)-m(s))^2)+((m(10)-m(s+1))^2))^0.5;
end
%step7
n=10;
k=1;
g=zeros(2, n)
phi1=266;
phi2=41;
phi3=176;
for q=0:1:9
[Xr, Yr]=ToTal(0, 0, -4, 2, -2, -2, phi1+(q), phi2+(2*q), phi3+(3*q));
g(k:(k+1))=[Xr, Yr];
k=k+2;
end
%step8
j=zeros(2,10)
for s=1:2:19
j(s)=(((g(9)-g(s))^2)+((g(10)-g(s+1))^2))^0.5;
end
```

VLC көмегімен позициялау жүйесінің жұмыс алгоритмі MATLAB ортасында модельденді. Модельдеудің мақсаты — жарықдиод пен қабылдағыш арасындағы қашықтықты есептеу дәлдігін арттыру және сигналдың оптикалық таралу сипаттамасын анықтау. Модельде жарық ағынының таралуы, фотодиод сезімталдығы және сигнал арнасының күшею коэффициенттері есептелді (9Martínez-Ciro R.A., et al., 2024.)

MATLAB ортасында жүргізілген модельдеу нәтижелерін растау мақсатында зерттеудің келесі кезеңінде ғимарат ішінде VLC-позициялау жүйесіне эксперименттік тексеру жүргізу жоспарлануда. Эксперименттік схема белгілі координаталары бар үш немесе төрт LED жарық көздерін, қабылдағыш құрылғы ретінде фотоқабылдағышты немесе камераны, сондай-ақ алдын ала берілген координаталары бар бақылау нүктелерін қамтиды.

Әрбір бақылау нүктесінде қабылданатын оптикалық қуат деңгейі, жарық сигналының келу бұрышы және фондық шудың әсері өлшенеді. Алынған эксперименттік координаталар MATLAB ортасында RSS және AOA әдістері арқылы есептелген координаталармен салыстырылады.

Бағалаудың негізгі критерийлері ретінде орташа позициялық қателік, алгоритмнің шуға төзімділігі, тікелей көру сызығының (LOS) және сигналдың шағылған компоненттерінің әсері қарастырылады. Мұндай эксперимент математикалық модельдің

дұрыстығын тексеруге және ұсынылған тәсілдің нақты кеңсе және өндірістік ғимараттарда қолданылу мүмкіндігін анықтауға мүмкіндік береді.

Сонымен қатар, эксперимент барысында табиғи және жасанды жарықтандырудың адамдар қозғалысының, жиһаздың орналасуының және әртүрлі қабырға материалдарының позициялау дәлдігіне әсері жеке бағаланатын болады. Мұндай зерттеу ұсынылған модельдің нақты пайдалану жағдайларындағы сенімділігін жан-жақты тексеруге мүмкіндік береді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, үш жарық көзі және бір қабылдағыш қолданылған жағдайда RSS алгоритмі ең төмен позициялау қателігін (0.15–0.25 м аралығында) қамтамасыз етті. Ал триангуляция тәсілін қоса пайдалану есептеулердің тұрақтылығын жоғарылатып, жалпы жүйенің сенімділігін арттырды. Жүйе өнімділігін одан әрі жақсарту мақсатында жарық көздерінің орналасуын оңтайландыру ұсынылады.

Жүргізілген талдау көрінетін жарықты қолданатын позициялау жүйесінің бірқатар артықшылықтары мен белгілі шектеулерін айқындады. VLC технологиясы ішкі кеңістіктердегі навигация мен бақылау жүйелерін жетілдіру үшін болашағы зор бағыт болып табылады. RSS алгоритмін триангуляциямен біріктіру позициялау дәлдігін едәуір жақсартатыны байқалды. Алдағы уақытта жүйені IoT құрылғыларымен және Smart Lighting платформаларымен біріктіру оның мүмкіндіктерін кеңейтіп, функционалдығын арттыруға мүмкіндік береді.

Зерттеу нәтижелері ұсынылған MATLAB моделінің VLC негізіндегі позициялау жүйелерін жобалау кезінде тиімді құрал бола алатынын көрсетті. Алынған нәтижелер алгоритмдерді салыстыруға ғана емес, сондай-ақ нақты үй-жайларда жарық көздерінің оңтайлы орналасуын анықтауға мүмкіндік береді. Болашақта эксперименттік тексеру нәтижелерімен модельді толықтыру және машиналық оқыту әдістерін енгізу жоспарлануда.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Бұл зерттеу сыртқы гранттық қаржыландырусыз орындалды.

ИНСТИТУЦИОНАЛДЫҚ ЭТИКА КОМИТЕТІНІҢ ҚОРЫТЫНДЫСЫ: Зерттеу ашық қолжетімді деректер жиынтығын пайдалану негізінде жүргізілді және адам қатысушылары мен жануарларға тікелей эксперименттік араласуды қамтымады. Осыған байланысты Институционалдық этика комитетінің (IRB) арнайы мақұлдауы талап етілмеді.

ЕРІКТІ КЕЛІСІМ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ: Бұл зерттеуде адам қатысушылары тікелей тартылмағандықтан, ерікті келісім алу талап етілмеді.

ДЕРЕКТЕРДІҢ ҚОЛЖЕТІМДІЛІГІ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ: Осы зерттеуде пайдаланылған деректер ашық қолжетімді Kaggle платформасынан алынды. Зерттеу нәтижелерін растайтын өңделген деректер мен эксперименттік нәтижелер тиісті сұраныс бойынша жауапты автордан алынуы мүмкін.

АЛҒЫС БІЛДІРУ: Авторлар мақаланы дайындау барысында құнды ұсыныстар мен сын-пікірлер берген рецензенттерге алғыс білдіреді. Сондай-ақ, зерттеу жұмысының ғылыми және әдістемелік сапасын арттыруға қолдау көрсеткен әріптестерге ризашылықтарын білдіреді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Жасанды интеллект ғылыми нәтижелерді интерпретациялау, қорытынды жасау немесе зерттеу нәтижелерін қалыптастыру үшін қолданылған жоқ.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Almadani, Y., et al. (2021). Experimental demonstrations of high-accuracy 3D/2D indoor visible light positioning in industrial environment. *Optics & Laser Technology*, 139, 106981.
- Apolo, J. A., et al. (2025). High-precision indoor 2D and 3D visible light positioning using imaging MIMO and neural networks. *Journal of Communications and Networks*. In press.
- Cheng, X., Lin, P., & Hu, X. (2024). A new method for indoor visible light imaging and positioning with single LED. *Photonics*, 11(12), 1199.
- El Gamal, M. M., Aly, M. H., & Ismail, N. E. (2021). Dark light visible light communication positioning system with received signal strength technique. *Optical and Quantum Electronics*, 53, 542.
- Khattat, V. H. F. A., et al. (2022). An efficient 3D indoor positioning system based on visible light communication using CSA-RSS [Preprint]. *arXiv*, 2209.07158.
- Khan, S., et al. (2024). Low-cost 3D indoor visible light positioning. *Photonics*, 11(7), 626.
- Li, Z., Jiang, M., Zhang, X., Chen, X., & Hou, W.-K. (2017). Space-time-multiplexed multi-image visible light positioning system exploiting pseudo-Miller coding for smart phones. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16(12), 7801–7815.
- Liu, X., et al. (2025). Image sensor-based three-dimensional visible light positioning for various environments. *Sensors*, 25(15), 4741.
- Martínez-Ciro, R. A., et al. (2024). Experimental demonstration of an indoor visible light positioning system using RGB LEDs for multi-cell networks. *IET Journal of Engineering*, e12349.
- Nguyen, D. Q., & Nguyen, H. N. (2025). Accurate, extended-range indoor visible light positioning via high-efficiency MPPM modulation with smartphone multi-sensor fusion. *Photonics*, 12(9), 859.
- Oh, S. H., & Kim, J. G. (2024a). Indoor positioning by deep Q-network in VLC environment. *Journal of Communications*, 19(3), 127–132.
- Oh, S. H., & Kim, J. G. (2024b). Indoor positioning by double deep Q-network in VLC-based empty office environment. *Applied Sciences*, 14(9), 3684.
- Pham, N. Q., Rachim, V. P., & Chung, W.-Y. (2019). High-accuracy VLC-based indoor positioning system using multi-level modulation. *Optics Express*, 27(5), 7568–7584.
- Saleh, S., Aly, M., & Nadir, H. (2024). Enhanced 3-LED 3D dark light indoor positioning system with RSS technique [Preprint]. *Research Square*.
- Saleh, S. S., Kheirallah, H. N., & Aly, M. H. (2024). Efficient three-dimensional indoor dark light visible light positioning with received signal strength technique. *Optical and Quantum Electronics*, 56, 952.
- Wang, R., et al. (2024). A survey of visible-light-communication-based indoor positioning systems. *Sensors*, 24(16), 5197.
- Xie, B., Tan, G., Liu, Y., et al. (2016). LIPS: A light intensity-based positioning system for indoor environments. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 12(4), 26.
- Yang, Z., Wang, Z., Zhang, J., Huang, C., & Zhang, Q. (2015). Wearables can afford: Light-weight indoor positioning with visible light. *ACM MobiSys*, 317–330.
- Zhang, S., et al. (2023). Recent progress in visible light positioning and communication systems using LEDs. *IEICE Transactions on Communications*, E106-B(10), 1039–1052.
- Zia, M. T. (2020). Visible light communication based indoor positioning system. *TEM Journal*, 9(1), 30–36.

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Алимханова Аслима Жеңісқызы – PhD ассистент профессор
Қ. Құлажанов атындағы ҚазТБУ, Астана қ., Қазақстан
Алимханова Аслима Женисовна – PhD ассистент профессор
КазУТБ имени К. Кулажанова, г. Астана, Казахстан
Alimkhanova Aslima Zheniskyzy – PhD, Assistant Professor,
KazUTB named after K. Kulazhanov, Astana, Kazakhstan,
e-mail: aslima_alimhanova@mail.ru ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-7551-8846>



Амангельдина Маржан Амангельдиновна – сеньор лектор
Қ. Құлажанов атындағы ҚазТБУ, Астана қ., Қазақстан
Амангельдина Маржан Амангельдиновна – сеньор лектор
КазУТБ им К. Кулажанова, г. Астана, Казахстан
Amangeldina Marzhan Amangeldinovna – senior lecturer KazUTB
named after K. Kulazhanov, Astana, Kazakhstan,
e-mail: marzhanamahgeldina@mail.ru



Саттыкова Бану Ержанқызы – ассистент Қ. Құлажанов атындағы
ҚазТБУ, Астана қ., Қазақстан
Саттыкова Бану Ержанқызы – ассистент КазУТБ имени
Қ.Құлажанова, г. Астана, Казахстан
Sattykova Banu Yerzhanovna – assistant KazUTB named after
K.Kulazhanov, Astana, Kazakhstan,
e-mail: sattykovabanu@mail.ru



Найзабаева Асель Айбарқызы – PhD, ғылыми қызметкер,
Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық универ-
ситеті, Өскемен қ., Қазақстан
Найзабаева Асель Айбаровна – PhD, научный сотрудник,
Восточно-Казахстанский технический университет им.
Д.Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Naizabayeva Asel Aybarkyzy – PhD, Research Fellow, D. Serikbayev
East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk,
Kazakhstan,
e-mail: aselnaizabaeva@mail.ru
ORCID:<https://orcid.org/0009-0005-9334-5087>