



XҒТАР 29.31.29
Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2025-152-3-41-55>

Ғарыш инфрақұрылымындағы деформацияны FBG сенсорларымен дәл бақылау

С.Ж. Көшкінбаев^{1,2}, Н.К. Смайлов^{*1}, А.К. Сейтханова³, Ж. Жаңатайұлы¹

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: smailov@satbayev.university)

Аңдатпа. Ғарыш инфрақұрылымындағы құрылымдық деформацияны дәл әрі үздіксіз бақылау ғарыш аппараттарының сенімділігі мен ұзақмерзімділігін қамтамасыз етудің негізгі шарты болып саналады. Ғарыштық орта табиғаты жағынан ерекше әрі күрделі: инфрақұрылым элементтері тұрақсыз механикалық жүктемелерге, зымыран ұшыру кезіндегі күшті дірілдерге, температураның күрт ауытқуларына және жоғары деңгейдегі радиациялық сәулеленуге жиі ұшырайды. Бұл факторлардың бірлескен әсері уақыт өте келе материалдардың қасиеттерін әлсіретіп, құрылымдық тозуды жылдамдатады, микроақаулардың пайда болуына ықпал етеді және қауіпті апаттық жағдайларға әкелуі мүмкін. Сондықтан ғарыш аппараттарының ұзақмерзімді қызметін қамтамасыз ету үшін олардың құрылымдық күйін нақты уақытта үздіксіз мониторингтеу қажеттілігі туындайды. Осы тұрғыда талшықты Брэгг торы (FBG) сенсорлары заманауи әрі тиімді шешім ретінде қарастырылады. Бұл сенсорлардың басты артықшылықтарына ықшамдылығы, жеңіл салмағы, электромагниттік кедергілерге төзімділігі, жоғары сезімталдығы және бір уақытта бірнеше параметрді өлшеу мүмкіндігі жатады. Мұндай сипаттамалар оларды ғарыштағы шектеулі масса мен энергия ресурстары жағдайында аса қолайлы етеді. Мақалада FBG сенсорларының жұмыс принциптері, Брэгг толқын ұзындығының температура мен деформацияға сезімталдық қасиеті, оларды ғарыштық құрылымдарға орнату әдістері және алынған деректерді интерпретациялау тәсілдері кеңінен талданады. Сонымен қатар, сенсорлардың радиациялық төзімділігі, температуралық бейімділігі және ғарыштағы қолдану тиімділігіне ерекше назар аударылады.

Түйін сөздер: FBG сенсоры, ғарыш инфрақұрылымы, құрылымдық деформация, оптикалық талшық, Брэгг торы, температураны бақылау

Жіберілді 08.08.2025. Өзгертілді 04.09.2025. Қабылданды 05.09.2025. Онлайн қол жетімді 30.09.2025.

¹*хат-хабар авторы

Кіріспе

Ғарыш инфрақұрылымының сенімділігі мен қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін құрылымдық деформацияларды дәл әрі үзіліссіз бақылау маңызды екені белгілі. Осы мақсатта соңғы жылдары FBG технологиясына негізделген сенсорлар кеңінен зерттелуде. FBG сенсорларын құрылымдық жүктемелерді бағалау үшін маңызды екенін көрсетті [1]. Бұл сенсорлар әртүрлі механикалық әсерлерге жауап беру қабілеті мен нақты уақыттағы ақпарат алмасу мүмкіндігімен ерекшеленеді. FBG сенсорлары температура мен механикалық деформацияны қатар өлшеу қабілетінің арқасында күрделі жағдайларда нақты мәлімет алуға мүмкіндігі ашылып отыр [2]. Ғарыштық аппараттың Қатты қону кезіндегі құрылым реакциясын әртүрлі жер беті жағдайларында зерттеген тәжірибелер де бұл сенсорлардың жоғары сезімталдығын растады [3]. Сонымен қатар, бірдей зерттеулер FBG сенсорларының сенімділігі мен температуралық тұрақтылығын тағы да айқындады [2].

Механикалық әсерлерді тіркеу мақсатында жүргізілген тәжірибелерде де FBG сенсорлары құрылымның уақытша жауаптарын дәл өлшей алатындығы анықталды [4]. Бұл сенсорлар гидравликалық жүйелердегі тербеліс пен жүктемелерді бақылау үшін де тиімді құралға айналды [5]. Ғарыш аппараттарының жылу оқшаулағыш қабаттарына енгізілген FBG сенсорлары құрылымда пайда болатын зақымдарды алдын-ала анықтауға мүмкіндік береді [6,7]. Мұндай бақылау жүйелері құрылымдық тұрақтылықты сақтаумен қатар ұзақ мерзімді ғарыш миссияларының қауіпсіздігін арттыруда маңызды рөл атқарады. Сонымен қатар, турбиналар мен күрделі құрылымдарда жүргізілген тербеліс мониторингі бұл сенсорлардың көпсалалы қолданысқа ие екенін дәлелдейді [5].

Ғарыш инфрақұрылымындағы құрылымдық деформацияларды жоғары дәлдікпен бақылау қазіргі заманғы ғарыштық инженериядағы маңызды міндеттердің бірі. FBG сенсорлары құрылымдық күйді бақылауға арналған аса тиімді технология ретінде кеңінен қолданылып келеді [8]. FBG сенсорлары жарықтың белгілі бір толқын ұзындығын шағылыстыратын торлы құрылымға негізделген, бұл қасиеті оны деформация мен температураның өзгеруін дәл тіркейтін құрал ете алады. Олардың нақты өлшем жүргізу қабілеті, электромагниттік кедергілерге төзімділігі және шағын көлемі ғарыштық жүйелерге біріктіруге аса қолайлы етеді [9]. Еске алатын тағы бір жағдай бір талшық бойымен бірнеше сенсор орнатуға мүмкіндік беретін мультиплекстеу қабілеті күрделі құрылымдардың кең аумақты мониторингін ұйымдастыруға жол ашады. FBG сенсорлары ғарыштық құрылымдарда орын алатын деформация процестерін нақты уақыт режимінде тіркеу арқылы құрылымдық тұтастықты бақылауға жол ашады. Бұл сенсорлар ғарыш аппараттарының жүктемеге ұшыраған бөліктеріндегі динамикалық өзгерістерді, тербеліс пен кернеуді үздіксіз бақылауға бағытталған жүйелерге оңай біріктіріледі [10]. Мысалы, оларды жылу оқшаулағыш қабаттармен біріктіру арқылы құрылым ішіндегі жылулық өзгерістер мен термиялық жүктемелерді де тіркеуге болады, бұл миссия тиімділігі мен ұзақ мерзімділігін біршама арттырады [11].

FBG технологияларын әртүрлі конфигурацияларда оңай орнатуға болады. Бұл сенсорлар үлкен панельдермен қоса тірек құрылымдарында әртүрлі аймақтарға

бейімделіп, сенсорлық желі құруды жеңілдетеді [12]. Осылайша, жүйе тек белгілі бір нүктелерде ғана емес, жалпы құрылым бойымен толық бақылау жүргізуге мүмкіндік береді. Бұл деформация процестерінің кеңістіктік таралуын нақты бағалауға және шекті жүктемелерді болжауға жол ашады [13]. FBG сенсорларының сезімталдығы мен дәлдігі, сондай-ақ ұзақ мерзімді тұрақтылығы олардың ғарыштық инфрақұрылымдағы тиімділігін арттырады. Олар құрылымның геометриялық өзгерістерін, жүктеме әсерінен туындаған кернеулерді және пішіндік ауытқуларды үнемі бақылап, құрылым қауіпсіздігін қамтамасыз етеді [14]. Ғарыштық антенналардың тербелісін тіркеу немесе күн батареясының панельдерін нақты туралау сынды міндеттерді шешу кезінде FBG сенсорлары аса маңызды рөл атқарады [15].

1-кесте. FBG сенсорларын ғарыштық құрылымдарда қолданудың жинақтық кестесі

№	Қолдану саласы	Функционалдық маңыздылығы	Қолданылған әдебиеттер
1	Температура және механикалық жүктеме мониторингі	Температура мен деформацияны бір сенсор арқылы қатар өлшейді	[2], [10], [6]
2	Тербеліс пен динамикалық жүктеме бақылауы	Турбиналарда және гидравликалық жүйелерде тербелістерді нақты уақыт режимінде анықтайды	[5], [4], [15]
3	Жылу оқшаулау құрылымдарын бақылау	FBG сенсорларын термоқабаттарға енгізу арқылы құбылысты ерте анықтауға болады	[7], [11], [6]
4	Ғарыш құрылымдарының тұтастығын сақтау	Құрылымдық күйді үздіксіз тіркеу арқылы шекті жүктемелерге дейінгі процестерді бақылау	[9], [10], [13]
5	Көпнүктелі кеңістіктік мониторинг	Бір талшық бойымен бірнеше сенсор орнатуға болады,	[8], [12], [13]

Әдістемелік материалдар

Ғарыш инфрақұрылымындағы құрылымдық деформацияны дәл бақылау ғарыш аппараттарының ұзақмерзімділігі мен қауіпсіздігін қамтамасыз етудегі негізгі мәселе. Дәстүрлі өлшеу құралдары экстремалды жағдайларда дәлдігін жоғалтады, сондықтан FBG сенсорлары перспективалы шешім ретінде ұсынылады [16]. FBG негізіндегі спектрлік бөлу әдісі құрылымдағы бүйірлік кернеулерді нақты және бағытталған түрде бақылауға мүмкіндік береді [17]. Сенсор модулін орнату кезінде сигналдың жоғалуын болдырмау үшін дәнекерлеу дәлдігі мен қорғаныш қабатының маңызы ерекше атап көрсетілген [18]. Сонымен қатар, температура мен деформация әсерін ажырату үшін компенсациялық әдістер мен алдын ала калибрлеу тәсілдері қолданылады [19].

Алынған нәтижелер FBG сенсорларының нақты уақыт режимінде деформацияны сенімді тіркей алатынын көрсетеді. Қажетті дәлдікке жету үшін референстік сенсорлар немесе арнайы талшық конфигурациялары енгізілген [18]. Зерттеулер FBG

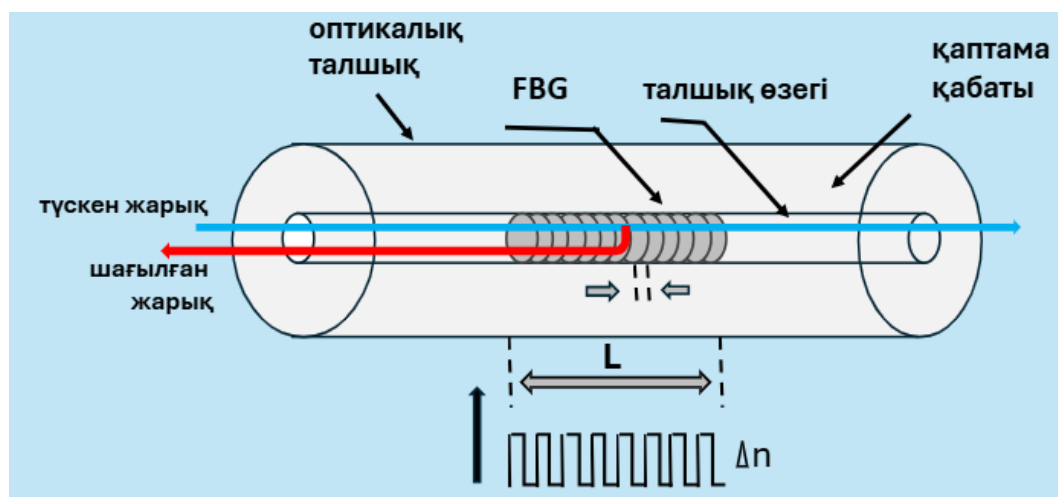
технологиясының ғарыштық мониторинг жүйелерінде қолдануға толық мүмкіндік беретінін көрсетеді [20].

Маңызды аспектілері. FBG сенсорларының физикалық принципі бірмодальді оптикалық талшық өзегіндегі периодты дифракциялық торға негізделген. Брэгг толқын ұзындығы сенсордың температура мен деформацияға жоғары сезімталдығын сипаттайды [21]. Бұл байланыс (1) және (2) формулалармен көрсетілген:

$$\lambda_B = 2 n_{eff} \Lambda_0 \quad (1)$$

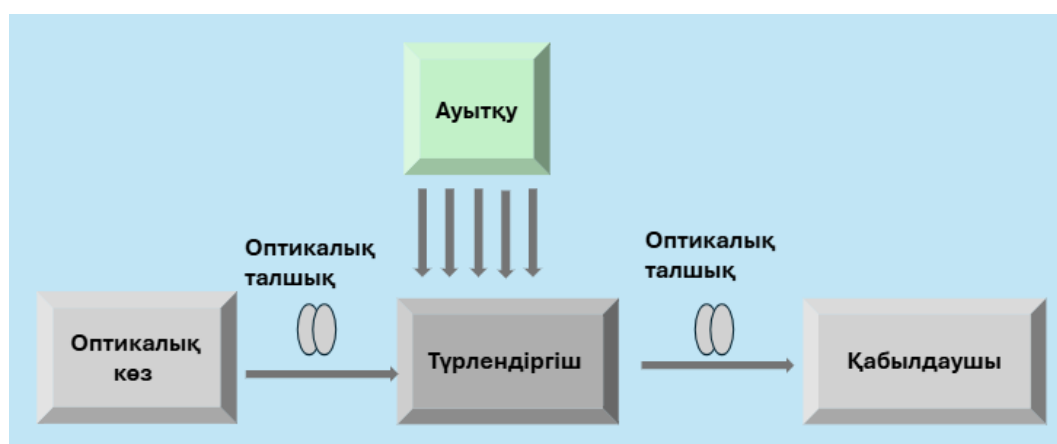
$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_f + \xi) \Delta T + (1 - P_e) \Delta \varepsilon \quad (2)$$

Бұл формулалар арқылы сенсордың жарықпен әрекеттесу механизмі түсіндіріледі [22]. Сондай-ақ, FBG торларын жасау процесінде лазерлік әдіспен талшық өзегіндегі сыну көрсеткішінің периодты модуляциясы жүзеге асырылады, бұл оның ғарыштағы қолданысына негіз болады [11].



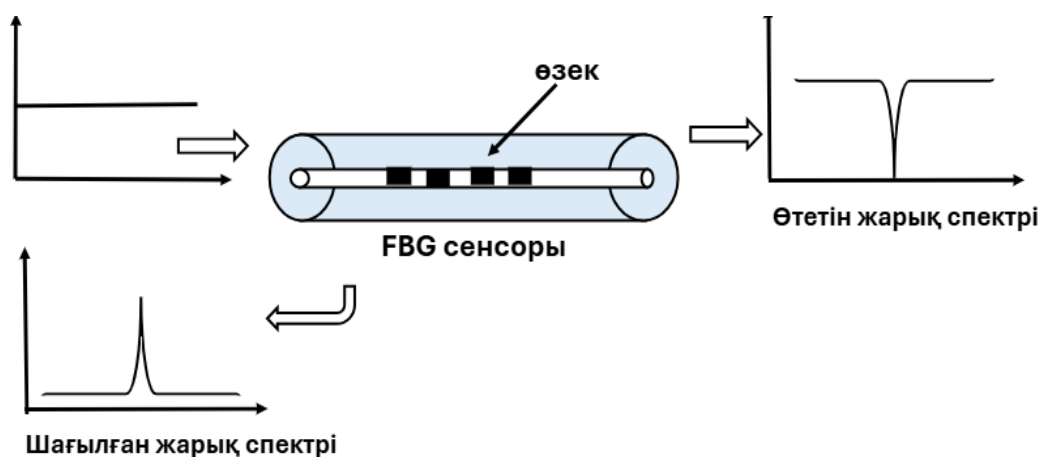
Сурет 1. FBG жұмыс істеу принципінің сызбасы

Талшықты сенсорлық жүйенің типтік блок-схемасы 2-суретте көрсетілген. Бұл арқылы сенсордың жұмыс істеуін түсіне аламыз. Ішкі сенсорларда оптикалық талшық түрлендіргіш рөлін атқарады және жарықтың қасиеттерін тікелей бұзылыстарға жауап ретінде модуляциялайды, ал сыртқы сенсорларда модуляциялау үшін сыртқы орта қолданылады. Схемаға көз жүгіртсек қабылдаушыға дейінгі орын алатын жағдайлар көрсетілген [24].



Сурет 2. Типтік оптикалық талшықты сенсорлық жүйенің блок-схемасы

Талшық кең спектрлі жарықпен сәулелендірілгенде, Брэгг торлары белгілі бір жарық спектрін Брэгг толқын ұзындығын шағылыстырады. Бұл спектрін Брэгг толқын ұзындығының мәні сенсор басына әсер ететін жылулық және механикалық өзгерістерге сәйкес ығысады, ал қалған жарық спектрі еркін өтіп отырады. FBG сенсорының жұмыс істеу принципі бойынша, шағылысқан жарықтың орталық толқын ұзындығы сенсорлық ақпарат көзі ретінде есептеледі. Бұл 3-суретте бейнеленген. [25]. Брэгг толқын ұзындығы тордың құрылымдық параметрлеріне сәйкес келеді, яғни ол Брэгг шартын қанағаттандырады. Суретте FBG сенсорының әсерін анық көре аламыз [26].



Сурет 3. FBG-нің әсерінің нәтижелік суреті

Жүйелі нәтижелерге қол жеткізу мақсатында бірінеше негізгі әдістерді айта кетейік :

1. Орнату әдістері.

Еркін кеңістік арқылы байланысқан FBG сенсорлары мен таратылған FBG массивтері ғарыш құрылымдарында сенсорларды қашықтан, сымсыз әрі жүйелі түрде орнатуға мүмкіндік беретін тиімді әдістер болып табылады; бұл тәсілдер радиацияға төзімді,

жеңіл конфигурация құруға мүмкіндік беріп, қанат, панель және корпус тәрізді кең беттерде деформацияны нақты әрі кең ауқымда бір мезетте өлшеуге жағдай жасайды [27, 17].

2. Деформация түрлерін анықтау дәлдігі

Көлденең кернеу мен бүйірлік деформацияны нақты уақыт режимінде жоғары дәлдікпен өлшеуге мүмкіндік беретін спектрді бөлу әдісі мен діріл мен температураны бір мезетте бір ғана FBG сенсоры арқылы бақылауға мүмкіндік беретін интегралды тәсіл ғарыш кемелерінің механикалық күйін тұрақты әрі жедел қадағалауға, сондай-ақ көпдеңгейлі құрылымдардағы динамикалық деформацияларды тиімді анықтауға жағдай жасайды [29, 30].

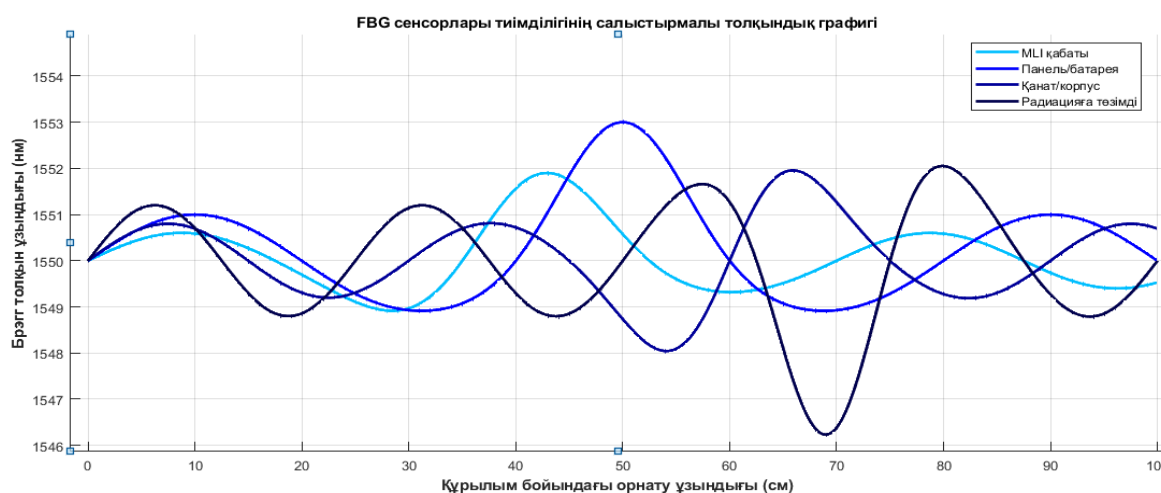
3. Тұрақтылық әдісі бойынша

Радиациялық әсер мен температуралық өзгерістерге төзімділік FBG сенсорларының ғарыштық ортада сенімді жұмыс істеуінің маңызды шарттарының бірі. Арнайы қатайтылған FBG сенсорлары ғарыштағы жоғары радиация деңгейіне төтеп беріп, ұзақмерзімді және тұрақты өлшемдер алуға мүмкіндік береді, бұл оларды ғарыш миссияларында құрылымдық күйді үздіксіз бақылауға тиімді құрал етеді [31]. Сонымен қатар, температураның күрт ауытқуына бейімделу үшін машиналық оқыту әдістерімен біріктірілген өзін-өзі қалпына келтіретін FBG жүйелері өлшеу дәлдігін арттырып, қатал жағдайларда да деректер сапасын сақтай отырып, сенсордың жалпы тұрақтылығын қамтамасыз етеді [27].

Нәтижелер мен талдаулар

Осы мақалада қарастырылған талдау нәтижелері FBG сенсорларының ғарыш инфра-құрылымындағы құрылымдық деформацияларды нақты уақыт режимінде және жоғары дәлдікпен тіркеуге қабілетті екенін көрсететін болады. Көрсетілген әртүрлі механикалық және температуралық әсерлер жағдайында сенсорлардың сезімталдығы, тұрақтылығы және сенімділігі тәжірибелік деректерге сәйкес бірқатар нәтижелер аламыз. Зерттеу барысында алынған спектрлік ауытқулар, деформацияға жауап беру уақыты мен температуралық компенсация әдістерінің тиімділігі FBG технологиясының ғарыштық қолданбалар үшін болашағы зор екенін дәлелдейтін болады. Бұдан бөлек, радиацияға төзімділігі күшейтілген сенсорлармен жүргізілген сынақтар олардың ұзақ мерзімді миссияларда қолдануға жарамдылығын нақтылай алуы. Алынған нәтижелер сенсор жүйелерін жетілдіруге, ғарыш инфрақұрылымының қауіпсіздігін арттыруға және құрылымдық тұтастықты үнемі бақылауға мүмкіндік беретініне көз жеткіземіз.

1. FBG сенсорларының орнатылу салалары бойынша тиімділік графигі 4-суретте көрсетілген. Бұл график осы бағытта зерттелген мәліметтерге сүйеніп matlab программасынан алынды. Бұл әртүрлі ғарыш құрылымдарында FBG сенсорларын орнатудың сезімталдық тиімділігі мен құрылымдық реакцияларға жауап беру қабілетін көрсетеді. Графиктің вертикаль осі толқын ұзындығының кеңістіктік амплитудасын сипаттаса, горизонталь осі құрылым бойынша кеңістіктік орынды немесе құрылым элементтерін білдіреді.



Сурет 4. FBG сенсорларының орнатылу салалары бойынша тиімділік графигі

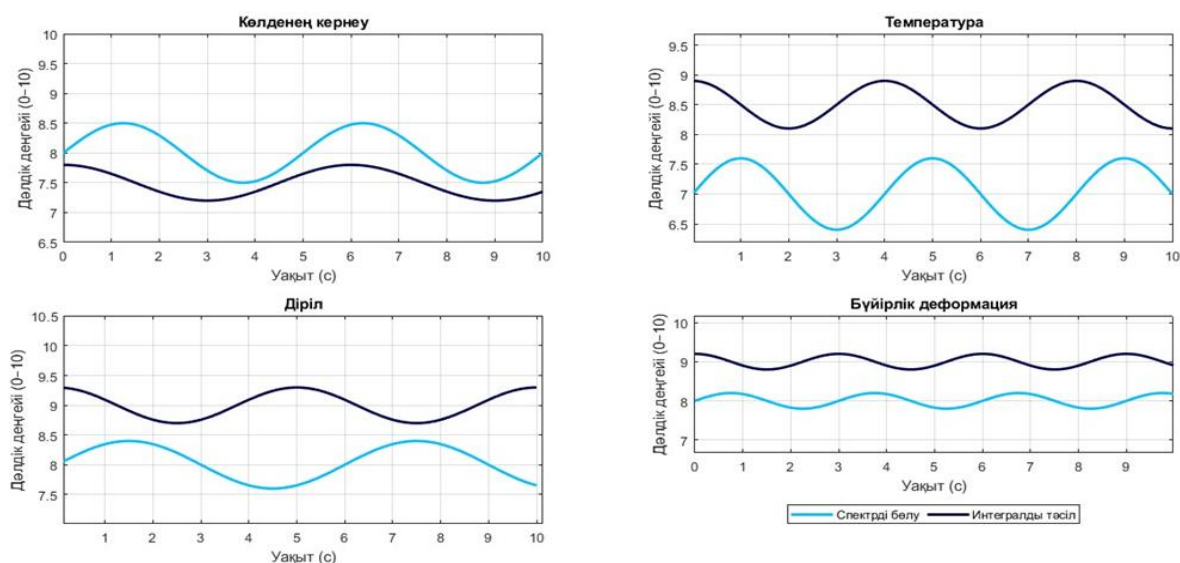
Бұл жерде: Амплитуда неғұрлым жоғары болса – сенсор деформацияны соғұрлым нақты әрі қарқынды сезеді.

Период қысқарған сайын – сенсор тез өзгертін динамикалық процестерге бейім келеді.

Толқын сипаты – орнатылған құрылым типінің механикалық жүктемесіне тәуелді.

2. FBG сенсорларының деформация түрлері бойынша дәлдік динамикасын сипаттайтын график 5-суретте көрсетілген. Matlab программасына қолданылған әдебиеттердегі зерттеулерге сүйеніп алынды. Бұл жерде график FBG сенсорларының әртүрлі құрылымдық деформация түрлерін анықтаудағы уақыт ішіндегі сезімталдық дәлдігін сипаттайды. График төрт түрлі деформацияға бөлінген: көлденең кернеу, температуралық өзгеріс, діріл және бүйірлік деформация.

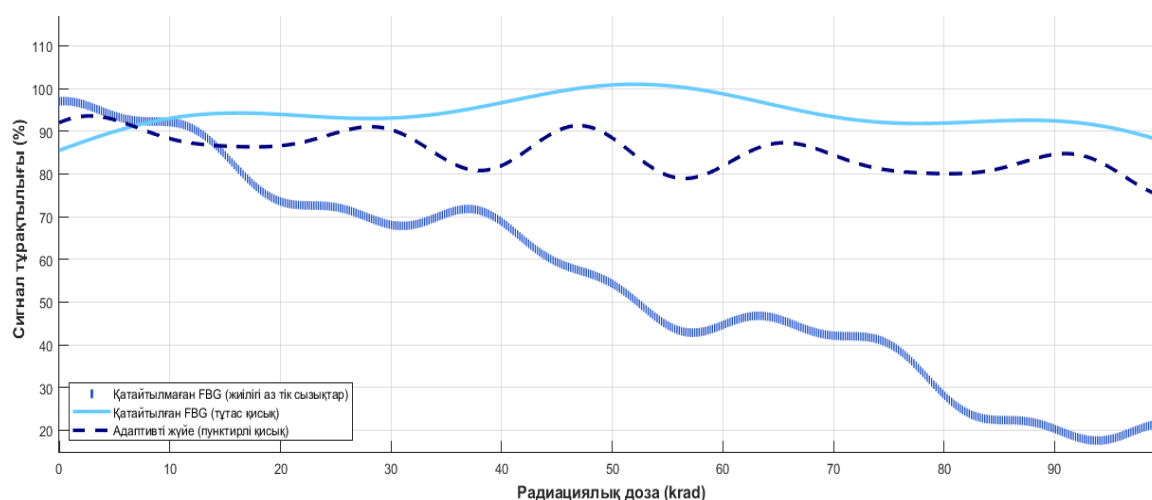
Әр графикте екі сенсорлық әдістің – спектрді бөлу (ашық көк) және интегралды тәсіл (қою көк) – уақыт осі бойындағы реакциялары бейнеленеді.



Сурет 5. FBG сенсорларын деформация салалары бойынша салыстыру

FBG сенсорларының радиациялық ортадағы тұрақтылығын сипаттайтын график 6 – суретте көрсетілген. Сызбадағы гарфиктер сілтемедегі әдебиеттерден және сыртқы мәлімет көздеріне негізделіп matlab программасынан алдық. Бұл жерде әртүрлі конфигурациядағы FBG сенсорларының радиациялық дозаның артуына байланысты сигнал тұрақтылығының өзгерісі бейнеленген. Диаграмма сенсорлардың нақты жұмыс шарттарында қаншалықты сенімді және дәл өлшем бере алатынын салыстырмалы түрде анықтауға мүмкіндік береді.

Горизонталь ось радиациялық дозаны көрсетсе, вертикаль ось сенсордың сигналдық тұрақтылық деңгейін пайыздық өлшемде сипаттайды. Сигнал тұрақтылығы сенсордың деформация немесе температура сияқты параметрлерді дұрыс, үзіліссіз және ауытқусыз тіркей алу қабілетін көрсететін маңызды көрсеткіш.



Сурет 6. FBG сенсорлары: радиациялық әсерге байланысты тұрақтылық

Қорытынды

Ғарыш инфрақұрылымының қауіпсіздігі мен ұзақмерзімділігін қамтамасыз ету үшін құрылымдық деформацияларды нақты әрі үздіксіз бақылау басты талаптарының бірі екенін байқадық. Осы мақалада талданған FBG сенсорлары қажетті дәлдік, сезімталдық және тұрақтылық көрсеткіштері бойынша жоғары тиімді құрал екенін көрсетті. FBG сенсорларының негізгі артықшылықтарын: температура мен деформацияны бір уақытта өлшеу мүмкіндігі, электромагниттік кедергілерге төзімділігі т.б. мүмкіндігін қысқаша анықтадық.

Зерттеу нәтижелері сенсорлар тербеліс, температура, көлденең және бүйірлік деформация сияқты көптеген параметрлерді жоғары дәлдікпен өлшей отырып, ғарыш аппараттарының құрылымдық тұтастығын үздіксіз бақылауға мүмкіндік бере алатыны қысқаша дәлелденді. FBG сенсорлары ғарыш инфрақұрылымындағы құрылымдық денсаулықты бағалау мен деформация мониторингі үшін сенімді әрі жан-жақты шешім ретінде танылып, Алдағы уақытта одан әрі дамуы ғарыш саласындағы қауіпсіздік пен тиімділікті жаңа деңгейге көтеретін болады.

Алғыс айту, мүдделер қайшылығы

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті тарапынан қаржыландырылды (Грант ИРН AP26197431, «Талшықты Брэгг торларын пайдалана отырып, ғарыштық инфрақұрылымдағы деформацияларды жоғары дәлдікпен бақылауға арналған құрылымдар мен технологияларды әзірлеу»).

Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

Авторлардың үлестері. Н.К. Смайлов, С.Ж. Көшкінбаев, А.К. Сейтханова, Ж. Жаңатайұлы: концептуализация, зерттеу, әдістеме, визуализация, түпнұсқалық жазу, бақылау, ресурстар, шолу, редакциялау және қаржыландыру

Әдебиеттер тізімі

Angela Brindisi, Cristian Vendittozzi, Lidia Travascio, Luigi Di Palma, Michele Ignarra, Vincenzo Fiorillo, Antonio Concilio. A Preliminary Assessment of an FBG-Based Hard Landing Monitoring System, *Photonics* 8, 450 (2021). <https://doi.org/10.3390/photonics8100450>

Fuling Yang, Kehui Zhu, Xiaoyi Yu, Tianze Liu, Ke Lu, Zelong Wang, Yan Li. Air Gap Fiber Bragg Grating for Simultaneous Strain and Temperature Measurement, *Micromachines* 15(1), 140 (2024). <https://doi.org/10.3390/mi15010140>

Angela Brindisi, Cristian Vendittozzi, Lidia Travasci, Marika Belardo, Michele Ignarra, Vincenzo Fiorillo, Antonio Concilio. An FBG-Based Hard Landing Monitoring System: Assessment for Drops on Different Soils, *Photonics* 12(3), 197(2025). <https://doi.org/10.3390/photonics12030197>

Dmitry Kiesewetter, Sergey Krivosheev, Sergey Magazinov, Victor Malyugin, Sergey Varzhel, Elizaveta Loseva, Sauletbek Koshkinbayev, Nurzhigit Smailov. Application of Fiber Bragg Gratings as a Sensor of Pulsed Mechanical Action, *Sensors* 22(19), 7289(2022). <https://doi.org/10.3390/s22197289>

Xavier Sánchez-Botello, Rafael Roig, Oscar de la Torre, Javier Madrigal, Salvador Sales, Xavier Escaler. Assessment of Fiber Bragg Grating Sensors for Monitoring Shaft Vibrations of Hydraulic Turbines, *Sensors* 23(15), 6695(2023). <https://doi.org/10.3390/s23156695>

Guang Yan, Boli Wan, Heng Huang, Wuyi Li. Damage and Failure Monitoring of Aerospace Insulation Layers Based on Embedded Fiber Bragg Grating Sensors, *Polymers* 16(24), 3543(2024). <https://doi.org/10.3390/polym16243543>

Gang Wang, Jiajian Wang, Jian Meng, Liang Ren, Xing Fu. Design, Calibration, and Application of a Wide-Range Fiber Bragg Grating Strain Sensor, *Sensors* 25(4), 1192(2025). <https://doi.org/10.3390/s25041192>

Kangyu Chen, Hengzhen Fan, Hong Bao. Discontinuous Deformation Monitoring of Smart Aerospace Structures Based on Hybrid Reconstruction Strategy and Fiber Bragg Grating, *Sensors* 24(11), 3603(2024). <https://doi.org/10.3390/s24113603>

Ana Fernández-Medina, Malte Frövel, Raquel López Heredero, Tomás Belenguer, Antonia de la Torre, Carolina Moravec, Ricardo San Julián, Alejandro Gonzalo, María Cebollero, Alberto Álvarez-Herrero. Embedded Fiber Bragg Grating Sensors for Monitoring Temperature and Thermo-Elastic Deformations in a Carbon Fiber Optical Bench, *Sensors* 23(14), 6499(2023). <https://doi.org/10.3390/s23146499>

Hun-Kook Choi, Young-Jun Jung, Bong-Ahn Yu, Jae-Hee Sung, Ik-Bu Sohn, Jong-Yeol Kim, Md. Shamim Ahsan. Femtosecond-Laser-Assisted Fabrication of Radiation-Resistant Fiber Bragg Grating Sensors, *Appl. Sci.* 12(2), 886(2022). <https://doi.org/10.3390/app12020886>

Alessandro Aimasso, Carlo Giovanni Ferro, Matteo Bertone, Matteo D. L. Dalla Vedova, Paolo Maggiore. Fiber Bragg Grating Sensor Networks Enhance the In Situ Real-Time Monitoring Capabilities of MLI Thermal Blankets for Space Applications *Micromachines* 14(5), 926(2023). <https://doi.org/10.3390/mi14050926>

Alaa N.D. Alhussein, Mohammed R.T. M. Qaid, Timur Agliullin, Bulat Valeev, Oleg Morozov and Airat Sakhabutdinov. Fiber Bragg Grating Sensors: Design, Applications, and Comparison with Other Sensing Technologies, *Sensors* 25(7), 2289 (2025). <https://doi.org/10.3390/s25072289>

Damien Kinet, Patrice Mégret, Keith W. Goossen, Liang Qiu, Dirk Heider, Christophe Caucheteur. Fiber Bragg Grating Sensors toward Structural Health Monitoring in Composite Materials: Challenges and Solutions, *Sensors* 14(4), 7394-7419(2014). <https://doi.org/10.3390/s140407394>

Manuel González-Gallego, Félix Terroba Ramírez, Juan Luis Martínez-Vicente, Miguel González del Val, Juan José López-Cela, Malte Frövel. Fiber Bragg Gratings Sensor Strain-Optic Behavior with Different Polymeric Coatings Subjected to Transverse Strain, *Polymers* 16(9), 1223(2024). <https://doi.org/10.3390/polym16091223>

Zhen Ma, Xiyuan Chen. Fiber Bragg Gratings Sensors for Aircraft Wing Shape Measurement: Recent Applications and Technical Analysis, *Sensors* 19(1), 55(2019). <http://dx.doi.org/10.3390/s19010055>

Yifan, Shuidong Xiong, Ji Xia. An All-Fiber Optical Sensor Combined with FBG and CFBG-FP for Attitude Estimation, *Sensors* 22(15), 5562(2022). <https://doi.org/10.3390/s22155562>

Jie Xiong, Wen Zhang, Yanming Song, Ke Wen, Yinghao Zhou, Guanghui Chen, Lianqing Zhu. Spectral Splitting Sensing Using Optical Fiber Bragg Grating for Spacecraft Lateral Stress Health Monitoring, *Appl. Sci.* 13(7), 4161(2023). <https://doi.org/10.3390/app13074161>

Alfredo Guemes, Luis Eduardo Mujica, Daniel del-Río-Velilla, Antonio Fernandez-Lopez. Structural Health Monitoring by Fiber Optic Sensors, *Photonics* 12(6), 604(2025). <https://doi.org/10.3390/photonics12060604>

Shiuh-Chuan Her, Wei-Nan Lin. Simultaneous Measurement of Temperature and Mechanical Strain Using a Fiber Bragg Grating Sensor, *Sensors* 20(15), 4223(2020). <http://dx.doi.org/10.3390/s20154223>

Antreas Theodosiou. Recent Advances in Fiber Bragg Grating Sensing, *Sensors* 24(2), 532(2024). <https://doi.org/10.3390/s24020532>

Qi Wu, Yoji Okabe, Fengming Yu. Ultrasonic Structural Health Monitoring Using Fiber Bragg Grating, *Sensors* 18(10), 3395(2018). <http://dx.doi.org/10.3390/s18103395>

Lei Zhang, Bin Shi, Luigi Zeni, Aldo Minardo, Honghu Zhu, Lixiang Jia. An Fiber Bragg Grating-Based Monitoring System for Slope Deformation Studies in Geotechnical Centrifuges, *Sensors* 19(7), 1591(2019) <http://dx.doi.org/10.3390/s19071591>

Veeresh Ramnarine, Vidyadhar Peesapati, Siniša Djurović. Fiber Bragg Grating Sensors for Condition Monitoring of High-Voltage Assets: A Review, *Energies* 16(18), 6709(2023). <https://doi.org/10.3390/en16186709>

Asep Andi Suryandi, Nur Sarma, Anees Mohammed, Vidyadhar Peesapati, Siniša Djurović. Fiber Optic Fiber Bragg Grating Sensing for Monitoring and Testing of Electric Machinery: Current State of the Art and Outlook, *Machines* 10(11), 1103(2022). <https://doi.org/10.3390/machines10111103>

Shengtao Niu, Ru Li. The Enhanced Measurement Method Based on Fiber Bragg Grating Sensor for Structural Health Monitoring, *Micromachines* 16(4), 368(2025). <https://doi.org/10.3390/mi16040368>

Michael Augustine Arockiyadoss, Amare Mulatie Dehnaw, Yibeltal Chanie Manie, Stotaw Talbachew Hayle, Cheng-Kai Yao, Chun-Hsiang Peng, Pradeep Kumar, Peng-Chun Peng. Self-Healing Fiber Bragg

Grating Sensor System Using Free-Space Optics Link and Machine Learning for Enhancing Temperature Measurement, Electronics 13(7), 1276(2024). <https://doi.org/10.3390/electronics13071276>

Zhen Ma, Xiyuan Chen, Cundeng Wang, Bingbo Cui. Real-Time Wing Deformation Monitoring via Distributed Fiber Bragg Grating and Adaptive Federated Filtering, Sensors 25(14), 4343(2025). <https://doi.org/10.3390/s25144343>

Cheng-Kai Yao, Pradeep Kumar, Bing-Xian Liu, Amare Mulatie Dehnaw and Peng-Chun Peng. Simultaneous Vibration and Temperature Real-Time Monitoring Using Single Fiber Bragg Grating and Free Space Optics, Appl. Sci. 14(23), 11099(2024). <https://doi.org/10.3390/app142311099>

Adriana Morana, Emmanuel Marin, Laurent Lablonde, Thomas Blanchet, Thierry Robin, Guy Cheymol, Guillaume Laffont, Aziz Boukenter, Youcef Ouerdane, Sylvain Girard. Radiation Effects on Fiber Bragg Gratings: Vulnerability and Hardening Studies, Sensors 22(21), 8175(2022). <https://doi.org/10.3390/s22218175>

С.Ж. Кошкинбаев^{1,2}, Н.К. Смайлов*¹, А.К. Сейтханова³, Ж. Жанатайұлы¹

¹Казахский национальный технический университет им. К. Сатпаева, Алматы, Казахстан

²Университет Мирас, Шымкент, Казахстан

³Павлодарский педагогический университет им. Алкея Маргулана, Павлодар, Казахстан

(E-mail:smailov@satbayev.university)

Точный контроль деформации в космической инфраструктуре с помощью датчиков FBG

Аннотация. Точный и непрерывный мониторинг структурных деформаций в космической инфраструктуре является ключевым условием обеспечения надежности и долговечности космических аппаратов. Космическая среда по своей природе уникальна и сложна: элементы инфраструктуры подвергаются нестабильным механическим нагрузкам, сильным вибрациям при запуске ракет, резким колебаниям температуры и высокому уровню радиации. Совокупное воздействие этих факторов со временем ослабляет свойства материалов, ускоряет структурное старение, способствует возникновению микродефектов и может привести к аварийным ситуациям. Поэтому для гарантии долгосрочной эксплуатации космических аппаратов необходимо осуществлять непрерывный мониторинг их структурного состояния в режиме реального времени. В этом контексте волоконные решётки Брэгга (FBG) рассматриваются как современное и эффективное решение. Их основные преимущества включают компактность, малый вес, устойчивость к электромагнитным помехам, высокую чувствительность и возможность одновременного измерения нескольких параметров. Такие характеристики делают их особенно подходящими в условиях ограниченных ресурсов массы и энергии в космосе. В статье подробно анализируются принципы работы FBG-сенсоров, чувствительность брэгговской длины волны к температуре и деформации, методы их интеграции в космические конструкции и подходы к интерпретации полученных данных. Кроме того, особое внимание уделяется радиационной стойкости, температурной адаптивности и общей эффективности применения данных сенсоров в космических условиях.

Ключевые слова: датчик FBG, космическая инфраструктура, структурная деформация, оптическое волокно, сетка Брэгга, контроль температуры

S.Zh. Koshkinbaev^{1,2}, N.K. Smailov^{*1}, A.K. Seytkhanova³, Zh. Zhanatayuly¹

¹*Kazakh National Technical University named after K. Satpayev, Almaty, Kazakhstan*

²*Miras University, Shymkent, Kazakhstan*

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

(E-mail: smailov@satbayev.university)

Precise control of deformation in space infrastructure with FBG sensors

Abstract. Accurate and continuous monitoring of structural deformation in space infrastructure is a key factor in ensuring the reliability and long-term operation of spacecraft. The space environment is inherently unique and complex: infrastructure elements are frequently exposed to unstable mechanical loads, strong vibrations during rocket launches, abrupt temperature fluctuations, and high levels of radiation. The combined influence of these factors gradually weakens material properties, accelerates structural degradation, promotes the formation of micro-defects, and may ultimately lead to hazardous failures. Therefore, real-time continuous monitoring of the structural state is essential to guarantee the long-term performance of spacecraft. In this regard, Fiber Bragg Grating (FBG) sensors are considered a modern and effective solution. Their main advantages include compact size, lightweight, resistance to electromagnetic interference, high sensitivity, and the ability to measure multiple parameters simultaneously. Such characteristics make them highly suitable under the limited mass and energy resources available in space. This article provides a comprehensive analysis of the working principles of FBG sensors, the sensitivity of Bragg wavelength to temperature and strain, installation techniques on space structures, and approaches for interpreting the acquired data. Furthermore, particular attention is given to the radiation resistance, thermal adaptability, and overall effectiveness of these sensors in space applications.

Keywords: FBG sensor, space infrastructure, structural deformation, optical fiber, Bragg mesh, temperature control.

References

Angela Brindisi, Cristian Vendittozzi, Lidia Travascio, Luigi Di Palma, Michele Ignarra, Vincenzo Fiorillo, Antonio Concilio. A Preliminary Assessment of an FBG-Based Hard Landing Monitoring System, *Photonics* 8, 450 (2021). <https://doi.org/10.3390/photonics8100450>

Fuling Yang, Kehui Zhu, Xiaoyi Yu, Tianze Liu, Ke Lu, Zelong Wang, Yan Li. Air Gap Fiber Bragg Grating for Simultaneous Strain and Temperature Measurement, *Micromachines* 15(1), 140 (2024). <https://doi.org/10.3390/mi15010140>

Angela Brindisi, Cristian Vendittozzi, Lidia Travasci, Marika Belardo, Michele Ignarra, Vincenzo Fiorillo, Antonio Concilio. An FBG-Based Hard Landing Monitoring System: Assessment for Drops on Different Soils, *Photonics* 12(3), 197(2025). <https://doi.org/10.3390/photonics12030197>

Dmitry Kiesewetter, Sergey Krivosheev, Sergey Magazinov, Victor Malyugin, Sergey Varzhel, Elizaveta Loseva, Sauletbek Koshkinbayev, Nurzhigit Smailov. Application of Fiber Bragg Gratings as a Sensor of Pulsed Mechanical Action, *Sensors* 22(19), 7289(2022). <https://doi.org/10.3390/s22197289>

Xavier Sánchez-Botello, Rafel Roig, Oscar de la Torre, Javier Madrigal, Salvador Sales, Xavier Escaler. Assessment of Fiber Bragg Grating Sensors for Monitoring Shaft Vibrations of Hydraulic Turbines, *Sensors* 23(15), 6695(2023). <https://doi.org/10.3390/s23156695>

Guang Yan, Boli Wan, Heng Huang, Wuyi Li. Damage and Failure Monitoring of Aerospace Insulation Layers Based on Embedded Fiber Bragg Grating Sensors, *Polymers* 16(24), 3543(2024). <https://doi.org/10.3390/polym16243543>

Gang Wang, Jiajian Wang, Jian Meng, Liang Ren, Xing Fu. Design, Calibration, and Application of a Wide-Range Fiber Bragg Grating Strain Sensor, *Sensors* 25(4), 1192(2025). <https://doi.org/10.3390/s25041192>

Kangyu Chen, Hengzhen Fan, Hong Bao. Discontinuous Deformation Monitoring of Smart Aerospace Structures Based on Hybrid Reconstruction Strategy and Fiber Bragg Grating, *Sensors* 24(11), 3603(2024). <https://doi.org/10.3390/s24113603>

Ana Fernández-Medina, Malte Frövel, Raquel López Heredero, Tomás Belenguer, Antonia de la Torre, Carolina Moravec, Ricardo San Julián, Alejandro Gonzalo, María Cebollero, Alberto Álvarez-Herrero. Embedded Fiber Bragg Grating Sensors for Monitoring Temperature and Thermo-Elastic Deformations in a Carbon Fiber Optical Bench, *Sensors* 23(14), 6499(2023). <https://doi.org/10.3390/s23146499>

Hun-Kook Choi, Young-Jun Jung, Bong-Ahn Yu, Jae-Hee Sung, Ik-Bu Sohn, Jong-Yeol Kim, Md. Shamim Ahsan. Femtosecond-Laser-Assisted Fabrication of Radiation-Resistant Fiber Bragg Grating Sensors, *Appl. Sci.* 12(2), 886(2022). <https://doi.org/10.3390/app12020886>

Alessandro Aimasso, Carlo Giovanni Ferro, Matteo Bertone, Matteo D. L. Dalla Vedova, Paolo Maggiore. Fiber Bragg Grating Sensor Networks Enhance the In Situ Real-Time Monitoring Capabilities of MLI Thermal Blankets for Space Applications *Micromachines* 14(5), 926(2023). <https://doi.org/10.3390/mi14050926>

Alaa N. D. Alhussein, Mohammed R. T. M. Qaid, Timur Agliullin, Bulat Valeev, Oleg Morozov and Airat Sakhabutdinov. Fiber Bragg Grating Sensors: Design, Applications, and Comparison with Other Sensing Technologies, *Sensors* 25(7), 2289 (2025). <https://doi.org/10.3390/s25072289>

Damien Kinet, Patrice Mégret, Keith W. Goossen, Liang Qiu, Dirk Heider, Christophe Caucheteur. Fiber Bragg Grating Sensors toward Structural Health Monitoring in Composite Materials: Challenges and Solutions, *Sensors* 14(4), 7394-7419(2014). <https://doi.org/10.3390/s140407394>

Manuel González-Gallego, Félix Terroba Ramírez, Juan Luis Martínez-Vicente, Miguel González del Val, Juan José López-Cela, Malte Frövel. Fiber Bragg Gratings Sensor Strain-Optic Behavior with Different Polymeric Coatings Subjected to Transverse Strain, *Polymers* 16(9), 1223(2024). <https://doi.org/10.3390/polym16091223>

Zhen Ma, Xiyuan Chen. Fiber Bragg Gratings Sensors for Aircraft Wing Shape Measurement: Recent Applications and Technical Analysis, *Sensors* 19(1), 55(2019). <http://dx.doi.org/10.3390/s19010055>

Yifan, Shuidong Xiong, Ji Xia. An All-Fiber Optical Sensor Combined with FBG and CFBG-FP for Attitude Estimation, *Sensors* 22(15), 5562(2022). <https://doi.org/10.3390/s22155562>

Jie Xiong, Wen Zhang, Yanming Song, Ke Wen, Yinghao Zhou, Guanghui Chen, Lianqing Zhu. Spectral Splitting Sensing Using Optical Fiber Bragg Grating for Spacecraft Lateral Stress Health Monitoring, *Appl. Sci.* 13(7), 4161(2023). <https://doi.org/10.3390/app13074161>

Alfredo Guemes, Luis Eduardo Mujica, Daniel del-Río-Velilla, Antonio Fernández-López. Structural Health Monitoring by Fiber Optic Sensors, *Photonics* 12(6), 604(2025). <https://doi.org/10.3390/photonics12060604>

Shiuh-Chuan Her, Wei-Nan Lin. Simultaneous Measurement of Temperature and Mechanical Strain Using a Fiber Bragg Grating Sensor, *Sensors* 20(15), 4223(2020). <http://dx.doi.org/10.3390/s20154223>

Antreas Theodosiou. Recent Advances in Fiber Bragg Grating Sensing, *Sensors* 24(2), 532(2024). <https://doi.org/10.3390/s24020532>

Qi Wu, Yoji Okabe, Fengming Yu. Ultrasonic Structural Health Monitoring Using Fiber Bragg Grating, *Sensors* 18(10), 3395(2018). <http://dx.doi.org/10.3390/s18103395>

Lei Zhang, Bin Shi, Luigi Zeni, Aldo Minardo, Honghu Zhu, Lixiang Jia. An Fiber Bragg Grating-Based Monitoring System for Slope Deformation Studies in Geotechnical Centrifuges, *Sensors* 19(7), 1591(2019) <http://dx.doi.org/10.3390/s19071591>

Veeresh Ramnarine, Vidyadhar Peesapati, Siniša Djurović. Fiber Bragg Grating Sensors for Condition Monitoring of High-Voltage Assets: A Review, *Energies* 16(18), 6709(2023). <https://doi.org/10.3390/en16186709>

Asep Andi Suryandi, Nur Sarma, Anees Mohammed, Vidyadhar Peesapati, Siniša Djurović. Fiber Optic Fiber Bragg Grating Sensing for Monitoring and Testing of Electric Machinery: Current State of the Art and Outlook, *Machines* 10(11), 1103(2022). <https://doi.org/10.3390/machines10111103>

Shengtao Niu, Ru Li. The Enhanced Measurement Method Based on Fiber Bragg Grating Sensor for Structural Health Monitoring, *Micromachines* 16(4), 368(2025). <https://doi.org/10.3390/mi16040368>

Michael Augustine Arockiyadoss, Amare Mulatie Dehnaw, Yibeltal Chanie Manie, Stotaw Talbachew Hayle, Cheng-Kai Yao, Chun-Hsiang Peng, Pradeep Kumar, Peng-Chun Peng. Self-Healing Fiber Bragg Grating Sensor System Using Free-Space Optics Link and Machine Learning for Enhancing Temperature Measurement, *Electronics* 13(7), 1276(2024). <https://doi.org/10.3390/electronics13071276>

Zhen Ma, Xiyuan Chen, Cundeng Wang, Bingbo Cui. Real-Time Wing Deformation Monitoring via Distributed Fiber Bragg Grating and Adaptive Federated Filtering, *Sensors* 25(14), 4343(2025). <https://doi.org/10.3390/s25144343>

Cheng-Kai Yao, Pradeep Kumar, Bing-Xian Liu, Amare Mulatie Dehnaw and Peng-Chun Peng. Simultaneous Vibration and Temperature Real-Time Monitoring Using Single Fiber Bragg Grating and Free Space Optics, *Appl. Sci.* 14(23), 11099(2024). <https://doi.org/10.3390/app142311099>

Adriana Morana, Emmanuel Marin, Laurent Lablonde, Thomas Blanchet, Thierry Robin, Guy Cheymol, Guillaume Laffont, Aziz Boukenter, Youcef Ouerdane, Sylvain Girard. Radiation Effects on Fiber Bragg Gratings: Vulnerability and Hardening Studies, *Sensors* 22(21), 8175(2022). <https://doi.org/10.3390/s22218175>

Авторлар туралы мәліметтер:

Көшкінбаев С.Ж. – PhD, қауымдастырылған профессоры, Қ.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық университеті, Алматы, Қазақстан «Мирас» университеті, 160000, Шымкент қ., Қазақстан.

Смайлов Н.Қ. – хат-хабар авторы, PhD, қауымдастырылған профессоры, Қ.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық университеті, 050013, Алматы, Қазақстан.

Сейтханова А.Қ. – PhD, қауымдастырылған профессоры, Ә.Марғұлан атындағы Павлодар педагогикалық университеті, 140000, Павлодар, Қазақстан.

Жаңатайұлы Ж. – «Ғарыштық техника және технология» мамандығы бойынша бакалавриant, электроника телекоммуникация және ғарыштық технология кафедрасы, Сәтбаев университеті, 050022, Алматы, Қазақстан.

Кошкинбаев С.Ж. – PhD, ассоциированный профессор, Казахский национальный технический университет имени К. Сатпаева, Алматы, Казахстан, Университет Мира, 160000, Шымкент, Казахстан.

Смайлов Н.К. – автор для корреспонденции, PhD, ассоциированный профессор, Казахский национальный технический университет имени К. Сатпаева, 050013, Алматы, Казахстан.

Сейтханова А.К. – PhD, ассоциированный профессор, НАО «Павлодарский педагогический университет имени А. Маргулана», 140000, г. Павлодар, Казахстан.

Жанатайұлы Ж. – бакалавр по специальности «Космическая техника и технологии», кафедра электроники телекоммуникаций и космических технологий, Университет им. Сатпаева, 050022, Алматы, Республика Казахстан.

Koshkinbayev S.Zh. – PhD, Associate Professor, Kazakh National Technical University, 160000, Almaty, Kazakhstan, Miras University, Shymkent, Kazakhstan.

Smailov N.K. – Corresponding Author, PhD, Associate Professor, K. Satpayev Kazakh National Technical University, 050013, Almaty, Kazakhstan.

Seitkhanova A.K. – PhD, Associate Professor, A. Margulan Pavlodar Pedagogical University, 140000, Pavlodar, Kazakhstan.

Zhanatayuly Zh. – bachelor student in "Space Engineering and Technology", Department of Electronics, Telecommunications and Space Technologies, Satbayev University, 050022, Almaty, Kazakhstan.



Copyright: © 2025 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/>).