



Ғарыш инфрақұрылымында FBG сенсоры қамтамасыз ететін заманауи талаптарды зерттеу

**С.Ж. Көшкінбаев^{1,2} , А.К. Сейтханова³ , Н.К. Смайлов*¹ ,
Қ.М. Ысырайыл¹ , А.Е. Куттыбаева¹**

¹Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан

²Мирас университеті, Шымкент, Қазақстан

³Ә. Марғұлан атындағы Павлодар педагогикалық университеті, Павлодар, Қазақстан

E-mail: koshkinbaev_s@miras.edu.kz, ainur1179@mail.ru, *n.smailov@satbayev.university,
kidir200091@gmail.com, a.kuttybayeva@satbayev.university

Аңдатпа. Бұл мақала ғарыш инфрақұрылымындағы құрылымдық денсаулықты бақылау жүйелеріне қойылатын заманауи талаптарды зерттеуге және оларды Fiber Bragg Grating (FBG) сенсорлары негізінде іске асыру мүмкіндіктерін талдауға арналған. Ғарыш аппараттарының күн панельдері, антенналары, композиттік тасымалдаушы құрылымдары және жылулық қорғау жүйелері пайдалану барысында иондаушы сәулелену, вакуум, температураның кең ауқымды ауытқуы және механикалық жүктемелер сияқты қолайсыз факторлардың әсеріне ұшырайды. Бұл жағдайлар материалдардың қасиеттерінің өзгеруіне, деформациялардың жинақталуына және құрылымдардың сенімділігінің төмендеуіне алып келуі мүмкін. Осыған байланысты өте кіші деформацияларды жоғары дәлдікпен және ұзақ мерзім бойы бақылау маңызды міндет болып табылады. Зерттеуде FBG сенсорларының жұмыс істеу принциптері, Брэгг толқын ұзындығының деформация мен температура әсерінен өзгеруі, сондай-ақ радиациялық әсердің өлшеу тұрақтылығына ықпалы қарастырылды. Құрылымдық мониторингтің тиімділігін арттыруға бағытталған үш негізгі тәсіл талданды: радиацияға төзімді FBG сенсорларын пайдалану, нақты уақыттағы мониторингке арналған мультиплекстелген сенсорлық желілерді қолдану және сенсорларды деформация ең жоғары аймақтарға оңтайлы орналастырып, алынған деректерді интеллектуалды өңдеу. Зерттеу нәтижелері аталған тәсілдерді кешенді қолдану өлшеу дәлдігін арттырып, жүйенің массасы мен күрделілігін азайтуға, ақпараттық тиімділікті жоғарылатуға және ғарыштық құрылымдардың ұзақ мерзімді сенімділігі мен қауіпсіздігін қамтамасыз етуге мүмкіндік беретінін көрсетті. FBG негізіндегі сенсорлық жүйелер ғарыш инфрақұрылымын мониторингтеудің перспективалы және инженерлік тұрғыдан тиімді шешімі болып табылады.

Түйін сөздер: ғарыштық инфрақұрылым, Fiber Bragg Grating (FBG) сенсорлары, деформация, ғарыштық орта, жоғары дәлдік, Брэгг толқын ұзындығы.

Жіберілді 22.04.2026. Өзгертілді 6.05.2026. Қабылданды 12.05.2026. Онлайн қол жетімді 30.06.2026.

*хат-хабар авторы

Кіріспе

Ғарыштық инфрақұрылым объектілері күн панельдері, антенналар, композиттік тасымалдаушы құрылымдар және жылулық қорғау жүйелері ұзақ мерзімді миссиялар барысында радиация, вакуум, температураның кең ауқымды ауытқуы және механикалық жүктемелердің бірлескен әсеріне ұшырайды, бұл материалдардың физика-механикалық қасиеттерінің өзгеруіне және құрылымдық тұрақтылықтың төмендеуіне әкелуі мүмкін [1]. Осындай жағдайларда өте кіші деформацияларды жоғары дәлдікпен және ерте кезеңде анықтау ғарыш аппараттарының сенімділігі мен қауіпсіздігін қамтамасыз етудің негізгі шарты болып табылады, ал мониторингтің кешігуі құрылымдық зақымданудың үдеуіне және жүйенің жұмыс қабілетінің төмендеуіне себеп болуы ықтимал. Ұзақ мерзімді ғарыштық миссияларда материалдардың қартаюуы, радиациялық зақымдануы және құрылымдық шаршау процестерінің жинақталмалы сипаты құрылымдық мониторинг жүйелеріне қойылатын талаптарды одан әрі күшейтеді [2, 3].

Дәстүрлі электрлік сенсорлар ғарыштық ортада электромагниттік кедергілерге сезімталдығы, массасының салыстырмалы түрде жоғары болуы және ұзақ мерзімді тұрақтылығының шектеулілігі салдарынан өте кіші деформацияларды сенімді түрде бақылау талаптарын толық қанағаттандыра алмайды [4, 5]. Осыған байланысты соңғы жылдары оптикалық талшықты сенсорлар, әсіресе Fiber Bragg Grating (FBG) сенсорлары, ғарыштық құрылымдық денсаулықты бақылау жүйелерінде перспективалы шешім ретінде кеңінен зерттелуде [6]. FBG сенсорларының жоғары сезімталдығы, электромагниттік кедергілерге иммундылығы, аз массасы және бір талшық бойына көпнүктелі өлшеу мүмкіндігі оларды ғарыш инфрақұрылымына интеграциялау үшін қолайлы етеді [6, 7].

Ғарыштық ортадағы негізгі шектеуші факторлардың бірі иондаушы сәулеленудің оптикалық талшықтың сыну көрсеткішіне және сенсорлық сипаттамаларына әсері. Радиацияның әсерінен Брэгг толқын ұзындығының дрейфі пайда болып, өлшеу дәлдігі төмендеуі мүмкін, сондықтан радиацияға төзімді FBG сенсорларын әзірлеу және жетілдіру өзекті ғылыми мәселе болып табылады. Бұл бағыттағы зерттеулер арнайы талшық материалдарын, жетілдірілген FBG жазу технологияларын және өзін-өзі қалпына келтіретін сенсорлық жүйелерді қолдану арқылы өлшеу тұрақтылығын арттыру мүмкіндігін көрсетеді [8, 9]. Сонымен қатар, ғарыш құрылымдарының кең аумақты болуы барлық аймақты сенсорлармен толық жабуды техникалық және массалық тұрғыда мүмкін етпейді. Осы себепті бір оптикалық талшық бойына мультиплекстелген FBG сенсорлық желілерін пайдалану және сенсорларды деформация ең жоғары болатын аймақтарға оңтайлы орналастыру әдістері ерекше маңызға ие [10]. Мұндай тәсілдер нақты уақыттағы құрылымдық күйді бақылауды қамтамасыз етіп қана қоймай, минималды сенсор санымен максималды ақпарат алуға мүмкіндік береді және цифрлық егіз (Digital Twin) концепциясымен үйлесімді түрде дамытылуда [11].

Бұл жұмыстың ғылыми жаңалығы келесі аспектілермен сипатталады:

(1) радиациялық әсер, температура және деформация факторларын бір уақытта ескеретін FBG сенсорларын қолданудың кешенді тәсілі ұсынылды;

(2) мультиплекстелген сенсорлық желілер мен оңтайлы орналастыру әдістерін біріктіретін интеграцияланған әдіс ұсынылды;

(3) минималды сенсор санымен максималды ақпарат алуға бағытталған инженерлік шешім негізделді. Сонымен қатар, ғарыштық ортада вакуум, термиялық циклдер (-150°C – $+150^{\circ}\text{C}$), ультракүлгін сәулелену, атомарлық оттегі және ұшыру кезіндегі діріл сияқты факторлар сенсорлардың ұзақ мерзімді тұрақтылығына айтарлықтай әсер етеді.

Әдіснама

Зерттеу әдіснамасы аналитикалық талдау, салыстырмалы әдеби шолу және модельдік бағалау әдістеріне негізделген. Әдебиеттер Scopus және Web of Science дерекқорларынан “FBG sensors”, “space SHM”, “radiation effects in optical fibers” кілт сөздері бойынша таңдалды.

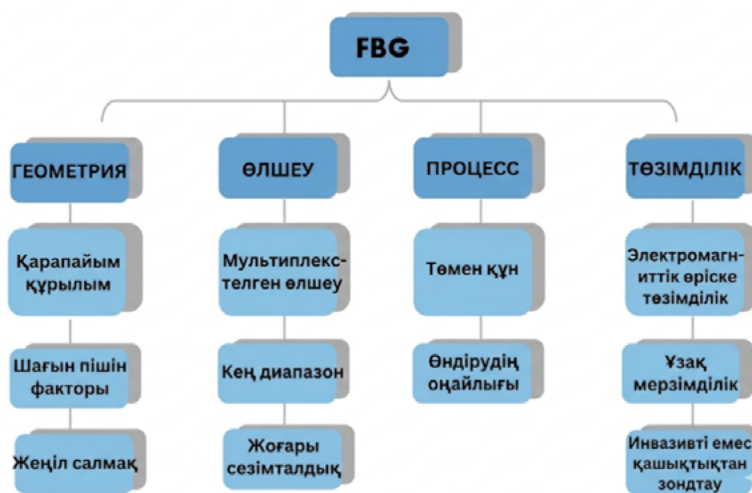
Әдістерді бағалау келесі критерийлер бойынша жүргізілді:

- өлшеу дәлдігі
- радиацияға төзімділік
- жүйе массасы
- сенсорлар саны
- ұзақ мерзімді тұрақтылық.

Сонымен қатар, ғарыштық ортада вакуум, термиялық циклдер (-150°C – +150°C), ультракүлгін сәулелену, атомарлық оттегі және ұшыру кезіндегі діріл сияқты факторлар сенсорлардың ұзақ мерзімді тұрақтылығына айтарлықтай әсер етеді.

Ғарыш инфрақұрылымындағы құрылымдардың ұзақ мерзімді сенімділігі мен қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін сенсорлар өте жоғары дәлдікке, тұрақтылыққа және қоршаған ортаның қатал әсерлеріне төзімділікке ие болуы тиіс. Осы талаптарды қанағаттандыратын перспективалы технология – оптикалық талшықты Брэгг торларына (FBG) негізделген сенсорлар [12]. Ғарыш инфрақұрылымына арналған мониторинг жүйелері өте кіші деформацияларды жоғары дәлдікпен анықтай алуы қажет. FBG сенсорының маңызы электромагниттік кедергілерге иммундылығы, өте аз салмағы, кең ауқымды қамту мүмкіндігі, шағын өлшемі, ақпарат жоғалтудың аздығы, жоғары сезімталдық. Соның нәтижесінде бұл сенсорлық жүйелері деформация, температура, діріл және орын ауыстыру сияқты параметрлерді өлшеу үшін кеңінен қолданылады [12, 13].

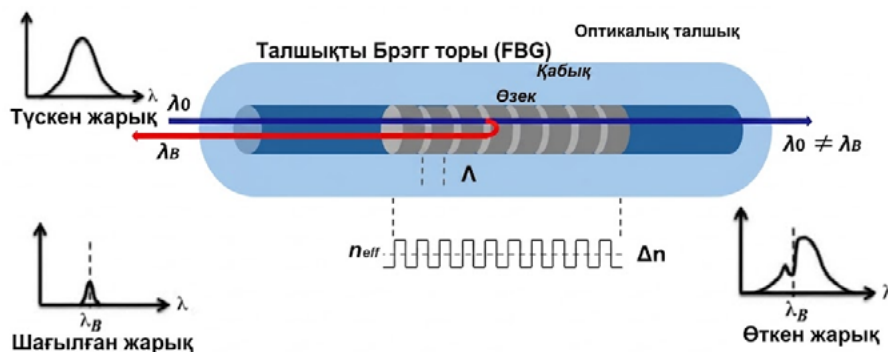
FBG сенсорлары радиациялық әсер жағдайында ең көп зерттелген сенсорлар болып табылады және соңғы жылдары нарықтағы үлесі айтарлықтай артты. FBG сенсорларының негізгі артықшылықтары 1-суретте көрсетілген және олар әртүрлі қолданбаларда оңтайлы сенсорды таңдауға әсер ететін сипаттамалар бойынша жіктелген [14].



Сурет 1. FBG сенсорларының сипаттамалары.

FBG толқын ұзындығына селективті сүзгі болып табылады, мұнда Брэгг торы оптикалық талшықтың өзегіне жазылып, талшықтың осьтік бағыты бойымен сыну көрсеткішінің периодты бұзылуын қалыптастырады. Құрылымының толқын ұзындығын таңдау қасиеті сыну көрсеткішіндегі осы периодты өзгерістерден туындайтын көп мәртелі Френель шағылулары мен олардың когерентті интерференциясына 2-суреттегідей негізделген [15]. FBG тиімді сыну көрсеткішімен көбейтілген тор периодының екі есесіне сәйкес келетін толқын ұзындығындағы жарықты шағылыстырады. Бұл жағдайда Брэгг шарты орындалады және ол 1-формуламен анықталады [16, 17].

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \tag{1}$$

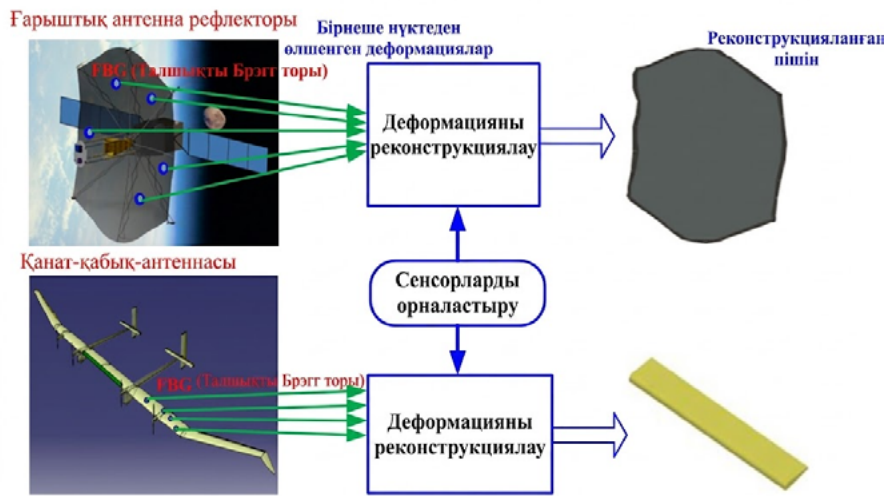


Сурет 2. FBG жұмыс істеу принципінің сұлбасы.

Сенсорға түсірілген жүктемелер (индукцияланған деформация түрінде) немесе температуралық ауытқулар FBG шағылыстыратын толқын ұзындығының айтарлықтай өзгеруіне әкелетіні оңай түсіндірілген және 2-формуламен өрнектеуге болады [18].

$$\Delta\lambda_B = K_\epsilon \Delta\epsilon + K_T \Delta T \tag{2}$$

Заманауи әуе және ғарыштық антенналардың жұмыс сипаттамаларына қойылатын талаптар үнемі артып келетіндіктен, өзіне ендірілген немесе бекітілген FBG деформация сенсорлары бар жаңа антенна құрылымы ұсынылады. Өлшенген дискретті деформация деректерін пайдалана отырып, деформация пішіні деформация – ығысу түрлендіруі арқылы бағаланады. 3-суретте бекітілген немесе ендірілген FBG деформация сенсорларына негізделген ұсынылған пішін деформациясын сезу әдісінің тұжырымдамасы көрсетілген [19].



Сурет 3. FBG деформация сенсорларының деформацияны сезуінің сұлбалық диаграммасы.

Тор периоды Λ да, тиімді сыну көрсеткіші n_{eff} те деформацияға және температураға тәуелді. Брэгг толқын ұзындығының салыстырмалы өзгерісі үшін, температурасы өзгермелі жағдайда FBG көмегімен деформацияны сезудің негізгі 3-формуламен жазылады [20].

$$\frac{\Delta\lambda_B(\epsilon, T)}{\lambda_B} = K_\epsilon + \zeta_T \tag{3}$$

Температура мен деформация әсерін ажырату үшін келесі әдістер қолданылады:

- эталондық FBG қолдану
- қос толқын ұзындығы әдісі
- температураны компенсациялау алгоритмдері
- арнайы қаптамалар (packaging)

Бұл әдістер айқаспалы сезімталдық (cross-sensitivity) әсерін 30–60 % -ға дейін төмендетуге мүмкіндік береді. FBG сенсорлары үшін негізгі физикалық параметрлер сандық түрде келесідей сипатталады. Деформация ϵ әдетте 0–3000 $\mu\epsilon$ диапазонында өлшенеді, ал температура T –150°C-тан +300°C-қа дейін өзгеруі мүмкін.

Брэгг толқын ұзындығының ығысуы $\Delta\lambda$ келесі диапазонда болады:

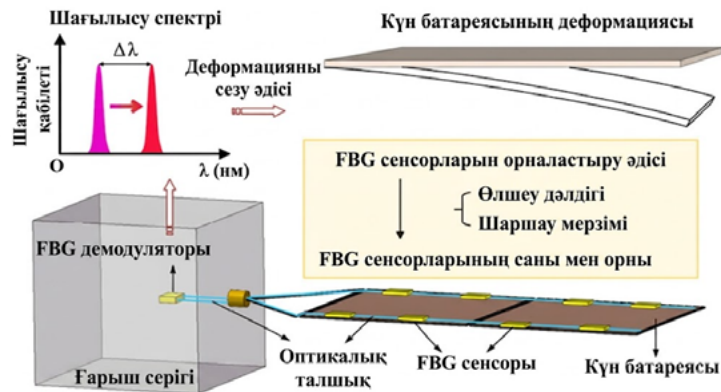
$$\Delta\lambda \approx 1-10 \text{ pm}/\mu\epsilon \text{ (деформация әсерінен)} \text{ және } \Delta\lambda \approx 10-15 \text{ pm}/^\circ\text{C} \text{ (температура әсерінен)}.$$

Сезімталдық коэффициенттері: $K_\epsilon \approx 1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$, $K_T \approx 10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$.

Бұл параметрлер FBG сенсорларының жоғары дәлдікпен микро-деформацияларды анықтауға мүмкіндік беретінін көрсетеді.

FBG сенсорына негізделген сезу әдісі объектілерге бекіту немесе ендіру арқылы жергілікті деформацияны анықтауға мүмкіндік береді. FBG сенсорларын пайдалана отырып спутниктің күн панелінің деформациясын

сезудің сұлбасы 4-суретте көрсетілген. Оптикалық талшықтағы FBG сенсорлары күн панелінің бетіне бекітіледі. FBG демодуляторы спутниктің ішінде орнатылады және Брэгг толқын ұзындығының өзгерісі арқылы FBG сенсорларындағы деформация мәндерін анықтайды [21].



Сурет 4. FBG сенсорларын пайдалана отырып спутниктің күн панелінің деформациясын сезудің сұлбасы.

Енді тақырыпқа сай толық қамтылу мақсатында негізгі 3 әдісті талдаймыз:

1-әдіс. Радиацияға төзімді FBG сенсорларын қолдану негізі: Ғарыштық ортада иондаушы сәулелену (γ-сәулелер, протондар, электрондар) оптикалық талшықтың сыну көрсеткішін өзгертіп, өлшеу қателігін тудырады. Осыған байланысты арнайы радиацияға төзімді талшықтар мен FBG жазу технологиялары қолданылады. Қамтамасыз етілетін заманауи талап: Ұзақ мерзімді тұрақтылық, ғарыштағы радиациялық ортада өлшеу дәлдігін сақтау [22].

Ғарыштық ортада радиациялық доза 10–100 krad, ал протон флюенсі 10^{11} – 10^{13} p/cm² дейін жетуі мүмкін. Бұл жағдайда стандартты FBG сенсорларында Брэгг толқын ұзындығының дрейфі 100–300 pm құрайды.

Радиацияға төзімді FBG (фемтосекундтық немесе қайта қалпына келтірілген Брэгг торлары) қолданылған жағдайда бұл дрейф 30–80 pm дейін төмендейді.

2-әдіс. Нақты уақыттағы құрылымдық денсаулық мониторингіне арналған FBG сенсорлық желілері (FBG sensor networks for real-time SHM): Ғарыш құрылымдары (күн панельдері, антенналар, композиттік қабықтар, MLI жылу жабындары) кең аумақты қамтиды. Бір талшық бойына бірнеше FBG орналастыру арқылы көпнүктелі, нақты уақыттағы деформация және температура мониторингі іске асырылады. Қамтамасыз етілетін заманауи талап: Масса мен кабель санын азайту, Нақты уақыттағы құрылымдық күйді бақылау, Сенсорлық артықшылық.

3-әдіс. FBG сенсорларын оңтайлы орналастыру және деректерді интеллектуалды өңдеу: Ғарыш құрылымдарында барлық аймаққа сенсор орнату мүмкін емес. Сондықтан FBG сенсорларын деформация ең жоғары болатын аймақтарға математикалық және алгоритмдік әдістермен оңтайлы орналастыру қолданылады. Қамтамасыз етілетін заманауи талап: Жоғары өлшеу дәлдігі, Құрылымның қызмет ету мерзімін арттыру, Минималды сенсор санымен максималды ақпарат алу [23].

Нәтижелер мен талқылау

Бұл зерттеуде ғарыш инфрақұрылымындағы құрылымдардың жалпы қатал орта жағдайында ұзақ мерзім бойы сенімді түрде бақылауды қамтамасыз етуге бағытталған әдістемелік тәсілдер қарастырылады. Негізгі назар FBG сенсорына негізделген өлшеу құралдары арқылы тиімділікке аударылады. Сонымен қатар FBG сенсорының нақты атқара алатын міндеттерінің ауқымын көрсетеміз.

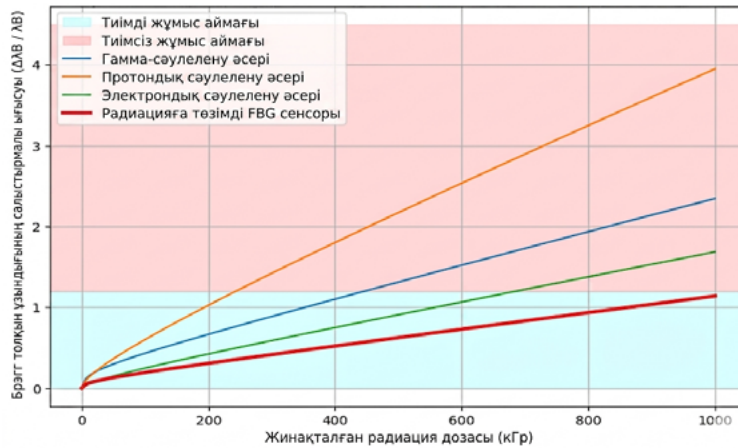
Әдістеме бөлімінде талдаған әдістерді арнайы жүйелі түрде талдасақ,

1. 5-суретте FBG сенсорларының ғарыштық радиациялық ортада жұмыс істеу тиімділігі Брэгг толқын ұзындығының салыстырмалы ығысуы арқылы бағаланады. Диаграммада жұмыс режимдері екі негізгі аймаққа бөлінген. Сурет авторлардың модельдік бағалау нәтижелері негізінде құрастырылған.

Графикте абсцисса осінде радиациялық доза (kGy), ал ординатада Брэгг толқын ұзындығының салыстырмалы ығысуы ($\Delta\lambda/\lambda$) көрсетілген. Деректер модельдеу нәтижелері негізінде алынған және стандартты және радиацияға төзімді FBG сенсорлары үшін салыстырмалы түрде ұсынылған.

Тиімді жұмыс аймағы (өте ашық көк түспен): Бұл аймақ Брэгг толқын ұзындығының салыстырмалы ығысуы аз болатын жағдайларды сипаттайды. Мұнда өлшеу дәлдігі сақталып, сенсор ұзақ мерзімді құрылымдық мониторинг талаптарын қанағаттандырады.

Тиімсіз жұмыс аймағы (өте ашық қызыл түспен): Бұл аймақта сәулеленудің әсерінен Брэгг толқын ұзындығының айтарлықтай дрейфі байқалады, нәтижесінде өлшеу қателігі артып, сенсордың сенімділігі төмендейді. Стандартты оптикалық талшықтарда жазылған FBG сенсорлары, әсіресе протондық сәулелену жағдайында, осы аймаққа ерте өтетіні анық көрінеді.

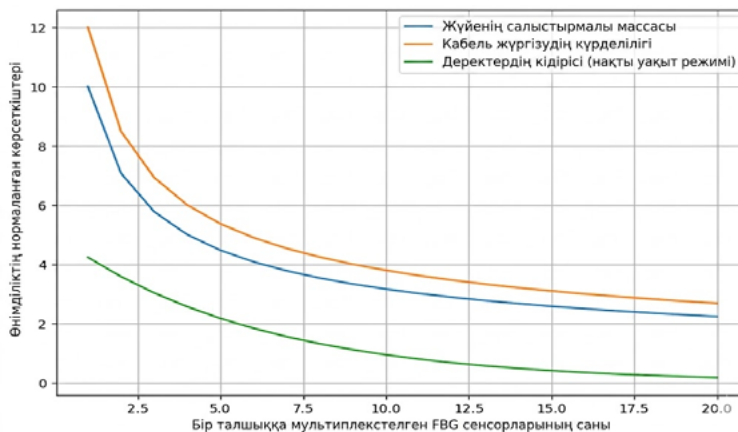


Сурет 5. Ғарыштық радиацияның негізгі факторлары әсеріндегі FBG сенсорларының радиацияға төзімді жұмыс қабілеті.

2. Нақты уақыттағы құрылымдық денсаулықты бақылауға арналған FBG сенсорлық желілерінің өнімділік сипаттамалары 6-суреттегі графикте көрсетілген. Бір оптикалық талшық бойына мультиплекстелген FBG сенсорларына негізделген нақты уақыттағы құрылымдық денсаулықты бақылау (real-time SHM) жүйесінің негізгі тиімділік сипаттамаларын көрсетеді. Абсцисса осінде бір талшыққа орналастырылған FBG сенсорларының саны берілген.

Абсцисса осі – сенсорлар саны (N), ордината – жүйенің салыстырмалы массасы (kg) және деректерді өңдеу кідірісі (ms). Нәтижелер мультиплекстеу тиімділігінің экспоненциалды емес, бірақ қанығу сипатында өсетінін көрсетеді.

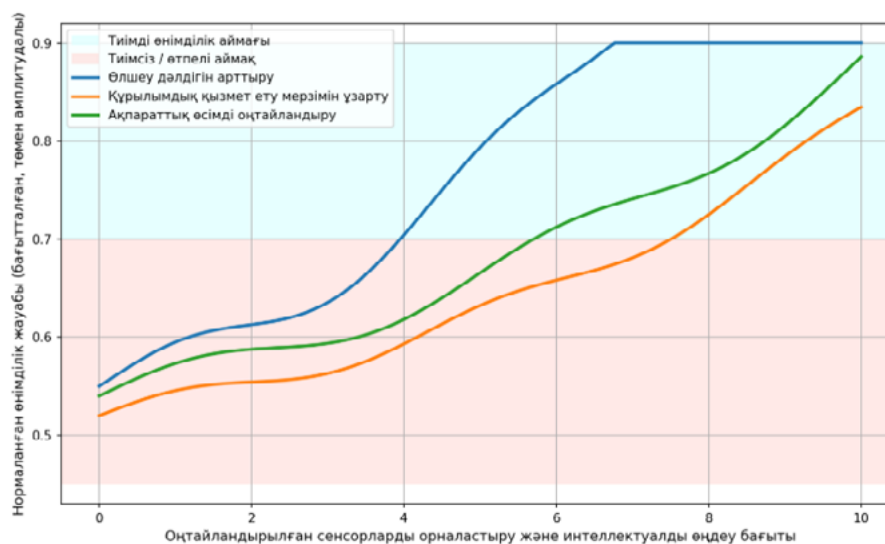
FBG сенсорларын бір оптикалық талшық бойына мультиплекстеу жүйенің салыстырмалы массасын және кабельдік күрделілікті едәуір азайтады, себебі бірнеше сенсорды бір талшықта біріктіру қосымша кабельдер мен механикалық элементтердің санын қысқартады. Сонымен қатар, сенсор саны артқан сайын деректерді беру мен өңдеу кідірісі төмендеп, FBG сенсорлық желілері ғарыш құрылымдарының күйін нақты уақыт режимінде сенімді бақылауға мүмкіндік береді.



Сурет 6. Нақты уақыттағы құрылымдық денсаулықты бақылауға арналған FBG сенсорлық желілерінің өнімділік сипаттамалары.

Оңтайландырылған FBG сенсорларын орналастыру және деректерді интеллектуалды өңдеудің бағытталған толқындық тиімділігі 7-суретте көрсетілген. Бұл бағытталған толқындық диаграмма FBG сенсорларын деформация ең жоғары аймақтарға оңтайлы орналастыру және деректерді интеллектуалды өңдеу нәтижесінде құрылымдық мониторинг сипаттамаларының біртіндеп жақсаруын көрсетеді. Төмен амплитудалы толқындық компоненттер өлшеу нәтижелеріндегі локалды ауытқуларды сипаттайды, ал жалпы өсу бағыты оңтайландыру стратегиясының тиімділігін білдіреді.

График модельдік деректерге негізделген және оптимизация алгоритмінің итерациялық жақсаруын көрсетеді. Ординатада өлшеу дәлдігі (%), ал абсциссада итерациялар саны берілген.



Сурет 7. Оңтайландырылған FBG сенсорларын орналастыру және деректерді интеллектуалды өңдеудің бағытталған толқындық тиімділігі.

Ұсынылған әдістер жиынтығы ғарыш инфрақұрылымындағы құрылымдық денсаулықты бақылау міндеттерін кешенді түрде шешуге бағытталған. Радиацияға төзімді FBG сенсорларын қолдану қатал ғарыштық ортада өлшеу тұрақтылығын қамтамасыз етсе, мультиплекстелген FBG сенсорлық желілерін пайдалану масса мен кабельдік күрделілікті азайта отырып, нақты уақыттағы мониторингті іске асырады. Ал сенсорларды оңтайлы орналастыру мен деректерді интеллектуалды өңдеу әдістері минималды сенсор санымен жоғары өлшеу дәлдігін, ақпараттық тиімділікті және құрылымның қызмет ету мерзімін арттыруға мүмкіндік береді. Бұл тәсілдердің өзара үйлесімі FBG негізіндегі құрылымдық мониторинг жүйелерін заманауи ғарыш аппараттары үшін сенімді әрі тиімді шешім ретінде айқындайды.

Ұсынылған әдістердің тиімділігін бағалау үшін әдебиеттердегі деректермен салыстыру жүргізілді. Мысалы, [5,9] еңбектерінде стандартты FBG сенсорлары үшін радиациялық дрейф 50–200 pm диапазонында байқалады, ал ұсынылған радиацияға төзімді тәсілдер бұл мәнді 20–50 pm деңгейіне дейін төмендетуге мүмкіндік береді.

Бұл ұсынылған әдістің өлшеу тұрақтылығын 2–3 есе арттыратынын көрсетеді.

Қорытынды

Бұл зерттеуде ғарыш инфрақұрылымындағы құрылымдық денсаулықты бақылау мәселесін шешуге бағытталған FBG сенсорларына негізделген кешенді әдістемелік тәсілдер қарастырылды. Талдау нәтижелері радиацияға төзімді FBG сенсорларын қолдану ғарыштық иондаушы сәулелену жағдайында өлшеу тұрақтылығын сақтауға мүмкіндік беретінін көрсетті. Сонымен қатар, бір оптикалық талшық бойына мультиплекстелген FBG сенсорлық желілерін пайдалану жүйенің массасын және кабельдік күрделілікті айтарлықтай азайтып, құрылымдардың күйін нақты уақыт режимінде бақылауды қамтамасыз етеді.

FBG сенсорларын деформация ең жоғары аймақтарға оңтайлы орналастыру және деректерді интеллектуалды өңдеу әдістерін енгізу минималды сенсор санымен жоғары өлшеу дәлдігін, ақпараттық тиімділікті және

құрылымның қызмет ету мерзімін арттыруға жағдай жасайды. Ұсынылған әдістердің өзара үйлесімді қолданылуы ғарыштық құрылымдардың ұзақ мерзімді сенімділігі мен қауіпсіздігін қамтамасыз ететін тиімді құрылымдық мониторинг жүйесін қалыптастыруға мүмкіндік береді. Нәтижесінде FBG негізіндегі сенсорлық жүйелер заманауи ғарыш аппараттары үшін перспективалы және инженерлік тұрғыдан негізделген шешім ретінде қарастырылады.

Алғыс

Осы мақала AP26197431 «Талшықты Брэгг торларын пайдалана отырып, ғарыштық инфрақұрылымдағы деформацияларды жоғары дәлдікпен бақылауға арналған құрылымдар мен технологияларды әзірлеу» жобасы аясында орындалды.

Авторлардың қосқан үлесі

Көшкінбаев С.Ж. – зерттеудің ғылыми тұжырымдамасын қалыптастырып, зерттеу бағытын айқындады және жұмыстың жалпы әдіснамасын әзірледі; мақаланың мазмұнын сыни тұрғыдан қайта қарап, ғылыми редакциялауға қатысты.

Смайлов Н.К. – зерттеу әдістемесін жетілдіріп, алынған нәтижелерді талдау мен интерпретациялауға жетекшілік етті; мақаланың негізгі ғылыми мазмұнын қалыптастыруға қатысып, соңғы нұсқасын бекітті.

Ысырайыл Қ.М. – эксперименттік және аналитикалық деректерді жинақтап, оларды өңдеу жұмыстарын жүргізді; графиктер мен иллюстрациялық материалдарды дайындап, мақаланың негізгі мәтінін жазды.

Сейтханова А.К. – ғылыми әдебиеттерді саралап, зерттеу нәтижелерін жүйеледі; мақаланың кіріспе және теориялық бөлімдерін әзірлеп, мәтінді ғылыми тұрғыдан редакциялауға үлес қосты.

Куттыбаева А.Е. – алынған нәтижелерді ғылыми тұрғыдан талдап, мақаланың құрылымын жетілдіруге және мәтінді редакциялауға қатысты.

Барлық авторлар мақаланың соңғы нұсқасын қарап, жариялауға келісім берді және зерттеу жұмысының ғылыми дәлдігі мен тұтастығы үшін ортақ жауапкершілік алады.

Қолжазбаны дайындау процесінде генеративті ЖИ және ЖИ пайдаланатын технологияларды пайдалану туралы мәлімдеме

«Ғарыш инфрақұрылымында FBG сенсоры қамтамасыз ететін заманауи талаптарды зерттеу» мақаласын дайындау процесінде С.Ж. Көшкінбаев, А.К. Сейтханова, Н.К. Смайлов, Қ.М. Ысырайыл и А.Е. Куттыбаева авторлар ақпаратты іздеу және құрылымдау, мәтіндік сөздерді жақсарту, грамматиканы тексеру және қолжазбаның стилистикалық бөлімдерін редакциялау үшін ChatGPT (OpenAI) құралын пайдаланды. Осы құралды пайдаланғаннан кейін авторлар мазмұнды қажеттілігіне қарай тексерді, редакциялады және жарияланған мақаланың мазмұны үшін толық жауапты болады.

Әдебиеттер тізімі

1. Z. Huan, Y. Zheng, K. P. Wang, Z. Shen, W. Ni, J. Zu, and Y. Shao, J. Mater. Chem. A 12, 1910 (2024). <https://doi.org/10.1039/d3ta06388g>
2. M. Tomsia, J. Cieśla, et al., Front. Physiol. 15, 1284644 (2024). <https://doi.org/10.3389/fphys.2024.1284644>
3. X. Ma, N. An, et al., Commun. Eng. 3, 223 (2024). <https://doi.org/10.1038/s44172-024-00223-2>
4. S. J. Mihailov, Sensors 12, 1898 (2012). <https://doi.org/10.3390/s120201898>
5. A. Morana, E. Marin, et al., Sensors 22, 8175 (2022). <https://doi.org/10.3390/s22218175>
6. A. N. D. Alhussein, M. R. T. M. Qaid, T. Agliullin, B. Valeev, O. Morozov, and A. Sakhabutdinov, Sensors 25, 2289 (2025). <https://doi.org/10.3390/s25072289>
7. J. Lai, J. Qiu, et al., J. Sens. 2016, 8658290 (2016). <https://doi.org/10.1155/2016/8658290>
8. M. A. Arockiyadoss, A. M. Dehnaw, et al., Electronics 13, 1276 (2024). <https://doi.org/10.3390/electronics13071276>
9. L. Fazzi, N. Dias, M. Holynska, A. Tighe, R. Rampini, and R. M. Groves, Meas. Sci. Technol. 33, 065102 (2022). <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac6d45>
10. A. Aimasso and C. G. Ferro, in Proc. IEEE MetroAeroSpace (2023), p. 10189989. https://doi.org/10.1109/METRO_AEROSPACE57412.2023.10189989
11. W. Liu, M. Wu, G. Wan, and M. Xu, Remote Sens. 16, 3023 (2024). <https://doi.org/10.3390/rs16163023>
12. G. M. Berruti et al., J. Lightwave Technol. 44, 2858–2865 (2026). <https://doi.org/10.1109/JLT.2025.3650002>

13. S. Mortazavi, S. Makouei, K. Abbasian, and S. Danishvar, *Photonics* 12, 1202 (2025). <https://doi.org/10.3390/photronics12121202>
14. A. Rovera, A. Tancau, et al., *Sensors* 23, 2512 (2023). <https://doi.org/10.3390/s23052512>
15. A. Aimasso, C. G. Ferro, M. Bertone, M. D. L. Dalla Vedova, and P. Maggiore, *Micromachines* 14, 926 (2023). <https://doi.org/10.3390/mi14050926>
16. S. P. Kok, Y. I. Go, X. Wang, and M. L. D. Wong, *IEEE Sens. J.* (2024). <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3434351>
17. M. Malekzadeh, M. Gul, I.-B. Kwon, and N. Catbas, *Struct. Eng. Mech.* 14, 917 (2014). <https://doi.org/10.12989/sss.2014.14.5.917>
18. J. M. López-Higuera, L. Rodriguez Cobo, A. Quintela Incera, and A. Cobo, *J. Lightwave Technol.* 29, 587 (2011). <https://doi.org/10.1109/JLT.2011.2106479>
19. J. Zhou, Z. Cai, P. Zhao, and B. Tang, *Sensors* 18, 2481 (2018). <https://doi.org/10.3390/s18082481>
20. I. McKenzie, S. Ibrahim, E. Haddad, S. Abad, A. Hurni, and L. K. Cheng, *Front. Phys.* 9, 719441 (2021). <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.719441>
21. Y. Zhu, J. Jin, X. Wang, J. Qi, and H. Xu, *IEEE Sens. J.* 23, 3335256 (2023). <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3335256>
22. D. V. Przhiialkovskii, N. A. Plyuskova, and O. V. Butov, *IEEE Sens. J.* 25, 538–544 (2025). <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3494261>
23. R. O. Ogunleye, S. Rusnáková, J. Javorík, M. Žaludek, and B. Kotlánová, *Adv. Eng. Mater.* 26, 2401745 (2024). <https://doi.org/10.1002/adem.202401745>

**С.Ж.Көшкінбаев^{1,2}, А.К.Сейтханова³,
Н.К.Смайлов^{*1}, Қ.М.Ысырайыл¹, А.Е.Куттыбаева¹**

¹*Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан*

²*Университет Мирас, Шымкент, Казахстан*

³*Павлодарский педагогический университет имени Әлкей Марғұлан, Павлодар, Казахстан*

(E-mail: koshkinbaev_s@miras.edu.kz, ainur1179@mail.ru,
n.smailov@satbayev.university, kidir200091@gmail.com, a.kuttybayeva@satbayev.university)

Исследование современных требований, обеспечиваемых FBG-сенсорами в космической инфраструктуре

Аннотация. Данная статья посвящена исследованию современных требований к системам мониторинга технического состояния космической инфраструктуры и анализу возможностей их реализации на основе датчиков Fiber Bragg Grating (FBG). Космические конструкции, включая солнечные панели, антенны, композитные несущие элементы и системы тепловой защиты, в процессе эксплуатации подвергаются воздействию ионизирующего излучения, значительных температурных колебаний, вакуума и механических нагрузок. Эти факторы могут приводить к возникновению деформаций и постепенному снижению надежности конструкций, что требует применения высокоточных средств контроля. В работе рассмотрены физические принципы функционирования FBG-сенсоров, особенности изменения длины волны Брэгга под воздействием деформации и температуры, а также влияние радиационных факторов на стабильность измерений. Выполнен анализ трех основных подходов к повышению эффективности структурного мониторинга: использования радиационно-стойких FBG-сенсоров, организации мультиплексированных сенсорных сетей для мониторинга в реальном времени и оптимального размещения сенсоров в наиболее нагруженных зонах с последующей интеллектуальной обработкой данных. Показано, что комплексное применение указанных методов обеспечивает высокую точность измерений, снижение массы и сложности сенсорной системы, повышение информативности мониторинга и увеличение долговременной надежности космических конструкций. Полученные результаты подтверждают перспективность FBG-технологий для создания современных систем структурного мониторинга космической инфраструктуры.

Ключевые слова: космическая инфраструктура, сенсоры Fiber Bragg Grating (FBG), деформация, космическая среда, высокая точность, длина волны Брэгга.

**S.Zh. Koshkinbayev^{1,2}, A.K. Seytkhanova³, N.K. Smailov¹,
K.M. Yssyraiyl¹, A.E. Kuttybayeva¹**

¹*Kazakh National Research Technical University after K.I. Satbayev, Almaty, Kazakhstan,*

²*Miras University, Shymkent, Kazakhstan*

³*Pavlodar Pedagogical University named after Alkey Margulan, Pavlodar, Kazakhstan*

(E-mail: koshkinbaev_s@miras.edu.kz, ainur1179@mail.ru,
n.smailov@satbayev.university, kidir200091@gmail.com, a.kuttybayeva@satbayev.university)

Analysis of modern requirements supported by Fiber Bragg Grating (FBG) sensors in space infrastructure

Abstract. This paper investigates modern requirements for structural health monitoring systems in space infrastructure and analyzes the capabilities of Fiber Bragg Grating (FBG) sensor technology to meet these demands. Space structures, including solar panels, antennas, composite load-bearing components, and thermal protection systems, are exposed to harsh environmental conditions such as ionizing radiation, vacuum, severe temperature fluctuations, and mechanical loads throughout their operational lifetime. These factors can induce structural degradation and deformation, making accurate and long-term monitoring essential for ensuring mission reliability and safety. The study reviews the operating principles of FBG sensors, the dependence of Bragg wavelength shifts on strain and temperature variations, and the influence of radiation-induced effects on measurement stability. Particular attention is paid to three key approaches for improving monitoring performance: the application of radiation-resistant FBG sensors, the implementation of multiplexed FBG sensor networks for real-time monitoring, and the optimal placement of sensors in critical deformation zones combined with intelligent data processing techniques. The analysis demonstrates that the integrated use of these approaches enables highly accurate measurements with a minimal number of sensors while reducing system weight, cabling complexity, and maintenance requirements. Furthermore, the proposed solutions improve monitoring efficiency and enhance the long-term reliability of space structures. The results confirm the strong potential of FBG-based sensing technologies for next-generation structural health monitoring systems in aerospace and space infrastructure applications.

Keywords: space infrastructure, Fiber Bragg Grating (FBG) sensors, deformation, space environment, high accuracy, Bragg wavelength.

References

1. Z. Huan, Y. Zheng, K. P. Wang, Z. Shen, W. Ni, J. Zu, and Y. Shao, *J. Mater. Chem. A* 12, 1910 (2024). <https://doi.org/10.1039/d3ta06388g>
2. M. Tomsia, J. Cieřla, et al., *Front. Physiol.* 15, 1284644 (2024). <https://doi.org/10.3389/fphys.2024.1284644>
3. X. Ma, N. An, et al., *Commun. Eng.* 3, 223 (2024). <https://doi.org/10.1038/s44172-024-00223-2>
4. S. J. Mihailov, *Sensors* 12, 1898 (2012). <https://doi.org/10.3390/s120201898>
5. A. Morana, E. Marin, et al., *Sensors* 22, 8175 (2022). <https://doi.org/10.3390/s22218175>
6. A. N. D. Alhussein, M. R. T. M. Qaid, T. Agliullin, B. Valeev, O. Morozov, and A. Sakhabutdinov, *Sensors* 25, 2289 (2025). <https://doi.org/10.3390/s25072289>
7. J. Lai, J. Qiu, et al., *J. Sens.* 2016, 8658290 (2016). <https://doi.org/10.1155/2016/8658290>
8. M. A. Arockiyadoss, A. M. Dehnaw, et al., *Electronics* 13, 1276 (2024). <https://doi.org/10.3390/electronics13071276>
9. L. Fazzi, N. Dias, M. Holynska, A. Tighe, R. Rampini, and R. M. Groves, *Meas. Sci. Technol.* 33, 065102 (2022). <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac6d45>
10. A. Aimasso and C. G. Ferro, in *Proc. IEEE MetroAeroSpace* (2023), p. 10189989. <https://doi.org/10.1109/METROAEROSPACE57412.2023.10189989>

11. W. Liu, M. Wu, G. Wan, and M. Xu, *Remote Sens.* 16, 3023 (2024). <https://doi.org/10.3390/rs16163023>
12. G. M. Berruti et al., *J. Lightwave Technol.* 44, 2858–2865 (2026). <https://doi.org/10.1109/JLT.2025.3650002>
13. S. Mortazavi, S. Makouei, K. Abbasian, and S. Danishvar, *Photonics* 12, 1202 (2025). <https://doi.org/10.3390/photonics12121202>
14. A. Rovera, A. Tancau, et al., *Sensors* 23, 2512 (2023). <https://doi.org/10.3390/s23052512>
15. A. Aimasso, C. G. Ferro, M. Bertone, M. D. L. Dalla Vedova, and P. Maggiore, *Micromachines* 14, 926 (2023). <https://doi.org/10.3390/mi14050926>
16. S. P. Kok, Y. I. Go, X. Wang, and M. L. D. Wong, *IEEE Sens. J.* (2024). <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3434351>
17. M. Malekzadeh, M. Gul, I.-B. Kwon, and N. Catbas, *Struct. Eng. Mech.* 14, 917 (2014). <https://doi.org/10.12989/sss.2014.14.5.917>
18. J. M. López-Higuera, L. Rodriguez Cobo, A. Quintela Incera, and A. Cobo, *J. Lightwave Technol.* 29, 587 (2011). <https://doi.org/10.1109/JLT.2011.2106479>
19. J. Zhou, Z. Cai, P. Zhao, and B. Tang, *Sensors* 18, 2481 (2018). <https://doi.org/10.3390/s18082481>
20. I. McKenzie, S. Ibrahim, E. Haddad, S. Abad, A. Hurni, and L. K. Cheng, *Front. Phys.* 9, 719441 (2021). <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.719441>
21. Y. Zhu, J. Jin, X. Wang, J. Qi, and H. Xu, *IEEE Sens. J.* 23, 3335256 (2023). <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3335256>
22. D. V. Przhiiakovskii, N. A. Plyuskova, and O. V. Butov, *IEEE Sens. J.* 25, 538–544 (2025). <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3494261>
23. R. O. Ogunleye, S. Rusnáková, J. Javorík, M. Žaludek, and B. Kotlánová, *Adv. Eng. Mater.* 26, 2401745 (2024). <https://doi.org/10.1002/adem.202401745>

Авторлар туралы мәлімет:

Көшкінбаев Сәулетбек Жолдықараұлы – PhD, қауымдастырылған профессор, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық университеті, 050013, Алматы, Қазақстан, «Мирас» университеті, Шымкент, Қазақстан, koshkinbaev_s@miras.edu.kz, +7 747 121 7984.

Сейтханова Айнур Кусбековна – PhD, қауымдастырылған профессор, Ә. Марғұлан атындағы Павлодар педагогикалық университеті, 140000, Павлодар, Қазақстан, ainur1179@mail.ru, +7 705 834 7608.

Смайлов Нуржигит Куралбаевич – хат-хабар авторы, PhD, профессор, «Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар» кафедрасы, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, 050013, Алматы, Қазақстан, n.smailov@satbayev.university, +7 702 986 9486.

Ысырайыл Қыдырәлі Мұсаханұлы – докторант, «Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар» кафедрасы, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті университеті, 050013, Алматы, Қазақстан, kidir200091@gmail.com, +7 702 535 72 65.

Куттыбаева Айнур Еремеккалиевна – қауымдастырылған профессор, «Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар» кафедрасы, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, 050013, Алматы, Қазақстан, a.kuttybayeva@satbayev.university, +7 707 116 2790.

Көшкінбаев Сәулетбек Жолдықараұлы – доктор PhD, ассоциированный профессор, Казахский национальный технический университет имени К.Сатпаева, 050013, г. Алматы, Казахстан, Университет «Мирас», г. Шымкент, Казахстан, koshkinbaev_s@miras.edu.kz, +7 747 121 7984.

Сейтханова Айнур Кусбековна – доктор PhD, ассоциированный профессор, Павлодарский педагогический университет имени Ә. Марғұлан, 140000, г. Павлодар, Казахстан, ainur1179@mail.ru, +7 705 834 7608.

Смайлов Нуржигит Куралбаевич – автор для корреспонденции, профессор, доктор PhD кафедры электроники, телекоммуникации и космических технологий, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, 050013, г. Алматы, Республика Казахстан, n.smailov@satbayev.university, +7 702 986 9486.

Ысырайыл Қыдырәлі Мұсаханұлы - докторант кафедры электроники, телекоммуникации и космических технологий, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, 050013, г. Алматы, Республика Казахстан, kidir200091@gmail.com, +7 702 535 72 65.

Куттыбаева Айнур Еремеккалиевна - ассоциированный профессор кафедры электроники, телекоммуникации и космических технологий, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, 050013, г. Алматы, Республика Казахстан, a.kuttybayeva@satbayev.university, +7 707 116 2790.

Koshkinbayev Sauletbek Zholdykaraulы – PhD, Associate Professor, K. Satpayev Kazakh National Technical University, 050013, Almaty, Republic of Kazakhstan, Miras University, Shymkent, Republic of Kazakhstan, koshkinbaev_s@miras.edu.kz, +7 747 121 7984.

Seitkhanova Ainur Kusbekovna – PhD, Associate Professor, A. Margulan Pavlodar Pedagogical University, 140000, Pavlodar, Kazakhstan, ainur1179@mail.ru, +7 705 834 7608.

Smailov Nurzhigit Kuralbaevich – the corresponding author, professor, PhD, Department of Electronics, Telecommunications and Space Technologies, Kazakh National Research Technical University after K.I. Satbayev, 050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, n.smailov@satbayev.university, +7 702 986 9486.

Yssyraiyl Kydyrali Musakhanuly – doctoral student, Department of Electronics, Telecommunications and Space Technologies, Kazakh National Research Technical University after K.I. Satbayev, 050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, kidir200091@gmail.com, +7 702 535 72 65.

Kuttybayeva Ainur Ermekkalievna – Associate Professor, Department of Electronics, Telecommunications and Space Technologies, Kazakh National Research Technical University after K.I. Satbayev, 050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, a.kuttybayeva@satbayev.university, +7 707 116 2790.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).