ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

"Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті" коммерциялық емес акционерлік қоғамы

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

ӘОЖ 621.391:681,7.068 (043)

Қолжазба құқығында

Секенов Бейбарыс Нұртайұлы

Магистр академиялык дәрежесін алу үшін МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ

Диссертацияның атауы	Наноспутниктерге ғарыштық ортаның әсерін бақылау үшін
	талшықты-оптикалық температура сенсорларын зерттеу және жасау
Дайындау багыты	«7М07138 - Ғарыштық техника мен технологиялар»

Еылыми жетекші PhD докторы, профессор Смайлов Н.К. «1 » 105 2025 ж.

Пікір беруші Ғарыштық техника және технологиялар институтының директордың орынбасары,

T.F.K Инчин А.С. 06 2025 ж. « DS x

Норма бақылаушы т.ғ.м. оқытушы _____ Маткаримова А.А. «_05__» ____06___ 2025 ж.

KOPFAXTA ЖІБЕРІЛІЦ ЭТжГ7 кафедра ментерунисі т.г.к. кауым, профессор E Tannañ ОС 2025 ж.

Алматы 2025

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыш технологиялар кафедрасы

«7М07138 - Ғарыштық техника мен технологиялар»



Магистрлік диссертацияны орындауға

ТАПСЫРМА

Магистрант: Секенов Бейбарыс Нұртайұлы

Такырыбы: «Наноспутниктерге ғарыштық ортаның әсерін бақылау үшін талшықтыоптикалық температура сенсорларын зерттеу және жасау». Университет ректорының « 04 » /2 2023 ж. № 578-17/∂ бұйрығымен бекітілген

Аякталган диссертацияны тапсыру мерзімі: 50 05 2025 ж.

Магистрлік диссертацияның бастапқы деректері: 1. ГОСТ Р ISO 11551-2015 Оптика және оптикалық құрылғылар. Лазерлер және лазерлік кондырғылар (жүйелер). Оптикалық элементтермен лазерлік сәулеленудің жұтылу коэффициентін өлшеу әдістемесі. 2. ГОСТ Р 59166-2020 Бұл стандарт таратылған талпықты-оптикалық температура сенсорларына колданылады және олардың негізгі сипаттамаларын анықтау үшін сынақ әдістерін анықтайды. 3. ГОСТ 4401-81 Стандарт әус кемелерін есептеу мен жобалауда. геофизикалық және метеорологиялық бақылаулардың пәтижелерін өндеуде және әус кемелері мен олардың элементтерін сынау нәтижелерін бірдей шарттарға келтіруге арналған және Жердің жасанды серіктерінің баллистикалық есептеулеріне арналмаған. Магистрлік диссертацияда әзірлеуге жататын мәселелер тізімі:

а) Наноспутниктерде ғарыштық ортаның әсерін бақылаудың колданыстағы әдістеріне шолу және талпықты-оптикалық температура сенсорларының жұмыс принциптерін қарастыру. б) Гарыштық ортадағы температураны бақылауға арналған талшықты-оптикалық технологиялардың мумкіндіктері мен артықшылықтарын septiev. в) Сандық әдістерді пайдалана отырып, жылу процестерін және ТБТ сенсорларының эсерлерді модельдеу. сондай-ак датчиктіц жұмысына радиациялык гарыштық жағдайларға төзімділігін бағалау.

r) ТБТ датчиктерін дәстүрлі температураны өлшеу құралдарымен салыстырмалы талдау, оларды наноспутниктік жүйелерге біріктіру бойынша ұсыныстарды тұжырымдау.

Ұсынылатын негізгі әдебиеттер:

1. A. K. Reascos Portilla, D. A. Poiana, J. E. Posada Roman and J. A. Garcia Souto, "Fiber Optic Temperature Sensor for Nanosatellites," 2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Dubrovnik, Croatia, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/I2MTC43012.2020.9129125.

2. A. A. Kuznetsov, I. I. Vasilèv, S. R. Valiullin and K. A. Lipatnikov, "Fiber-Optical System for Measuring the Temperature of the KAI-1 Cubesat," 2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russian Federation, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/IEEECONF56737.2023.10092069.

3. A. Aimasso, M. D. L. Dalla Vedova, D. Janner, P. Maggiore and A. Rovera, "Influence of adhesive and application method on FBG temperature sensors for space applications," 2023 IEEE 10th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), Milan, Italy, 2023, pp. 492-497, doi: 10.1109/MetroAeroSpace57412.2023.10190035.

4. Mihailov S. J. et al. Extreme environment sensing using femtosecond laser-inscribed fiber Bragg gratings //Sensors. $-2017. - T. 17. - N_{\odot}. 12. - C. 2909.$

5. Berri P C, Dalla Vedova M D L, Maggiore P and Scolpito T 2019 Feasibility study of FBG-based sensors for prognostics in aerospace applications Journal of Physics: Conference Series 1249, 012015

6. Mikhailov, Petr and Ualiyev, Zhomart and Kabdoldina, Assem and Smailov, Nurzhigit and Khikmetov, Askar and Malikova, Feruza, Multifunctional fiber-optic sensors for space infrastructure (October 31, 2021). Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(5 (113), 80–89. doi:10.15587/1729-4061.2021.242995

7. Sekenov, B., Smailov, N., Tashtay, Y., Amir, A., Kuttybayeva, A., Tolemanova, A. (2024). Fiber-Optic Temperature Sensors for Monitoring the Influence of the Space Environment on Nanosatellites: A Review. In: Tuleshov, A., Jomartov, A., Ceccarelli, M. (eds) Advances in Asian Mechanism and Machine Science. Asian MMS 2024. Mechanisms and Machine Science, vol 167. Springer, Cham. <u>https://doi.org/10.1007/978-3-031-67569-0_42</u>

8. A. Kuttybayeva, A. Sabibolda, S. Kengesbayeva, M. Baigulbayeva, A. Amir and B. Sekenov, "Investigation of a Fiber Optic Laser Sensor with Grating Resonator Using Mirrors," 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon), Saint Petersburg, Russian Federation, 2024, pp. 709-711, doi: 10.1109/ElCon61730.2024.10468264.

9. Buchinger, Valentin. Life cycle monitoring of composite aircraft components with structural health monitoring technologies. Thesis or dissertation, Aeronautics, Imperial College London, <u>https://doi.org/10.25560/103527</u>

10. Смайлов, Н., Куттыбаева, А., Толеманова, А., Ысырайыл, Қ., & Секенов, Б. (2024). ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ В ЗДАНИЯХ ГОРОДА. Вестник КазАТК, 133(4), 353–367. <u>https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-133-4-353-367</u>

Магистрлік диссертацияны дайындау **KECTECI**

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге ұсыну мерзімдері	Ескерту
Наноспутниктерде температураны бақылау үшін қолданылатын тәсілдер мен технологияларды талдау	15.09.2023 ж. — 15.012.2023 ж.	орындалды
Гарыш жағдайларын ескере отырып талшықты-оптикалық сенсорларды әзірлеу әдістемесі	15.01.2024 ж. – 14.06.2024 ж.	орындалды
Гарыштық жағдайларда датчик жұмысын модельдеу және модельдеу	17.06.2024 ж. — 15.10.2024 ж	орындалды
ТБТ датчиктерін ғарышта қолданудың салыстырмалы талдауы және перспективалары	16.01.2025 ж. – 20.04.2025 ж.	орындалды

Аякталған магистрлік диссертация үшін, оған қатысты бөлімдердегі диссертация кеңесшілері мен норма бақылаушының қойған

колтаноалары					
Бөлімдер атауы	Кеңесшілер (аты, әкесінің аты, тегі, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы		
Магистрлік диссертация тақырыбын талдау Н.К.Смайлов		10.03.25	f. Cubeff		
Теориялық ақпарат ЭТжҒТ каф. профессоры, PhI Н.К.Смайлов		15.10.2024	h. Cueidefo		
Норма бақылау	ЭТжҒТ т.ғ.м., ассистент Маткаримова А.А.	05.06.2025	Der		

10 7701160 7001 I

Гылыми жетекшісі PhD докторы <u>Д. Селест</u> Смайлов II.К. Білім алушы тапсырманы орындауға алды <u>Д.</u> Секенов Б.Н.

Күні «<u>06</u>» <u>1</u><u>2023</u> ж.

ŝ

АҢДАТПА

Бұл диссертация ғарыштық ортаның наноспутниктерге әсерін бақылау үшін талшықты-оптикалық температура сенсорларының зерттеулері мен дамуын ұсынады. Оның ықшам өлшеміне, электромагниттік иммунитетіне және жоғары сезімталдығына байланысты Талшықты Брэгт торларының технологиясын қолдануға баса назар аударылады. Зерттеуге теориялық модельдеу, сандық модельдеу және термиялық цикл, вакуум және радиациялық әсер ету сияқты экстремалды кеңістік жағдайында ТБТ сенсорларының өнімділігін талдау кіреді. Дәлдік пен тұрақтылықты қамтамасыз ету үшін калибрлеу әдістері талқыланады. Нәтижелер ТБТ негізіндегі сенсорлардың салмағы мен күрделілігін азайта отырып, сенімді жылу деректерін қамтамасыз ететін наноспутниктік интеграцияға жарамды екенін көрсетеді. Бұл жұмыс келесі буын ғарыштық миссиялары үшін сенімді зондтау жүйелерін жетілдіруге ықпал етеді және болашақ бағыттарды, соның ішінде орбитада ұзақ мерзімді сынақтар мен материалдарды оңтайландыруды сипаттайды.

АННОТАЦИЯ

В данной диссертации представлены исследования и разработки волоконнооптических датчиков температуры для мониторинга воздействия космической среды на наноспутники. Особое внимание уделяется использованию технологии волоконной брэгговской решетки (BБР) из-за ее компактного размера, электромагнитной устойчивости и высокой чувствительности. Исследование включает теоретическое моделирование, численное моделирование и анализ производительности датчиков ВБР в экстремальных космических условиях, таких как термоциклирование, вакуум и воздействие радиации. Обсуждаются методы калибровки для обеспечения точности и стабильности. Результаты показывают, что датчики на основе ВБР подходят для интеграции наноспутников, предоставляя надежные тепловые данные при минимизации веса и сложности. Эта работа способствует развитию надежных систем датчиков для космических миссий следующего поколения и намечает будущие направления, включая долгосрочные испытания на орбите и оптимизацию материалов.

ANNOTATION

This thesis presents the research and development of fiber-optic temperature sensors for monitoring the effects of the space environment on nanosatellites. Emphasis is placed on the use of Fiber Bragg Grating (FBG) technology due to its compact size, electromagnetic immunity, and high sensitivity. The study includes theoretical modeling, numerical simulations, and performance analysis of FBG sensors under extreme space conditions such as thermal cycling, vacuum, and radiation exposure. Calibration methods are discussed to ensure accuracy and stability. The results demonstrate that FBG-based sensors are suitable for nanosatellite integration, providing reliable thermal data while minimizing weight and complexity. This work contributes to the advancement of robust sensing systems for next-generation space missions and outlines future directions including long-term in-orbit testing and material optimization.

МАЗМҰНЫ

Кірі	спе	7
1	Наноспутниктерге арналған талшықты-оптикалық температура	
1	сенсорларына шолу	8
1.1	Наноспутниктер және олардың жылулық ортасы	8
1.2	Қолданыстағы температураны анықтау технологиялары	9
1.3	Ғарыштық қолданбаларға арналған талшықты-оптикалық сенсорлар	11
2	Талшықты-оптикалық температура сенсорларының теориялық	17
	негіздері	17
2.1	Талшықты-оптикалық температура сенсорларының жұмыс істеу принциптері	17
2.2	Температураға сезімталдық және калибрлеу әдістері	21
2.3	Гарыштық сәулеленудің оптикаға әсері	23
2.4	Наноспутниктегі сенсорларды біріктіру	29
2	Наноспутниктерге арналған талшықты температура сенсорларын	
3	модельдеу әдістемесі	31
3.1	Математикалық негіздер	31
3.2	Жылулық талдау	32
33	Жылулық цикл кезіндегі ТБТ спектрлік реакциясы: сандық	
5.5	модельдеу	44
3.4	Анықтамалық сенсорлармен салыстыру	45
4	Имитациялық кеңістік жағдайында өнімділікті бағалау	47
4.1	Негізгі қорытындылар	47
4.2	Қолданыстағы сенсорлармен салыстыру	48
4.3	Потенциалды жақсартулар мен оңтайландырулар	48
Қор	ытынды	49
Пай,	даланылған әдебиет тізімі	50
Қосі	ымша А	56

Наноспутниктердің дамуы ғылыми, коммерциялық және білім беру миссиялары үшін ықшам, үнемді платформаларды ұсына отырып, ғарышқа қолжетімділікті түбегейлі өзгертті. Артықшылықтарына қарамастан, бұл шағын ғарыш аппараттары кең температура ауытқуларымен, вакуумдық жағдайлармен, иондаушы сәулеленумен және аспаптарға арналған шектеулі кеңістікпен сипатталатын өте қатал ортада жұмыс істейді. Батареялар, процессорлар және пайдалы жүктемелер сияқты маңызды ішкі жүйелердің тұрақтылығы мен сенімділігін қамтамасыз ету үшін температураны дәл бақылау өте маңызды.

Кәдімгі электронды температура сенсорлары, соның ішінде терможуптар мен қарсылық температура детекторлары (RTD), олардың көлемділігіне, электромагниттік кедергілерге (ЭМК) сезімталдығына және таратылған зонада қиындықтарға байланысты ғарыштық қолданбаларда шектеулерге тап болады. Нәтижесінде талшықты-оптикалық температура сенсорлары (ТОТС) əcipece талшықты Брэгг торларының -(ТБТ) негізіндегілер - ғарыштық деңгейдегі жылу мониторингі үшін перспективалы балама ретінде пайда болды.

Бұл зерттеудің негізгі мақсаты наноспутниктердің экстремалды экологиялық жағдайларында сенімді жұмыс істеуге қабілетті талшықтыоптикалық температура сенсорларын зерттеу, жобалау және модельдеу болып табылады. Бұған сенсордың сезімталдығын, калибрлеу әдістерін және радиация мен термиялық цикл сияқты ғарыштық факторларға төзімділікті бағалау кіреді.

Бұл жұмыстың ғылыми жаңалығы талшықты-оптикалық зондтау технологиясын наноспутниктік платформаларға жан-жақты интеграциялауда, соның ішінде орбитаға ұқсас жағдайларда ТБТ өнімділігін модельдеу негізінде талдау және дәстүрлі сенсорлармен салыстырмалы бағалау. Сонымен қатар, зерттеу кеңістіктегі төмен массалық, сенімділігі жоғары қолданбаларға бейімделген оңтайландырылған модельдеу әдістері мен калибрлеу стратегияларын ұсынады.

Бұл диссертация ықшам, радиацияға төзімді және жоғары сезімтал термиялық бақылау жүйелерін дамытуға ықпал етеді, осылайша келесі ұрпақ наноспутниктік миссияларының ілгерілеуіне қолдау көрсетеді.

1 Наноспутниктерге арналған талшықты-оптикалық температура сенсорларына шолу

1.1 Наноспутниктер және олардың жылулық ортасы

Соңғы онжылдықтарда ғарышты игеру саласы айтарлықтай өзгеріске ұшырады, оның бір бөлігі наноспутниктердің – ғарышқа қолжетімділікті демократияландыратын ықшам, жеңіл және үнемді платформалардың пайда болуымен байланысты болды. Наноспутниктер әдетте CubeSats (мысалы, 1U = $10 \times 10 \times 10$ см³) сияқты стандартталған пішін факторларына сәйкес әзірленген массасы 1 және 10 килограмм арасындағы жерсеріктер ретінде анықталады. Бұл миниатюралық ғарыш аппараттары Жерді бақылау мен байланыстан ғылыми зерттеулер мен технологияны көрсетуге дейінгі әртүрлі миссиялар үшін икемді шешім ұсынады [1].

Наноспутниктердің тартымдылығы олардың өндірісі мен іске қосылуының төмен шығындарында жатыр, бұл оларды академиялық институттар, стартаптар және бюджеті шектеулі мемлекеттік органдар үшін ерекше тартымды етеді. Бұл қолжетімділік наноспутниктерді пайдаланатын миссиялар санының айтарлықтай өсуіне әкелді. Мысалы, 2013 және 2023 жылдар аралығында іске қосылған CubeSats саны экспоненциалды түрде өсті, олардың көпшілігі үздіксіз жаһандық қамтуды қамтамасыз ету үшін шоқжұлдыздардың бөлігі ретінде орналастырылды [2].

Наноспутниктік миссиялар көбінесе қысқа даму циклдерімен, жылдам коммерциялық прототиптеумен және емес (COTS) компоненттерді пайдаланумен Бұл мүмкіндіктер сипатталады [3]. технологиялық инновацияларды жеңілдетеді және миссия уақытын жылдардан айларға қысқартады. Дегенмен, бұл артықшылықтар сонымен қатар бірнеше қиындықтарды тудырады, әсіресе беріктік пен қоршаған ортаға төзімділік тұрғысынан. Төменгі Жер орбитасының (ТЖО) қатал жағдайлары, оның ішінде температураның шектен ауытқуы, қарқынды күн радиациясы және вакуумдық әсер наноспутниктердің сенімділігі мен ұзақ қызмет ету мерзіміне айтарлықтай әсер етуі мүмкін [4,5,6].

Шектеулеріне қарамастан, наноспутниктер әртүрлі миссия мақсаттарын қолдауда табысты болды. Көрнекті миссияларға NASA-ның ELaNa (наноспутниктердің білім беру ұшыруы) бағдарламасы [8], Planet Labs Жерді бейнелеу шоқжұлдыздары [9] және InSight миссиясы кезінде Марсқа терең ғарыштық байланыс мүмкіндіктерін көрсеткен MarCO миссиясы кіреді [10]. Бұл мысалдар ғылыми және коммерциялық қолданбаларда наноспутниктердің өсіп келе жатқан стратегиялық құндылығын көрсетеді[7].

Наноспутниктік миссияларға өсіп келе жатқан сұраныс миниатюрленген ішкі жүйелерде, әсіресе термиялық бақылау мен реттеуде одан әрі жетілдіруді қажет етеді. Кеңістіктегі температура ауытқулары борттық электроникаға, батарея өнімділігіне және құрылымның тұтастығына әсер етуі мүмкін. Демек, талшықты-оптикалық сенсорлар сияқты дәл, жеңіл және берік температураны анықтау шешімдері миссияның сәтті орындалуын қамтамасыз ету және наноспутниктердің жұмыс істеу мерзімін ұзарту үшін өте маңызды [11].

Төменгі Жер орбитасындағы (ТЖО) жылу ортасы наноспутниктің жұмысы мен ұзақ өмір сүруі үшін айтарлықтай қиындық тудырады. Жер бетінен шамамен 160 км-ден 2000 км-ге дейінгі биіктікте наноспутниктер күн сәулесі мен Жердің көлеңкесі арасындағы мерзімді ауысуларға байланысты температураның жылдам және экстремалды ауытқуларына ұшырайды. Бұл ауытқулар құрамдас бөліктердің бір орбита ішінде 200°С-тан жоғары температура ауытқуын тудыруы мүмкін [6,12].

ТЖО-дағы негізгі жылулық қиындықтардың бірі атмосфералық конвекцияның болмауынан туындайды. Ғарышта жылу беру тек қана өткізгіштік пен сәулелену арқылы жүзеге асады. Бұл наноспутниктердің артық жылуды табиғи түрде тарату немесе жердегі дәстүрлі әдістерді пайдаланып ішкі температураны реттеу мүмкіндігін шектейді. Нәтижесінде пассивті және белсенді жылуды басқару жүйелері мұқият жобалануы және спутниктік архитектураға біріктірілуі керек [13].

Наноспутниктің температурасы бірнеше факторларға байланысты, соның ішінде [14]:

- Орбитаның параметрлері (көлбеу, биіктік, тұтылу ұзақтығы)
- Спутниктік бағдарлау (байланысты бақылау)
- Беттік материалдың қасиеттері (сіңіру, сәуле шығару)
- Ішкі қуат тұтыну және жылуды бөлу
- Күн белсенділігі және Жер бетіндегі альбедо әсерлері

Жерсеріктегі жылу градиенттері локализацияланған ыстық нүктелерді, әсіресе процессорлардың, батареялардың және радиожиілік компоненттерінің жанында жасай алады. Бақыланбайтын болса, бұл градиенттер термиялық кеңеюге, механикалық кернеуге немесе электронды ақаулыққа әкелуі мүмкін. Керісінше, тұтылу фазаларында спутник Күннен көлеңкеленген кезде температура -150°С немесе одан да төмен түсуі мүмкін, бұл батареяның қатып қалуы және материалдың сынғыштығы қаупін тудырады [15].

Улкен ғарыш аппараттарында қолданылатын кәдімгі электронды температура сенсорлары (мысалы, термопаралар немесе RTD) олардың көлемділігіне, электромагниттік кедергілерге сезімталдығына және шектеулі мультиплекстеу мүмкіндігіне байланысты жиі наноспутниктерге жарамсыз болып шығады. Сонымен қатар, наноспутниктерге біріктірілген көптеген COTS компоненттері шектеулі термиялық төзімділік диапазонына ие, бұл дәл термиялық бақылауды одан да маңызды етеді [16].

1.2 Қолданыстағы температураны анықтау технологиялары

Температураны өлшеу ғарыш кемелеріндегі маңызды функция болып табылады, ол термиялық реттеуге және миссия үшін маңызды компоненттерді қорғауға мүмкіндік береді. Дәстүрлі түрде температураны анықтау жақсы орнатылған электрлік сенсорларды, соның ішінде термопарларды, қарсылық температура детекторларын (RTD) және инфрақызыл (ИК) сенсорларды пайдалана отырып орындалды. Бұл технологиялар жер үсті және кейбір ғарыштық қосымшаларда кеңінен қолданылғанымен, олар төмен Жер орбитасының қатал шарттарында жұмыс істейтін наноспутниктік платформаларға бейімделген кезде бірнеше шектеулерді ұсынады [17].

Терможұптар Зейбек эффектісі принципі бойынша жұмыс істейді, екі түрлі металл қосылыстарының арасындағы температура айырмашылығына пропорционалды кернеу тудырады. Олар қарапайым, берік және кең температура диапазонын (әдетте -200°С-тан 1250°С-қа дейін) өлшеуге қабілетті.

Кеңістіктегі шектеулер:

- Электромагниттік кедергі (EMI): Кернеу сигналы борттық электроника мен коммуникация жүйелерінің шуына сезімтал, бұл минималды экрандаумен ықшам наноспутниктік конструкцияларда проблема туғызады.

- Ұзақ қашықтықтарда сигналдың нашарлауы: Ұзын сымдар арқылы сигналдың әлсіреуі таратылған сенсорлық қолданбалардағы дәлдікті төмендетуі мүмкін.

- Калибрлеу дрейфі: радиацияның және термиялық циклдің ұзақ мерзімді әсері қосылыс материалдарының тозуын тудыруы мүмкін, бұл миссия ұзақтығы бойынша сенімділікті төмендетеді.

Қарсылық температура детекторлары (ҚТД) температура өзгеретіндіктен металдың (әдетте платина) электрлік кедергісінің болжамды өзгерісін пайдаланады. Олар қалыпты температура диапазонында (-200°С пен 850°С) жоғары дәлдік пен тұрақтылықты ұсынады.

Кеңістіктегі шектеулер:

- Жаппай және сымдардың күрделілігі: RTD дәл оқу үшін төрт сымды қосылымдарды қажет етеді, кабельдің массасы мен көлемін арттырады – наноспутниктік миссияларда маңызды шектеулер.

- Сәулеленуге сезімталдық: Ғарыштағы иондаушы сәулелену RTD материалдарының қарсылық сипаттамаларын өзгертіп, дрейфке немесе істен шығуға әкелуі мүмкін.

- Жылулық кешігу және локализацияланған зондтау: RTD әдетте нүктелік өлшемдерді қамтамасыз етеді және құрамдас бөлікпен жақсы жылулық жанасуды қажет етеді, бұл ғарыш аппараты бойынша бөлінген жылу жағдайларын көрсетпеуі мүмкін.

Инфрақызыл датчиктер объектілер шығаратын жылу сәулеленуін анықтайды және жиі байланыссыз температураны өлшеу үшін қолданылады. Олар бетінің температурасын бағалау немесе термиялық картаны жүргізу үшін пайдалы болуы мүмкін.

Кеңістіктегі шектеулер:

- Көру сызығына тәуелділік: ИҚ сенсорлары сенсор мен мақсатты бет арасындағы анық жолды қажет етеді. Бұл олардың шектеулі немесе ішкі спутниктік құрылымдарда қолданылуын шектейді. - Беттік сәуле шығарудың ауытқулары: дәл көрсеткіштер негізінен беттің деградациясына немесе кеңістіктегі ластануға байланысты өзгеруі мүмкін мақсатты материалдың сәуле шығару қабілетін білуге байланысты.

- Вакуумда шектеулі қолдану: ИҚ сенсорлары ішкі құрамдас температураларды немесе күрделі құрылымдардағы жылу градиенттерін тікелей көру мүмкіндігінсіз өлшеуге жарамайды.

Жалпы алғанда, дәстүрлі сенсорлар үлкен спутниктерде және жердегі жүйелерде сәтті қолданылғанымен, олардың массасы шектеулі, радиацияға ұшыраған және тығыз интеграцияланған наноспутниктерде қолданылуы шектеулі. Бұл шектеулер осы дәстүрлі шектеулердің көпшілігін жеңе алатын талшықты-оптикалық сенсорлар сияқты ықшам, берік және мультиплексирленген шешімдерге ауысуды қажет етеді.

1.3 Ғарыштық қолданбаларға арналған талшықты-оптикалық сенсорлар

Талшықты-оптикалық сенсорлар (ТОС) ғарыш аппараттарының жетілдірілген мониторингі үшін перспективалы технология ретінде, әсіресе наноспутниктер сияқты шағын платформалар контекстінде пайда болды. Оптикалық талшықтардың бірегей қасиеттерін пайдалана отырып, бұл сенсорлар дәстүрлі электрлік температураны анықтау әдістеріне қарағанда, әсіресе күрделі кеңістік жағдайында айтарлықтай артықшылықтар береді [18].

Өзінің негізінде талшықты-оптикалық сенсорлар сезімтал орта ретінде де, беру желісі ретінде де оптикалық талшықтарды (әйнек немесе пластиктің жұқа, икемді жіптерін) пайдаланады. Температура, деформация, қысым немесе сәулелену сияқты физикалық параметрлер талшық арқылы өтетін жарықтың қасиеттерін (мысалы, толқын ұзындығы, фаза, қарқындылық немесе поляризация) өзгерте алады. Содан кейін бұл өзгерістер қоршаған ортаның нақты өлшемдерін алу үшін талданады [19].

1.3.1 Талшықты-оптикалық сенсорлардың жұмыс істеу принциптері

Талшықты-оптикалық сенсорлардың жұмысы оптикалық талшықты әрекеттесетін құрылымдар арқылы таралатын немесе өзара жарық модуляциясына негізделген. Сырткы сигналдарының физикалык ынталандырулар (мысалы, температура, штамм немесе қысым) жарық сипаттамаларында (мысалы, толқын ұзындығы, фазасы, қарқындылығы) өлшенетін өзгерістерді тудырады, содан кейін мақсатты параметрді сандық анықтау үшін талданады. Әртүрлі конфигурациялардың ішінде Талшықты Брэгг торлары (ТБТ) және интерферометриялық сенсорлар аэроғарыштық қолданбаларда температураны анықтау үшін ең кең таралған болып табылады [20].

ТБТ - оптикалық талшықтың өзегі бойындағы сыну көрсеткішінің мерзімді модуляциясы. Кең жолақты жарық талшық арқылы өткенде, Брэгг толқын ұзындығы деп аталатын белгілі бір толқын ұзындығы тор арқылы көрсетіледі, ал спектрдің қалған бөлігі таралуын жалғастырады. Брэгг толқын ұзындығы λ_B берілген [21]:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda,\tag{1.1}$$

мұндағы, *n*_{eff} – талшық өзегінің тиімді сыну көрсеткіші,

 Λ – тордың периоды.

 n_{eff} және Λ екеуі де температураға және деформацияға тәуелді. Осылайша, қоршаған орта температурасының кез келген өзгерісі Брэгг толқын ұзындығын өзгертіп, температураны дәл өлшеуге мүмкіндік береді. Әдеттегі ТБТ миллисекунд диапазонында жауап беру уақытымен шамамен 10 пм/°С температура сезімталдығын көрсетеді.

Талшықты-оптикалық сенсорлардың тағы бір негізгі класы екі когерентті жарық сәулелерінің арасындағы оптикалық жол ұзындығының өзгеруін өлшейтін интерферометрияға негізделген. Жалпы конфигурацияларға мыналар жатады [22]:

- Max-Зендер интерферометрі (МЗИ);
- Мишельсон интерферометрі;
- Фабри Перот интерферометрі (ФПИ).

Температураны анықтау кезінде интерферометрлер сыну көрсеткіші мен талшық ұзындығының термиялық индукцияланған өзгерістеріне байланысты фазалық ығысуларды анықтайды. Сыртқы Фабри – Перот интерферометрлері (СВПИ), атап айтқанда, екі шағылыстыратын беттер арасында пайда болған микрон масштабты қуыстармен нүктелік температураны анықтау үшін жоғары сезімталдықты көрсетті [23].

Қиындықтары. Интерферометриялық сенсорлар жоғары сезімталдықты ұсынса да, олар көбінесе когерентті жарық көздерін, күрделі сигналдарды өңдеуді және дәл туралауды қажет етеді, бұл оларды мамандандырылған қолданбалар немесе зерттеу миссиялары үшін арзан наноспутниктік шоқжұлдыздарға қарағанда қолайлы етеді [24].

Ғарыштық сұрыпты датчиктер үшін физикалық прототиптеуге байланысты шығындар мен тәуекелдерді ескере отырып, көптеген зерттеушілер өрістету алдында талшықты-оптикалық сезіну жүйелерін жобалау, сынау және оңтайландыру үшін симуляциялық орталар мен виртуалды зертханаларға жүгінді [25].

1. Әртүрлі жылу-механикалық жағдайларда ТБТ модельдеу үшін OptiGrating, RSoft, және COMSOL Multiphysics сияқты оптикалық модельдеу платформалары қолданылды. Бұл құралдар қажетті сезімталдық пен өткізу қабілетіне қол жеткізу үшін торлау ұзындығын, айырды және индекс профилін жаңартуды параметрлік оңтайландыруға мүмкіндік береді [26]. 2. Жиі COMSOL немесе ANSYS-те жүргізілетін Finite Element Method (FEM) симуляциялары датчик пен спутниктік құрылымның жұптасқан термомеханикалық мінез-құлқын модельдеу үшін кеңінен қолданылады. Бұл симуляциялар мыналар үшін аса маңызды [27]:

Наносателлиттерде жылудың таралуын бағалау;

- Орбиталық температуралық циклдардағы датчиктердің әрекет етуін болжау;

- Штамм-температураны ыдырату әдістерін валидациялау.

3. Виртуалды сенсорлық желілер миссияның түрлі сценарийлері бойынша бөлінген температура мониторингін тексеру үшін сандық туыстас орталарда дамыды. Мысалы, зерттеулер сенсорды орналастыруды оңтайландыру және жылулық артта қалуды бағалау үшін CubeSat жүк көтергіштік шығанақтарының ішіндегі мультиплексті ТБТ массивтерін имитациялады [28].

4. Соңғы зерттеулерде (мысалы, ESA SENSE және NASA-ның STMD жобалары) бірнеше рет шығынды вакуумдық камералық тәжірибелер жүргізу қажеттілігінсіз жылдам итерацияға мүмкіндік беретін радиациялық және механикалық жүктемелер астындағы ТБТ өміршеңдігін тексеру үшін симуляциялық жетегі бар конструкция қолданылды [29,30].

Түйіндемеде талшықты-оптикалық температура датчиктері— әсіресе ТБТ және интерферометриялық принциптерге негізделгендер— наносателлит миссияларының экстремалды жағдайлары үшін өте қолайлы ықшам, сенімді және мультиплексалды шешім ұсынады. Қазіргі заманғы симуляциялық құралдар мен виртуалды зертханаларды пайдалану арқылы бұл технологиялар ғарыштық қосымшаларды дәл қолдану, даму тәуекелін төмендету және миссияның әзірлігін жеделдету үшін дәлме-дәл бейімделуі мүмкін.

1.3.2 Ғарыштық қолданбаларға арналған талшықты-оптикалық сенсорлардың артықшылықтары

(TOC) бірқатар Талшықты-оптикалық сенсорлар техникалық артықшылықтарды ұсынады, бұл оларды ғарыштың қатал және ресурстары шектеулі ортасында, әсіресе наноспутниктік платформаларда орналастыру ушін өте қолайлы етеді. Олардың бірегей оптикалық сипаттамалары физикалық беріктігімен біріктіріліп, дәстүрлі электронды зондтау технологиялары кездесетін көптеген шектеулердің шешімін ұсынады. Негізгі артықшылықтарға электромагниттік кедергілерге (EMI) иммунитет, жеңіл және ықшам пішін, мультиплекстеу мүмкіндігі [31], т.б.

Кесте 1.1 – Талшықты-оптикалық сенсорлардың артықшылықтары

Электромагниттік	– Байланыс	жүйелерінің	радиожиілік	(РЖ)
кедергілерге	шығарындыларына	гөзімді		
төзімділік (ЭМК)	 Тығыз сымды 	и орталарда өзара о	сөйлесуге иммуните	т

1.1 кестенің жалғасы

	– Электромагниттік импульс (ЭМП) немесе жоғары радиациялық жағдайларда, мысалы, күн жарқырауы немесе Жердің төмен орбитасында жоғары энергиялы бөлшектердің әсері кезінде сенімді
Жеңіл және ықшам дизайн	 Ең аз салмақ: Стандартты оптикалық талшықтардың салмағы бір метрге бірнеше грамм ғана. Кішігірім із: диаметрі 125 мкм-ге дейін шағын, оларды спутниктің механикалық құрылымын бұзбай композиттік панельдерге, күн массивтеріне немесе баспа схемаларына оңай енгізуге болады. Сезімдеу нүктесінде қуат қажет емес: ТОС пассивті және жергілікті электр қуатын қажет етпейді, жылу жүктемесі мен электрлік курделілікті азайталы.
Мультиплекстеу мүмкіндігі	 ТБТ сенсорларында толқын ұзындығын бөлу мультиплексирлеу (WDM), мұнда әрбір тор белгілі бір орынға және сенсордың оқуына сәйкес келетін бірегей толқын ұзындығын көрсетеді. Уақытты бөлу мультиплексирлеу (TDM) және таратылған зондтау үшін оптикалық жиілік доменінің рефлексометриясы (OFDR). Нақты уақыттағы бірнеше ішкі ішкі жүйелердің термиялық мониторингі (мысалы, батарея жинақтары, борттық компьютерлер, пайдалы жүктемелер) Орналастырылатын күн панельдері немесе бумдар сияқты құрылымдық элементтер бойынша температура профилін жасау Ең аз массалық және көлемдік айыппұлдармен жақсартылған ақауларды анықтау және жылу диагностикасы
Қосымша артықшылықтар	 Радиацияға төзімділік: Мамандандырылған оптикалық талшықтарды ұзақ уақытқа созылатын миссияларда сигнал тұтастығын сақтай отырып, радиациядан туындаған әлсіреуге қарсы тұру үшін жасауға болады. Механикалық икемділік: Оптикалық талшықтарды спутниктік құрылым ішінде жан-жақты интеграциялауға мүмкіндік беретін тар кеңістіктер арқылы иілуге және бағыттауға болады. Химиялық және термиялық тұрақтылық: Шыны талшықтары температураның кең диапазонында тұрақты және вакуум немесе газ шығару әсер етпейді.

Қорытындылай келе, ЭМК иммунитеті, жеңіл табиғаты және талшықтыоптикалық сенсорлардың мультиплекстеу мүмкіндіктері оларды келесі ұрпақ наноспутниктік миссиялары үшін тамаша таңдау жасайды. Бұл сипаттамалар жүйенің күрделілігін төмендетіп қана қоймайды, сонымен қатар сенімділікті арттырады, ғарыштық ортада сенімдірек және автономды жылуды басқаруға жол ашады [32]. 1.3.3 Аэроғарыштық және ғарыштық миссиялардағы талшықтыоптикалық сенсорлардың алдыңғы қолданбалары

ТОС электромагниттік кедергілерге (ЭМК) иммунитет, жеңіл табиғат және мультиплекстеу мүмкіндіктері сияқты тән артықшылықтарына байланысты аэроғарыштық және ғарыштық миссияларға көбірек біріктірілді. Оларды орналастыру құрылымдық денсаулықты бақылаудан бастап қатал ортадағы температура мен қысымды өлшеуге дейін әртүрлі қолданбаларды қамтыды [33].

– NASA талшықты-оптикалық зондтау жүйесі.

NASA-ның Армстронг ұшуды зерттеу орталығы нақты уақыт режимінде деформацияны, температураны және пішінді бақылау үшін ТБТ сенсорларын пайдаланатын талшықты-оптикалық сенсорлық жүйені (ТОСЖ) әзірледі [34]. ТОСЖ қолданбаларда, ішінде әртүрлі аэроғарыштық соның ұшақ аппараттарының бөліктерінің қанаттарының және ғарыш құрамдас құрылымдық тұтастығын бақылауда қолданылды. Жүйенің мыңдаған сенсорларды бір талшық бойымен мультиплекстеу мүмкіндігі ең аз салмақ қосу арқылы жан-жақты деректерді жинауға мүмкіндік береді [35].

- Еуропалық ғарыш агенттігінің (ESA) бастамалары.

Еуропалық ғарыш агенттігі (ESA) ТОС ғарыштық миссияларға біріктірудің алдыңғы қатарында болды. Атап айтқанда, PROBA-2 спутнигінде -40 ° С пен 400 ° С аралығындағы температура ауытқуларын бақылау үшін ТБТ сенсорлары пайдаланылды [36]. Бұл сенсорлар жылуды басқару және құрылымдық денсаулықты бақылау үшін маңызды деректерді қамтамасыз етті [37].

Жоғары температура қолданбалары.

Кесте 1.2 Аэроғарыштық және ғарыштық миссиялардағы ТОС қолданбаларының қысқаша мазмұны

Қолдану аймағы	Миссия/Жоба	Сенсор	Бақыланған	Сілтеме
		түрі	параметр	
Құрылымдық	NASA FOSS	ТБТ	Штамм,	NASA
денсаулық			температура,	FOSS
мониторингі			пішін	
Жылу	ESA PROBA-2	ТБТ	Температура (-	Frontiers in
мониторингі			40°C to 400°C)	Physics
Жоғары	ESA Re-entry	ТБТ	Температура	ESCIES
температуралы	Vehicles		(2000°С-қа	
сезіну			дейін)	
Сенсор дизайнын	Simulation	ТБТ	Әр түрлі	<u>Ozen</u>
оңтайландыру	Studies		параметрлер	Engineering

ТОС қайта кіретін көліктер мен қозғаушы жүйелер сияқты жоғары температуралы орталарда қолданылған. Мысалы, ESA қайта кіретін көлік жобалары термиялық қорғаныс жүйелерін бағалауға көмектесетін 2000 ° С дейінгі температураны өлшеуге арналған ТБТ сенсорларын біріктірді [38].

– Виртуалды зертханалар және симуляциялық зерттеулер.

ТОС әзірлеу және тестілеу виртуалды зертханалар мен модельдеу құралдарының пайдасын көрді. OpticStudio және Lumerical сияқты кеңейтілген модельдеу платформалары аэроғарыштық қолданбалар үшін ТОС дизайнын жасау және оңтайландыру үшін қолданылған [39]. Бұл құралдар әртүрлі қоршаған орта жағдайларында сенсорлардың әрекетін модельдеуге мүмкіндік береді, сенімді сезімтал шешімдерді әзірлеуді жеңілдетеді.

Талшықты-оптикалық сенсорларды аэроғарыштық және ғарыштық миссияларға біріктіру салмақты азайту, деректер дәлдігі және қатал қоршаған орта жағдайларына төзімділік тұрғысынан айтарлықтай артықшылықтар көрсетті. Технология дамыған сайын, ТОС қолдану аэроғарыштық жүйелердің қауіпсіздігі мен өнімділігін одан әрі арттырады деп күтілуде.

2 Талшықты-оптикалық температура сенсорларының теориялық негіздері

2.1 Талшықты-оптикалық температура сенсорларының жұмыс істеу принциптері

Талшықты-оптикалық температура сенсорлары (ТОТС) жарық пен оптикалық талшықтың материалдық қасиеттері арасындағы өзара әрекеттесу негізінде жұмыс істейді, олар температура сияқты сыртқы физикалық параметрлерге әсер етеді. Бұл сенсорлар, әсіресе электромагниттік кедергі, вакуум экстремалды температура сияқты факторлар дәстүрлі және технологияларға қарсы тұратын ғарыш орталарда әдеттегі сиякты температураны анықтау әдістеріне сенімді, пассивті және жоғары дәлдіктегі балама ұсынады [40].

Түрлі конфигурациялардың ішінде Талшықты Брэгг Торларының (ТБТ) сенсорлары қарапайымдылығы, мультиплекстеу мүмкіндігі және жоғары сезімталдығы арқасында температураны анықтау үшін ең көп қолданылатын FOTS түрі болып табылады.

Қазіргі уақытта талшықты Брэгг торы (ТБТ) оптикалық желіде, физикалық және химиялық зондтауда кеңінен қолданылатын ең танымал құрамдастардың бірі болып оптикалық саналады, себебі олардың қарапайымдылығы, шағын өлшемдері, мультиплексирлеу мүмкіндігі және төмен құны. ТБТ негізгі режим мен басқа режимдер арасындағы фазалық сәйкестік жағдайын қанағаттандыратын бір режимді талшықтың өзегіндегі сыну көрсеткішінің (СК) мерзімді өзгеруін қамтиды, не өзек режимі, не қаптау режимдері немесе сәулелену (немесе ағып кету) режимдері [41]. 1978 жылы Хилл және басқалары германий қоспасы бар ядродағы алғашқы ТБТ-ны ойлап тапты және хабарлады [42]. Талшық өзегіндегі сыну көрсеткішінің тұрақты мерзімді өзгеруін қосу үшін лазерлік литография әдісін қолдану арқылы гранаттау жасалды.

ТБТ негізіндегі талшықтарды сезіну принципін қоршаған ортадағы өзгерістер әсер ететін тордың торлау кезеңі, тор ұзындығы және осындай талшықтардың тиімді сыну көрсеткіші ретінде анықтауға болады [43]. Сыртқы өзгеруі резонанстық жағдайдың өзгеруіне ортаның әкеледі: демек. резонанстық толқын ұзындығының өзгеруі орын алады. Осы торлардың қасиетіне қарай оны үш санатқа бөлуге болады: (1) талшықты Брэгг торы (ТБТ), (2) ұзақ мерзімді талшық торы (ҰМТТ) және (3) қиғаш ТБТ (ҚТБТ). Толтырғыш негізіндегі оптикалық талшықтар электромагниттік кедергілерге иммунитеттің бірегей ерекшеліктеріне, ықшам өлшемдерге, жоғары мультиплекстеу қабілетіне in situ сезімталдыққа, және бақылауына байланысты физикалық және химиялық зондтауда үлкен назар аударады. Коршаған ортаны жапсырмасыз бақылау дизайнының арқасында ТБТ, ҰМТТ, өрнектелген ТБТ және ҚТБТ сияқты торға негізделген сенсорлар физикалық және химиялық сенсорларды жасау үшін үлкен назар аударды. Торға негізделген талшықтарда Брегг толқын ұзындығы (1) формуласы арқылы есептеледі [44].

Температураның өзгеруіне байланысты талшықтың сыну көрсеткішінің өзгеруі байқалады, бұл Брэгг толқын ұзындығының мәнінің сызықтық дрейфіне әкеледі. Торлы талшықтарды қолдану арқылы температураны бақылауға Брэгг толқын ұзындығының вариациясын демодуляциялау арқылы оңай қол жеткізуге болады. Басқа оптикалық талшықты сенсорлармен салыстырғанда торға негізделген температура сенсорлары бірнеше артықшылықтарды көрсетті, соның ішінде жақсы сызықтық, жоғары тұрақтылық, мультиплекстеу қабілеті және коммерцияландыруда кеңінен қолданылған жаппай өндіріс.

2014 жылы Зайнетдинов және т.б. 2–400 К жұмыс диапазоны бар ТБТ негізіндегі температура сенсорын және 12 К-ден төмен температуралар үшін 10 мК-ден жоғары температура рұқсатымен әзірледі [45]. Сезгіш бастиек полиимидпен қапталған оптикалық талшықтан жасалған. Жауап талшықтың бөлігін <4 К дейін термиялық кеңеюдің елеусіз коэффициенті бар политрафторэтилен таспаға орнату арқылы қол жеткізілді. Датчиктер бірнеше сынақтарда тамаша тұрақтылық пен температура циклдерінің жоғары қайталану мүмкіндігін көрсетті. 2016 жылы Хсяао және т.б. төтенше температуралық орталар үшін хром нитриді (CrN) қапталған ТБТ сенсоры туралы хабарлады [46]. Сезімдеу конфигурациясы будың физикалық тұндыру (БФТ) әдісі арқылы CrN тұндыру арқылы жасалды. Шашырату процесі кезінде тұндыру жүйесінің қысымы Сr нысанасына қолданылған 70 Вт қуатпен fixedat6 $\times 10^{-3}$ Torr болды. ТБТ үстінде шамамен 2 мкм қалыңдығына жету үшін пленка 15 минутка қойылды. Датчик оптикалық спектр анализаторын (ОСА) пайдалану арқылы талданған толқын ұзындығын сұрау әдісіне негізделген. Жасалған сенсордың шағылысу спектрлері бақыланды және 100-ден 650 °С аралығындағы температуралар үшін жалаң ТБТ-мен салыстырылды. Нәтижелер CrN қапталған ТБТ сенсорының CrN жоқ жалаңаш ТБТ 14.0 pm/°C талшықтарымен салыстырғанда жоғары температура сезімталдығын беретінін көрсетті.

2018 жылы Донг және т.б. графен оксидін (GO) қысым мен температураны бір уақытта бақылау үшін ТБТ арқылы біріктірілген сезімтал қабат ретінде пайдалану туралы хабарлады [47]. Бұл конфигурация Фабри-Перот интерферометріне (ФПИ) негізделген. Жасалған ФПИ сенсорының жарық шағылыстырғыштары 2.1-суретте көрсетілгендей, ТБТ бетінің соңғы жағымен қапталған жұқа графен қабығынан тұрады. Датчик қысым мен температура үшін сәйкесінше 501,4 нм/кПа және 306,2 нм/оС жақсы сезімталдықты көрсетті. GO-мен бірге ТБТ-ны енгізу ФПИ сенсорының айқаспалы әсерін сәтті болдырмайды. Сезімталу өнімділігі жақсарғаннан кейін сол 2018 жылы Джасми және т.б. сонымен қатар полиуретан-GO нанокомпозитін сезімтал қабат ретінде пайдалану арқылы ТБТ негізіндегі температура сенсорын хабарлады [48]. РU-GO физикалық, химиялық және өткізгіштігі GO-ны таза PU-ға енгізгеннен кейін жақсарғаны байқалды. Термогравиметриялық талдау графен үлпектерімен күшті молекулааралық әрекеттесу нәтижесінде PU термиялық тұрақтылығының 217°С дейін жақсарғанын көрсетті, бұл сезімталдықтың жоғарылауына әкеледі. Біркелкі қалыңдықты алу үшін бұл материал ТБТ үстіңгі жағымен қапталған, ал құрылғының сезу өнімділігі 25 пен 60°С аралығындағы кең ауқымды температуралар үшін бағаланған. Сенсор жақсы сызықтылықпен бірге 6 рт/°С жақсартылған сезімталдықты көрсетті.



2.1-сурет – Температура мен қысымды бір уақытта анықтау үшін графенмен біріктірілген ТБТ сенсоры

2019 жылы Ченг және т.б. температураны анықтау үшін импульстік лазерлік тұндыру арқылы ТБТ үстінен жабынмен қапталған стронций титанатын (SrTiO₃) жұқа үлбірді енгізді [48]. SrTiO₃ - тамаша оптикалық, диэлектрлік және фотоэлектрлік қасиеттері бар типтік перовскит тәрізді құрылымдары бар ферроэлектрлік жұқа пленка. Тұндыру үшін ТБТ буферлік жабынды алып тастау үшін ацетон ерітіндісіне 5 минутқа батырылды, ол кейінірек қаптамаға қалыңдығы 271,5 нм SrTiO₃ қабықшасымен жабылды. ТБТ термиялық зондтау өнімділігін зерттеу үшін қосылатын оптикалық жол, Михельсон интерферометріне (МИ) негізделген екі оптикалық жол және Sagnac интерферометріне негізделген біреуі SrTiO₃ қапталған ТБТ және басқа жалаң ТБТ көмегімен жасалды. Құрылғының сезімталдық өнімділігі 40-тан 150°С-қа дейінгі температуралардың кең диапазонында зерттелді. Әрбір сезу конфигурациясының сезімталдығы екі МИ және бір Сагнацинтерферометр ушін сәйкесінше 9,0 pm/°C, 10,5 pm/°C және 23,4 pm/°C болып байқалды. Кейінірек 2020 жылы Гао және т.б. штамм мен температураның өзгеруін бір мезгілде анықтауға арналған бірнеше режимді талшық пен ТБТ-дан тұратын сенсорды кос параметрлі талшықты хабарлады [49]. Сезімталдау конфигурациясы 2.2-суретте көрсетілгендей, бір режимді талшықпен (БРТ) біріктірілген, ұзындығы 6,5 см аз модификациялы талшықты ығысу арқылы жасалды. Алынған спектрдің түсуінің әртүрлі сезімталдығына байланысты температура мен деформация бір уақытта өлшенді. Жасалған сенсор – 34,3 және 10,7 pm/∘С жақсы температура сезімталдығын және сәйкесінше – 2 pm/µє және 0,67 рт/иє деформация сезімталдығын көрсетті. Жасалған құрылғы қарапайым конфигурациясының, үнемділігінің және ықшам құрылымының арқасында қос параметрді өлшеу салаларында жақсы әлеуетті көрсетті.



2.2-сурет – Деформация мен температураны бақылау үшін сенсорлық конфигурация

Кейінірек 2021 Чен және т.б. сыну көрсеткіші жылы мен температуралық өзгерістерді бір уақытта бақылау үшін талшықты беттік толқын бағыттағышы мен Брегг торына негізделген оптикалық талшықты сенсорды хабарлады [50]. Құрылғы фемтосекундтық лазермен жасалған екі ТБТ құрылғысынан тұрады, олардың біреуі температураны анықтау үшін талшықты өзекте орналасқан; екіншісі температура мен RI өлшемдері үшін талшық бетінің толқын өткізгішінде орналасқан. Жасалған құрылғы жақсы RI және 10,3 нм/RIU және 9,94 рт/оС температура сезімталдығын көрсетті. Кейінірек 2022 жылы Эспозито және т.б. температура сезімталдығын жақсарту және импульсті күштердің немесе деформацияның механикалық әсерлеріне айкаспалы сезімталдықты жою үшін ТБТ сенсорларына арналған миниатюрленген металл пакетін хабарлады [51]. Құрылғының қаптамасы ТБТ-ны болат түтікке инкапсуляциялауды талап етті, ол кейінірек басқа улкенірек болат түтіктің ішіне орналастырылды, мұнда механикалық әсердің торға өтуіне жол бермеу үшін талшық бос ұсталды. Жасалған құрылғы стандартты ТБТ көрсеткішінен 3 есе дерлік жоғары 28,9 pm/°C жоғары бірге 5-тен 50 с-ге дейінгі диапазондағы сызықтық сезімталдықпен температура реакциясын көрсетті. Сезімдеу өнімділігіне қоса, құрылғы 20°С температурада сыналғанда 5 секундтық жылдам жауап беру уақытын да көрсетеді. Осы хабарланған ТБТ негізіндегі сенсорларға қосымша, 2.1-кестеде көрсетілген кейбір басқа сенсорлар тамаша өнімділік пен бәсекеге қабілетті жауапты көрсетеді.

Кесте 2.1 – ТБТ негізіндегі температура сенсорларының қысқаша мазмұны.

Сенсор конфигурациясы	Талшық түрі	Температура	Сезімталдық
		ауқымы (°С)	
Алтын жабындысы бар ТБТ	Ге-қоспаланған	0–500	78 pm/°C
микроқұрылымы	талшық		
Каскадты ТБТ	SMF	0–100	10.73 ± 0.21
			pm/°C
Микрофибер Брэгг Гратинг	Тапталған	10–90	20 pm/°C
	талшық		

2.1 кестенің жалғасы

PDMS- тегі ТБТ	SMF	30–90	30.07 pm/°C
Фазалық ауыс-түйіс ТБТ	SMF	-20-80	17.9 pm/°C
ТБТ формасы	SMF	-10-150	10 pm/°C
Дәріленген ТБТ	SMF	25–75	35.7 pm/°C
Металлмен қапталған ТБТ	SMF	0–300	13.6 pm/°C
Керамикалық жабындысы	SMF	25-600	20 pm/°C
бар ТБТ			
Регенерацияланған ТБТ	SMF	25-900	10–14
			pm/°C

Торға негізделген оптикалық талшық жоғары сезімталдық, жылдам жауап беру уақыты, үлкен уақыт ішінде тамаша тұрақтылық және талшық ұзындығы бойынша бірнеше нүктеде бір уақытта температураны бақылауға мүмкіндік беретін мультиплексирлеудің қарапайымдылығы сияқты маңызды ерекшеліктерінің арқасында температураны сезінуде үлкен дамуға ие болады. Бұл артықшылықтарға қоса, торға негізделген талшықта шектеулі температура диапазоны, өте қымбат, сигналды өңдеудің күрделілігі, деформацияға сезімталдық және поляризация сезімталдығы сияқты бірнеше шектеулер бар. Бұл шектеулер жалған немесе аралас нәтижелерді тудыруы мүмкін, ал шығыс деректерін саралаудың өзі қиын тапсырма.

2.2 Температураға сезімталдық және калибрлеу әдістері

Талшықты-оптикалық сенсорларды, әсіресе ТБТ негізіндегі сенсорларды пайдаланып, дәл және сенімді температураны өлшеу олардың температура сезімталдығы мен сәйкес калибрлеу әдістерін терең түсінуді талап етеді. Бұл екі аспект сенсордың нақты жағдайдағы дәлдігін, қайталану мүмкіндігін және қолдану мүмкіндігін, соның ішінде наноспутниктерде кездесетін қатал термиялық ортаны анықтайды.

2.2.1 ТБТ сенсорларының температураға сезімталдығы

ТБТ сенсорының температуралық сезімталдығы әдетте pm/°С (Цельсий бойынша пикометрлер) бірлігінде көрсетілген температура бірлігінің өзгеруі үшін Брэгг толқын ұзындығының ығысу мөлшері ретінде анықталады. Брэгг толқын ұзындығы, λ_B , (2.1) арқылы анықталады.

Температураның өзгеруіне байланысты Брэгг толқын ұзындығының жалпы ығысуын келесідей модельдеуге болады:

$$\frac{d\lambda_B}{dT} = \lambda_B(\alpha + \xi) \tag{2.1}$$

мұндағы α талшықты материалдың термиялық кеңею коэффициенті (кремний диоксиді үшін $\approx 0.55 \times 10^{-6}$ /°C),

 ξ – термооптикалық коэффициент (кремний диоксиді үшін $\approx 6.9 \times 10^{-6}$ /°C), $n_{\rm eff}$ - тиімді сыну көрсеткіші, Λ - торлау кезеңі.

Стандартты бір режимді кремний талшықтарында біріктірілген сезімталдық бөлме температурасына жақын шамамен 10 рт/°С құрайды. Дегенмен, сезімталдықты конустық талшықтарды, полимерлі жабындарды, металл қабаттарды немесе микроқұрылымды оптикалық талшықтарды (МОТ) пайдалану арқылы арттыруға болады.

Мысалы [52] SMF-де біркелкі ТБТ: 10 рт/°С

2.2.2 Калибрлеу әдістері

Калибрлеу FBG спектрінде байқалатын толқын ұзындығының ығысулары температураның өзгеруіне дәл сәйкес келуін қамтамасыз ету үшін қажет. Жалпы калибрлеу әдістеріне мыналар жатады:

Температурасы басқарылатын пештердегі статикалық калибрлеу:

- ТБТ сенсоры дәл басқарылатын жылу камерасына орналастырылған.

- Температура қадам бойынша өзгереді және сәйкес Брэгг толқын ұзындығы жазылады.

Калибрлеу қисығын алу үшін сызықтық регрессия қолданылады:

$$\lambda_B(T) = \lambda_0 + kT \tag{2.2}$$

мұндағы λ_0 – бастапқы Брэгг толқын ұзындығы,

k – көлбеу (сезімталдық).

Қос сенсорлық немесе анықтамалық калибрлеу:

- Бұл әдісте салыстыру үшін ТБТ жанында екінші сенсор (мысалы, деформацияға сезімтал емес немесе коммерциялық термопар) орналастырылады.

- Бұл әсіресе борттағы жылу градиенттері немесе ұшыру кернеуі бастапқы көрсеткіштерге әсер етуі мүмкін наноспутниктік пайдалы жүктемені калибрлеуде пайдалы.

Көпмүшелік немесе көп айнымалы калибрлеу;

- Сызықты емес термо-оптикалық мінез-құлқы бар материалдар үшін немесе кең температура диапазонында қолданылатын сенсорлар үшін (мысалы, кеңістік үшін -150°С және +150°С) үшін жоғарырақ ретті полиномды сәйкестендіру қолданылуы мүмкін.

- Көп параметрлі зондтауда (температура + деформация) калибрлеу үшін матрица негізіндегі ажырату әдістері қолданылады:

$$\begin{bmatrix} \Delta \lambda_T \\ \Delta \lambda_\epsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_T & k_\epsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \epsilon \end{bmatrix}$$
(2.3)

мұндағы Δλ температура мен деформацияға байланысты байқалатын толқын ұзындығының ығысуын білдіреді.

2.2.3 Калибрлеу дәлдігіне әсер ететін факторлар

Калибрлеу дәлдігіне әсер ететін факторлар:

Полимер немесе қапталған сенсорлардағы гистерезис

- Радиациялық әсерге байланысты ұзақ мерзімді дрейф (әсіресе орбитада)

- Жылу беру жылдамдығына әсер ететін орау материалдары (мысалы, PDMS, эпоксид).

- Толқын ұзындығы бойынша сұрау рұқсаты (әдеттегі коммерциялық сұраушылардың 13.00 немесе жақсырақ ажыратымдылығы бар)

2.2.4 Ғарыштық миссиялар үшін автоматтандырылған және ұшу кезінде калибрлеу

Наноспутниктік қолданбаларда ұшу кезінде қайта калибрлеу қажет болуы мүмкін:

– Материалдың ескіруі немесе тозуы

 Болжауға болмайтын жылулық циклдар мен радиациялық әсерлер Кейбір миссиялар бағдарламалық жасақтамаға негізделген адаптивті калибрлеу алгоритмдерін қолданады немесе нақты уақыттағы өтемақы үшін

жылу оқшауланған орындарда анықтамалық ТБТ пайдаланады [53,54].

2.3 Ғарыштық сәулеленудің оптикаға әсері

Наноспутниктік миссияларда қолданылатын талшықты-оптикалық температура сенсорлары жердегі қолданбаларда жоқ төтенше экологиялық жағдайларға ұшырайды. Оларға иондаушы сәулелену, термиялық цикл, ультра жоғары вакуум және микрогравитация жатады. Бұл стресс факторларының оптикалық талшықтардың жұмысына қалай әсер ететінін түсіну, әсіресе әлсіреу және күңгірттену сияқты радиациядан туындаған әсерлер - ғарышта ТБТ негізіндегі сенсорлардың сенімді жұмысы үшін өте маңызды [55].

2.3.1 Оптикалық талшықтардағы радиациялық әсерлер

Орбитада орналастырылған оптикалық талшықтар жоғары энергиялы электрондарға, протондарға, ауыр иондарға және гамма-сәулеленуге ұшырайды, олардың барлығы физикалық және оптикалық қасиеттерін өзгерте алады.

Радиациядан туындаған әлсіреу (РТӘ).

Сәулелену оптикалық талшықтардың кремнеземдік матрицасында нүктелік ақауларды (түс орталықтары деп те аталады) тудырады [56]. Бұл ақаулар жарықты сіңіреді және шашыратады, әсіресе ТБТ әдетте жұмыс істейтін ультракүлгін сәулесінің ИҚ-ға жақын диапазонында (400–1500 нм) әлсіреудің жоғарылауына әкеледі.

$$\lambda_{\rm PT\Theta}(\lambda, t) = \alpha_0(\lambda) + \Delta \alpha(\lambda, t, D)$$
(2.4)

мұндағы: $\alpha_{PT\Theta}$ – әсер етуден кейінгі жалпы әлсіреу,

 α_0 – бастапқы әлсіреу,

 $\Delta \alpha$ – сәулелену әсерінен өсу, толқын ұзындығына λ , уақытқа t және дозаға D(Gy) байланысты.

Әдеттегі РТӘ мәндері [57]:

- Стандартты телекоммуникациялық талшықтарда 10–20 дБ/км дейін 1310 нм 100–1000 krad(Si) дозада

- Радиациямен шыңдалған талшықтар бірдей жағдайларда <1 дБ/км көрсетуі мүмкін

Радиацияның әсерінен сыну көрсеткішінің өзгеруі.

Иондаушы сәулелену сонымен қатар ТБТ толқын ұзындығына әсер ететін тиімді сыну көрсеткішін n_{eff} өзгертеді:

$$\Delta \lambda_{\rm B} = 2\Delta n_{\rm eff} \Lambda \tag{2.5}$$

Бұл өтелмеген немесе экрандалмаған жағдайда өлшем ауытқуына әкеледі. Кейбір жағдайларда индукцияланған ығысу қайтымсыз және уақыт өте келе жинақталады.

Радиация әсерінен талшықтардың қараюы.

Соляризация деп те аталады, бұл ультракүлгін немесе гаммасәулеленуден туындаған талшық материалының көрінетін қараңғылануы, өткізгіштігін айтарлықтай төмендетеді. Әсері таза кремнеземді өзек талшықтарында айқын көрінеді және қоспаларға қатты тәуелді (Gyқоспаланған талшықтар сезімтал) [58].

2.3.2 Әсер ету стратегиялары

Кремний диоксиді негізіндегі оптикалық талшық радиацияға ұшыраған кезде макроскопиялық масштабта үш негізгі радиациялық әсер байқалады.



2.3-Сурет – RT кезінде полимикро FVP-UVMI мультимодалы оптикалық талшықты сәулелендіру кезінде генерацияланған РТӘ спектрлік тәуелділігі, 11 Гр h⁻¹ доза жылдамдығы кезінде 200 Гр(SiO2) дейін. Кірістіруде РТӘ өсу кинетикасы үш нақты толқын ұзындығында суреттелген: 350, 400 және 660 нм. Толығырақ [59]

2.3-сурет оптикалық талшықтың күрделі реакциясын көрсетеді, бұл артық жоғалтулардың күшті спектрлік тәуелділігін көрсетеді. Сонымен қатар, бұл PSC талшығы үшін 630 нм шамасында шыңы болатын айқын сіңіру жолағын көруге болады. Бұл жағдайда осы оптикалық жұту жолағымен байланысты ақау құрылымы белгілі, атап айтқанда, көпірленбейтін оттегі саңылау орталықтары (КОСО) [60]. РТӘ деңгейлері мен кинетикасы егжейтегжейлі сипатталатын көптеген параметрлерге байланысты. Оптикалық талшықты қатал ортада іске асыру кезінде ескерілетін негізгі мәселе РТӘ жиі болып табылады, өйткені ол нашарлайды, ең нашар жағдайда оптикалық деректердің SNR қысқа қашықтыққа таралудан кейін басқарылатын сигналдың жоғалуына дейін байланыстырады. Мысал ретінде, бірнеше ондаған наносекундтық рентгендік импульстен кейін Corning SMF28 талшықтары үшін 1550 нм-де 2000 дБ км⁻¹ жоғары РТӘ деңгейлері (сәулеленуге дейінгі 0,2 дБ км⁻¹ салыстырғанда) байқалды, яғни сигналдың 50% ~1.5 м ішінде жұтылады. Оптикалық талшықтары сезімтал элемент болып табылатын DOFS үшін РТӘ қол жетімді сезу ұзындығын ең қиын орталар ушін километрден бірнеше метрге дейін төмендетеді. Әдетте, РТӘ келесі түрде есептелуі мүмкін:

$$\alpha_{\rm PT\Theta} \left(\frac{\rm d B}{\rm Km}\right) = -\frac{10}{L(\rm KM)} \times \log(I/I_0)$$
(2.6)

мұндағы I және I_0 сәйкесінше берілген уақытта және сәулелену басталғанға дейінгі жіберілген сигналдың қарқындылығы. Талшықтар нарығында кейбір оптикалық талшықтар радиациямен шыңдалған ретінде сатылады, өйткені олардың құрамы сәулеленудің белгілі бір түріне (әдетте тұрақты күйдегі γ сәулелерінің MGy доза деңгейіне дейін) және толқын ұзындығының белгілі бір диапазонына (әдетте телекоммуникация терезелерінде IR жұмысы) РТӘ деңгейін шектеуге бейімделген. Әдетте, оптикалық талшықтардың бұл класы таза кремнеземді және фтор қоспасы бар өзекше оптикалық талшықтарды қамтиды, олардың екеуі де F-қоспаланған қаптамалары бар. Егер көптеген қолданбалар үшін РТӘ жеңілдетілуі керек шектеуші мәселе болса, оны радиацияға сезімтал оптикалық талшықта бақылау радиацияны анықтау немесе дозиметрия қолданбалары үшін пайдаланылуы мүмкін екенін атап өткен жөн, мысалы, Германиядағы DESY қондырғысында [61].

Радиациялық сәулелену (PC). РС таралатын сигналдың үстінен түсетін және бірнеше көздерден пайда болатын паразиттік жарық ретінде әрекет етеді.

Түскен бөлшектердің энергиясы жеткілікті болса, Церенков жарығы оптикалық талшықтарда түзіліп, бағытталуы мүмкін. Бұл 2.4-суретте келтірілген мысалға қатысты, жоғары доза жылдамдығы рентген қондырғысы, CEA [62] ASTERIX көмегімен PSC MMF сәулеленуі кезінде және одан кейін алынған PC спектрлері тұтану эксперименттері кезінде кездесетін доза жылдамдықтарын жаңғыртуға мүмкіндік береді [63]. Церенковтан басқа, сәулелену бұрыннан бар ақаулардан немесе сәулелену кезінде пайда болған жаңа ақаулардан кейбір қосымша люминесценция сигналдарын жасай алады. Бұл сондай-ақ 2.4-суретте көрсетілген және рентгендік импульстен кейінгі алғашқы миллисекундтар ішінде шамамен 650 нм шығаратын бұрыннан бар немесе радиациядан туындаған КОСО қозуының дәлелін береді.



2.4-сурет – Рентгендік импульспен (240 Гр, > 1 МГр s–1, RT) сәулелену кезінде және одан кейін (40 мс интеграция уақыты) полимикро SR200 ММГде құрылған РС спектрлік тәуелділігі. Талшықтың ұзындығы 10 м болды және алынған спектр РТӘ әсерінен немесе ОСЕАN оптикасынан пайдаланылған HR4000 спектрофотометрінің функцияны тасымалдауымен түзетілмейді

Табиғатына қарамастан, PC SNR қатынасына әсер етеді, әсіресе диагностика сияқты көрінетін доменде жұмыс істейтін жүйелер үшін және жоғары доза жылдамдығымен байланысты қатал орталарда (бұл әсіресе мегаджоуль класындағы лазерлерге қатысты). PC келетін болсақ, соңғы жылдары бірнеше зерттеулер радио-люминесценция деп аталатын бұл люминесценцияның жоғары энергиялық физика объектілерінде немесе медициналық қолданбаларда, радио- [64] немесе протон-терапия [65] үшін доза жылдамдығын (немесе бөлшектер ағынын) нақты уақыт режимінде бақылауды қамтамасыз ету үшін қалай пайдалануға болатынын зерттеді.

Сәулеленуден туындаған сыну көрсеткішінің өзгеруі (СТСКӨ).

Сәулеленуден туындайтын байқалатын сыну көрсеткішінің өзгеруі екі механизмнен туындауы мүмкін: α-SiO₂ шыны тығыздығының және PC өзгеруі. Тығыздық ρ өзгерісінің сыну көрсеткішіне n үлесін екі параметрге сүйенетін Лоренц-Лоренц формуласымен түсіндіруге болады:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = K\rho \tag{2.7}$$

мұндағы пропорционалдық константасы К шынының поляризацияланғыштығына тәуелді.

Нуктелік ақаулардан туындаған СТСКӨ бөлігі сыну көрсеткіші мен жұтылу арасындағы байланысты анықтайтын Крамерс-Крониг қатынастары арқылы сипатталады. Шыны тығыздығының модификациясына әкелетін тығыздауды немесе ісінуді Примак [66] алғаш рет тығыздығы шамамен 3% болатын жылдам нейтрондардың (>1019 n см⁻²) жоғары флюенциясына ұшыраған көлемді таза кремнеземде байқаған. Бір қызығы, дәл осындай жағдайларда кремний диоксиді өзінің α-кварц түрінде тығыздығының 10%дан астам төмендеуін көрсетеді. Нейтрондар кремнеземнің екі түрін де метамикт фазасы деп аталатын ортақ топологиялық құрылымға өзгертетіні байқалды [67]. СТСКӨ сонымен қатар [68] көрсетілгендей оптикалық талшықты толқын өткізгіш құрылымына әсер етеді. 290 °С-ден асатын температурада 1019 n см⁻²-ден жоғары флюс әсеріне ұшыраған талшық улгілері үшін 0,25% сызықтық тығыздау байқалды; сонымен қатар кремний диоксидінің тығыздалу әсерін оның көлемді кремнеземдегі 1016 n см⁻² жоғары флюенциялар үшін Раман спектрлерінің эволюциясы арқылы байқауға болады [69].

2.3.3 Ғарыштық ортаны модельдеу

Наноспутниктерге арналған ТБТ сенсорының өнімділігін бағалау үшін ғарыштық орталарды модельдеу маңызды. Негізгі стресс факторларына мыналар жатады:

Жылулық велосипед.

Төменгі Жер орбитасындағы (ТЖО) спутниктер күн сәулесі мен Жердің көлеңкесі арасында тұрақты ауысудан өтеді, бұл орбитаға температураның - 150°С-тан +150°С-қа дейін ауытқуына әкеледі (әдетте 90 минут).

- Бұл талшық пен қаптаманың кеңеюіне/жиырылуына әкеледі;

- Дұрыс ажыратылмаса, штаммнан туындаған Брэгг толқын ұзындығының ығысуын енгізе алады;

- FEM (Ақырлы элементтер әдісі) модельдеу әдетте жылу градиенттерін және олардың сенсорлық қаптамаға әсерін бағалау үшін қолданылады.

Вакуумдық әсерлер.

Кеңістік - бұл қатты вакуум, әдетте ТЖО кезінде <10^{- 6} Па. Бұл мыналарға әкеледі:

Материалдарды газсыздандыру (эпоксидтер, жабындар);

- Нашар жылу өткізгіштік (конвекциясыз), тек сәулелену мен өткізгіштікке сүйенеді;

- Сенсордан талшыққа өзгерген жылу беру.

ТОС газды аз шығаратын материалдарды пайдалана отырып жобалануы және вакууммен үйлесімді термиялық қосылыс теңдеулері арқылы модельденуі керек.

Иондаушы сәулелену

ТЖО сәулелену көздеріне мыналар жатады:

- ¥сталған бөлшектер (Ван Аллен белдіктері);
- Күн бөлшектерінің оқиғалары;
- Ғарыштық сәулелер.

Доза жылдамдығы орбитаның еңісі мен биіктігіне байланысты өзгереді:

1 жылдық ТЖО миссиясы үшін әдеттегі жалпы иондаушы доза (ЖИД): 10–100 krad(Si)

ЖИД SPENVIS (ESA) немесе OMERE сияқты құралдарды пайдаланып модельдеуге болады.

Ғарыштық сәулелену және термиялық цикл наноспутниктердегі талшықты-оптикалық температура сенсорларының ұзақ мерзімді жұмысына айтарлықтай қиындықтар туғызады. Жетілдірілген модельдеу, мұқият материал таңдау және радиациямен шыңдалған конструкциялар мұндай миссияларда сенімді жылу бақылауы үшін өте маңызды [70].

2.3.4 Дәстүрлі сенсорлармен салыстыру

Кесте 2.2 – Салыстырмалы кесте

Параметр	ВБР сенсоры	Термопара	RTD (Pt100)	Термистор
Температура	-150°C+30	-200°C+1800°C	−200°C…+850°	-50°C+150°
диапазоны	0°C		С	С
Сезімталдық	~14 пм/°С	~40 мкВ/°С	~0.385 Ом/°С	түріне
				байланысты
Масса және	Өте кіші	Орташа	Үлкен	Кіші
өлшемі				
ЭМҚ-ға	Өте жақсы	Нашар	Нашар	Нашар
төзімділік				
Көпнүктелі	Иә (бір	Жоқ	Жоқ	Жоқ
өлшеу	талшықпен)			
мүмкіндігі				

2.2 кестенің жалғасы

Вакуумда	Өте жақсы	Қанағаттанарлықт	Герметизация	Нашар
жұмыс істеуі		ай	қажет	
Радиацияға	Жоғары	Төмен	Орташа	Төмен
төзімділігі				
Дәлдігі	Жоғары	Орташа	Жоғары	Орташа
Сызықтылығы	Өте жоғары	Орташа	Жоғары	Нашар

ТБТ сенсорлары электромагниттік инерттілікке, сызықтыққа, бөлінген өлшеу мүмкіндігіне және жоғары температура тұрақтылығына байланысты ғарыштық қолданбаларға ең жоғары жарамдылықты көрсетеді. Олардың негізгі шектеуі оптикалық спектрометрге деген қажеттілік болып қала береді, бірақ микро-оптиканың дамуымен бұл шектеу азырақ маңызды болып келеді.



2.5-сурет – Температура сенсорларының сипаттамаларын салыстыру

2.5-суретте талшықты Брэгг торларын (ТБТ) 8 негізгі саладағы дәстүрлі температура сенсорларымен салыстыратын радар диаграммасы берілген:

- ТБТ сенсорлары жинақылық, ЕМ кедергісі, вакуумдық өнімділік және сызықтық тұрғысынан айқын басым.

- Термопаралар температура диапазонында жеңеді, бірақ дәлдік пен тұрақтылық жағынан төмен.

- RTD жоғары дәлдікке ие, бірақ қорғауды қажет етеді.
- Термисторлар сезімтал, бірақ қиын жағдайларда тұрақсыз.

2.4 Наноспутниктегі сенсорларды біріктіру

Наноспутниктік платформаға талшықты-оптикалық температура сенсорын біріктіру ғарыш аппаратының дизайны мен пайдалану ерекшеліктерін ескеруді талап етеді. Ықшам өлшемі, икемділігі және электромагниттік кедергілерге төзімділігі арқасында талшықты Брэгг торына (ТБТ) негізделген сенсорды тікелей жылу әсер ететін жерлерде орнатуға болады: электронды модульдердің, батареялардың, корпус қабырғаларының немесе антенналардың жанында.

Сенсор элементі (ою торы бар талшық) спутниктің геометриясын бұзбай, ішкі беттердің бойымен салынады немесе композициялық материалдарға ендірілген. ТБТ сенсорының сигналы бір оптикалық талшық арқылы негізгі тақтада орналасқан миниатюралық оптикалық сұраушыға беріледі. Қуат көзі және деректерді жинау борттық басқару жүйесімен синхрондалады[71].



2.6-сурет – 3U наноспутнигі



2.7-сурет – Qualitrol Neoptix Т1^{тм} - зертханалық қолданбаларға арналған оптикалық температура сенсоры

Модельдеулерде жылу ағындары мен жергілікті қызып кету нүктелерін ескере отырып, стандартты CubeSat 1U (10×10×10 см) наноспутникке ТБТ сенсорын орнату сценарийлері қарастырылды. Нәтижелер тіпті бір массивтің де маңызды аймақтарда 0,5°С дәлдікпен температураны бақылауды қамтамасыз ете алатынын көрсетті, бұл ретте ғарыш кемесіне салмақ немесе қуат шығыны дерлік қосылмайды.

3 Наноспутниктерге арналған талшықты температура сенсорларын модельдеу әдістемесі

Бұл тарауда ғарыш жағдайында жұмыс істейтін наноспутниктерге арналған талшықты-оптикалық температура сенсорларын (Талшықты Брэгг торлары – ТБТ) модельдеу және талдау үшін қолданылатын әдістеме ұсынылған. Зерттеудің негізгі мақсаты - сандық әдістерді қолдана отырып, ТБТ сенсорларының жылу және спектрлік жауаптарын сипаттау және олардың дәстүрлі температура датчиктерінен артықшылығын көрсету.

Әдістеме өзара байланысты бірнеше қадамдардан тұрады:

- Біріншіден, ТБТ сенсорының жұмыс принципі сипатталады, оның ішінде оның реакциясы температураға қалай өзгереді.

- Екіншіден, Collab платформасы арқылы Ақырлы элементтер әдісі (АЭӘ) көмегімен жылу берудің математикалық модельдері әзірленеді және имитацияланады (Қосымша А).

- Үшіншіден, алынған температуралық өріс негізінде Брагг толқын ұзындығының ығысуын есептеу үшін оптикалық модель құрастырылады.

- Сонымен қатар, оның тұрақтылығы мен гистерезисін бағалау үшін термиялық цикл жағдайында сенсордың әрекеті имитацияланады.

- 3D визуализациялары, жергілікті қызып кету сценарийлері және вакуумдағы радиациялық салқындату сияқты кеңейтілген үлгілер де қарастырылады.

- Соңында, нәтижелер ТБТ сенсорларының қатал ғарыштық орталарға бейімделуін көрсететін дәстүрлі температура сенсорларымен салыстырылады.

Осы тарауда ұсынылған әдістер мен модельдеу нәтижелері зерттеудің ғылыми негізін нығайтады және нақты ғарыштық қолданбалар үшін техникалық негізделген шешімдерді ұсынады [72].

3.1 Математикалық негіздер

ТБТ температура сенсорын модельдеудің теориялық негізі екі іргелі физикалық процестерге сүйенеді: жылу өткізгіштік және оптикалық толқынның шағылысуы. Олар келесі математикалық тұжырымдармен реттеледі:

Жылу алмасу теңдеуі.

Температураның сенсор бойымен таралуын сипаттау үшін классикалық жылу өткізгіштік теңдеуін шешеміз:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q, \qquad (3.1)$$

мұндағы: T температура [K], ρ материалдың тығыздығы [кг/м],

*с*_{*р*} меншікті жылу сыйымдылығы [Дж/(кг·К)],

k жылу өткізгіштік [Вт/(м·К)],

Q көлем бірлігіне ішкі жылу өндіру [Вт/м].

Тұрақты күй жағдайында уақытқа тәуелді термин нөлге тең болады.

Брэгг толқын ұзындығының ауысуы.

ТБТ сенсорының оптикалық реакциясы Брэгг шартымен (3.1) формуласымен анықталады [73].

3.2 Жылулық талдау

ТБТ сенсорындағы температураның таралуын модельдеу үшін Google Colab көмегімен жылу өткізгіштік теңдеуінің сандық шешімін іске асырылды. Бұл тәсіл NumPy, Matplotlib және SymPy сияқты Python кітапханаларын доменді орнату, теңдеулерді шешу және тұрақты күйде және уақытқа тәуелді режимдерде температура профильдерін визуализациялау үшін пайдаланды.



3.1-сурет – Температураның таралуы (сол жақта) және талшықты Брегг торындағы шағылысу толқын ұзындығындағы сәйкес температуралық ығысу (оң жақта)

3.1-суреттегі сол жақ графикте 10мм сегментте орналасқан талшықтыоптикалық сенсордың (ТБТ) ұзындығы бойынша температураның таралуы көрсетілген.

Х осі: талшық бойымен миллиметрдегі координат

Ү осі: Цельсий бойынша температура

Сызықтық градиент: бір шетінде 20°С-тан екінші жағында 120°С-қа дейін

Оптикалық талшық бойындағы температура профилі сенсорды кеңістіктегі температура градиентінде пайдаланған кезде пайда болатын жылу жүктемесін имитациялайды.

20°С-ден 120°С-қа дейінгі сызықтық температураның таралуы бір жағынан жылу ағынына ұшыраған кезде тұрақты күйдегі жылу алмасу режиміне сәйкес келеді.

Бұл талшыққа ендірілген талшықты Брэгг торы жауап беретін температура өрісін анықтауға мүмкіндік береді.

3.1-суреттегі сол жақ график – Температураның әсерінен толқын ұзындығының ығысуы

Х осі: талшық бойындағы координат (мм)

Ү осі: толқын ұзындығының ығысуы (нм)

Сызық: температураның функциясы ретінде шағылысқан Брегг толқын ұзындығының ұлғаюы

Талшықты Брэгг торындағы толқын ұзындығының ығысуы ($\Delta \lambda_B$) тор аймағындағы температураның өзгеруіне байланысты. Ол формула бойынша есептеледі:

$$\Delta \lambda_B = \lambda_0 (\alpha + \xi) (T - T_0), \qquad (3.2)$$

мұндағы: λ₀=1550 нм – бастапқы толқын ұзындығы;

 $\alpha = 0.55 \times 10^{-6}$
оС – кварц талшығының термиялық кеңею коэффициенті;

 $\xi = 8,6 \times 10^{-6} / \circ C$ – термооптикалық коэффициент.

Талшық бойымен температураның жоғарылауы тиімді тор қадамының және сыну көрсеткішінің жоғарылауына әкеледі, бұл толқын ұзындығының ұлғаюға қарай ығысуын тудырады.



3.2-сурет - кеңістіктегі немесе зертханалық сынақтардағы жұмыс жағдайларына жақын біркелкі жылу өрісі үшін шынайы модель

3.2 суреттің сол жағында талшықтың көлденең қимасы бойынша температураның таралуы (ұзындығы 10 мм, радиусы 125 мкм). 3.2 суреттің оң жағында осы температура өрісінен туындаған толқын ұзындығының $\Delta \lambda B$ ығысуының таралуы

(2.9)-формула бойынша толқын ұзындығының ΔλВ ығысуы температураға сызықтық тәуелді: мұндағы:

- λ₀=1550 нм
 - α+ξ≈9,15×10⁻⁶/°С
 Яғни:

- Егер $T=120^{\circ}C$ болса, онда $\Delta\lambda_B \approx 1550.9, 15 \times 10^{-6} \cdot 100 = 1,42$ нм
- Егер *T*=100°*C* болса, онда Δλ_{*B*}≈1,13 нм
- Және т.б

Осылайша, толқын ұзындығының ығысуының таралуының пішіні температура өрісінің пішінін дәл қайталайды - тек масштаб өзгереді (өлшем бірліктері және түс шкаласы).

3.2.1 Екі өлшемді жағдайда талшықты Брэгг торына температура әсерлерін модельдеу

Талшықты Брэгг торының (ТБТ) температураның біркелкі емес таралуына сезімталдығын бағалау үшін оптикалық талшықтағы жылу өрісінің екі өлшемді сандық имитациясы орындалды, содан кейін шағылысу толқын ұзындығының температуралық индукциялық ығысуын есептеу жүргізілді.

Модель геометриясы.

Модель ұзындығы 10 мм және радиусы 125 мкм талшықты-оптикалық сенсордың көлденең қимасын имитациялайтын тікбұрышты аймақ болып табылады, бұл бір режимді кварц талшығының типтік өлшемдеріне сәйкес келеді.

Есептеу әдісі.

Стационарлық температура өрісін бағалау үшін жылу өткізгіштік теңдеуі екі өлшемді формулада шешілді:

$$\frac{\sigma^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = 0, \qquad (3.3)$$

мұндағы

- *T*(*x*,*r*) – модель нүктесіндегі температура,

x – талшық бойындағы координат,

- r - радиус.

Шекаралық шарттар:

Сол жақтың температурасы: $T=120^{\circ}C$ оң жақ және сыртқы бет температурасы: $T=20^{\circ}C$

Жергілікті ақауды имитациялау үшін (мысалы, жарықшақ немесе микроскопиялық контактіге байланысты қызып кету) модельдің орталық аймағында қосымша жылытуы бар жергілікті аймақ көрсетіледі.

Толқын ұзындығының ығысуын есептеу

Температураның әсерінен толқын ұзындығының ығысуы мына теңдеу арқылы есептелді:

$$\Delta\lambda_B(x,r) = \lambda_0(\alpha + \xi)(T(x,r) - T_0), \qquad (3.4)$$

мұндағы:

_

 $\lambda_0 = 1550$ нм – ТБТ орталық толқын ұзындығы,

- $\alpha = 0.55 \cdot 10^{-6} c$ термиялық кеңею коэффициенті,
- $\xi = 8,6 \cdot 10^{-6/\circ} C$ термооптикалық коэффициент,
- $T_0=20^{\circ}C$ негізгі температура.

Модельдеу нәтижелері.

3.3-суретте температураның таралуы (сол жақта) және толқын ұзындығының $\Delta \lambda_B$ (оң жақта) ығысуы көрсетілген. Айқын жергілікті қызып кету аймағы көрінеді, бұл тордың осы бөлігінде шағылысу толқын ұзындығының ұлғаюына әкеледі. Бұл ТБТ-ның жергілікті жылу аномалияларына жоғары сезімталдығын растайды, бұл құрылымның қызып кетуін немесе зақымдалуын диагностикалау үшін пайдаланылуы мүмкін.



3.3-сурет – Жергілікті термиялық ақауы бар талшықты Брэгт торындағы температураның таралуы және сәйкес температураның әсерінен толқын ұзындығының ығысуы

3.2.2 Талшықты Брэгг торындағы температура өрісі мен толқын ұзындығының ығысуын шекті айырмашылық әдісімен сандық модельдеу

Талшықты Брэгг торының (FBG) температуралық сезімталдығын талдау үшін стационарлық шекаралық жағдайларда талшықтағы жылу алмасудың екі өлшемді сандық моделі жүзеге асырылды. Есептеу ұзындығы 10 мм және диаметрі 250 мкм оптикалық талшықтың бойлық қимасын имитациялайтын тікбұрышты аймақта жүргізілді.

Математикалық тұжырым.

Жылу өткізгіштіктің стационарлық теңдеуі қарастырылады:

$$\nabla^2 T(x,r) = 0, \tag{3.5}$$

мұндағы T(x,r) – талшықтың ұзындығы мен радиусы бойынша температураның таралуы.

Шекаралық шарттар:

- − Талшықтың сол жақ ұшы (кіріс беті): T=120∘C
- Оң жақ ұшы (шығыс беті): *Т*=20•*С*

– Жоғарғы және төменгі шекаралар (радиус бойынша): жылу оқшауланған ($\partial T / \partial n = 0$)

Сандық шешім үшін аудан бойынша температураның таралуын жуықтап алуға мүмкіндік беретін тұрақты тікбұрышты торда итеративті схема қолданылды (соңғы айырмашылық әдісінің аналогы).

Температура әсерінен толқын ұзындығының ығысуын есептеу

Температура әсерінен ТБТ орталық толқын ұзындығының ығысуы мына формуламен есептелді:

$$\Delta\lambda_B(x,r) = \lambda_0 \cdot (\alpha + \xi) \cdot (T(x,r) - T_0), \qquad (3.6)$$

мұндағы:

– $\lambda_0 = 1550$ нм – номиналды толқын ұзындығы,

– $\alpha = 0.55 \cdot 10^{-6/\circ} C$ – кремнеземдік талшықтың термиялық кеңею коэффициенті,

- $\xi = 8,6 \cdot 10^{-6} / C$ – термооптикалық коэффициент,

– $T_0=20^{\circ}C$ – анықтамалық температура.

Модельдеу нәтижелері.

3.4-суретте температураның таралуының (сол жақта) және сәйкес температураның әсерінен толқын ұзындығының ығысуының (оң жақта) түсті карталары көрсетілген.

Термиялық графиктегі сары-ақ аймақтар максималды температуралық әсер ету аймақтарына сәйкес келеді ($T=120^{\circ}C$), ал қою қызыл және қара аймақтар минималды температураға ($T\approx20^{\circ}C$) сәйкес келеді. Алынған бөлу бүйірлік жылу оқшаулауымен жылу берудің стационарлық сипатын растайды.

Толқын ұзындығының ығысу графигі температура мен шағылысқан толқын ұзындығының λ_B ұлғаюы арасындағы айқын корреляцияны көрсетеді, ол максималды қыздыру аймағында шамамен 1,42 нм мәнге жетеді. Бұл талшық бойындағы температура градиенттеріне ТБТ жоғары сезімталдығын растайды.



3.4-сурет – Талшықты Брегг торының бойымен температураның таралуы (сол жақта) және шағылысу толқын ұзындығындағы сәйкес температуралық ығысу (оң жақта)

3.4-суреттегі түсті карталар температураның таралуын (сол жақта) және талшықты Брэгг торының бойымен сәйкес температураның әсерінен толқын ұзындығының ығысуын (оң жақта) бейнелейді.

Сары және ашық аймақтар жоғары температура аймақтарына (120°С дейін) және сәйкесінше толқын ұзындығының максималды ығысуына (1,42 нм дейін) сәйкес келеді.

Толқын ұзындығының Δ*λ*_{*B*} ығысуы температурамен тікелей байланысты және сенсордың сол жағында максимумға жетеді.

3.2.3 Талшықты Брэгг торы бойындағы температура өрісінің үш өлшемді визуализациясы

Талшықты-оптикалық сенсордағы температураның таралуын жақсы түсіну үшін цилиндрлік талшықтағы жылу өрісінің үш өлшемді моделі салынды. Бұл модель температура градиентін талшық осі бойымен ғана емес, қатар сонымен радиалды және бұрыштық бағыттар бойынша мүмкіндік визуализациялауға береді, бұл əcipece жылу эффектінің симметриясын бағалау үшін маңызды.

Модель геометриясы.

Талшық ұзындығы 10 мм және радиусы 125 мкм цилиндр ретінде модельденеді, бұл бір режимді кварц талшығының типтік өлшемдеріне сәйкес келеді. Температура өрісін құру үшін визуализация үшін декарттық координаттарға (x, y, z) түрленетін цилиндрлік координаталардағы (r, θ, z) тұрақты үш өлшемді тор пайдаланылады.

Температураның таралуы.

Температура талшықтың сол жағындағы 120°С-ден оң жақта 20°С-ге дейін z осі бойынша сызықты төмендеу ретінде көрсетілген. Температура радиалды және бұрыштық біркелкі деп қабылданады, бұл талшықтың жақсы жылу өткізгіштігі мен симметриялық қыздыру шарттарына сәйкес келеді.

Нәтижелер және визуализация.

3.5-суретте температура бойынша түсті кодтаумен үш өлшемді шашырау диаграммасы көрсетілген. Ыстық аймақтар (сары-қызыл нүктелер) талшықтың басында, ал суық жерлер (қара қызыл және қара) қарама-қарсы жағында шоғырланған. Визуализация жылулық градиентті анық көрсетеді және көлденең қимадағы температура өрісінің симметриясын көрсетеді.

Мұндай модель әсіресе үш өлшемді бөлуде температураның әсерінен толқын ұзындығының ығысуын одан әрі есептеу үшін, сондай-ақ ықтимал қызып кету аймақтарын немесе талшық көлеміндегі ақауларды талдау үшін өте пайдалы.



3.5-сурет – 120°С пен 20°С аралығындағы сызықтық градиентпен талшықты Брэгг торын имитациялайтын талшықты цилиндр бойымен үш өлшемді температураның таралуы

Ұсынылған температураның таралуы талшықтың бағытталған қыздыру шарттарына сәйкес келеді, оның бір ұшы 120°С температурада сақталады, ал қарама-қарсысы 20°С дейін салқындатылады. Мұндай градиенттер жергілікті жылумен қамтамасыз ету, сенсор корпустарындағы жылуды басқару немесе кеңістікте күн сәулесінің әсерінен термиялық контраст жағдайында пайда болуы мүмкін.

3.2.4 Талшықты сенсордың ортасында локализацияланған қыздырумен температураны бөлудің үш өлшемді моделі

Талшықты Брэгг торына біркелкі емес жылу әсерлерін талдау үшін талшықтың орталық бөлігін жергілікті қыздыру кезінде температуралық өрісті сипаттайтын модель құрастырылды. Мұндай бөлу тар сәулелік жылу көзін (мысалы, микро пеш немесе лазер) пайдаланған кезде немесе термиялық калибрлеу кезінде сенсорды фокусты қыздыру кезінде орын алуы мүмкін.

Геометрия және есеп шығару.

Ұзындығы 10 мм және радиусы 125 мкм талшық қарастырылды. Температура талшық осі z бойындағы координат функциясы ретінде көрсетілді, максималды мәнді $T_{\text{max}} = 150^{\circ}C$ ұзындықтың центрінде алып,

ұштарына дейін $T_{\min} = 20^{\circ}C$ дейін біркелкі төмендейді. Бөлу Гаусс заңы бойынша модельденді:

$$T(z) = T_{min} + (T_{max} - T_{min}) \cdot \exp(-(\frac{z - L/2}{\sigma})^2), \qquad (3.7)$$

мұндағы

– *L*=10 мм – талшықтың ұзындығы,

– $\sigma = L/6$ - температура шыңының ені.

Модельдеу нәтижелері.

3.6-суретте талшық көлеміндегі температуралық өрістің үш өлшемді визуализациясы көрсетілген. Орталықтағы ашық сары аймақ максималды қыздыру аймағына сәйкес келеді. Талшық осі бойымен температура екі шетіне қарай симметриялы түрде төмендейді, онда қараңғы аймақтар байқалады (минималды температура).

Бөлудің бұл түрі жергілікті температураның өзгеруіне сезімтал ТБТ сенсорларын жобалау кезінде маңызды. Ол сондай-ақ талшықтың қысқа бөлігінде тұрақты жылу аймағын құру қажет болғанда калибрлеуде қолданылады.

140 120 10 ^{ҰЗ}ЫНДЫҚ (MM) 6 Гемпература (°С 4 2 80 0 60 0.2 0.1 I Control 0.0 -0.2 40 -0.1 -0.1 0.0 X (MM) 0.1 -0.2 0.2

3D температурасы: талшықтар орталығы қызады, ұштары суық

3.6-сурет - Талшықтың орталық бөлігін локализацияланған қыздырумен Брэгг торында үш өлшемді температураны бөлу 3.2.5 Талшықты Брегг торындағы температураның әсерінен толқын ұзындығының ығысуының үш өлшемді моделі

Талшықтың ортасында локализацияланған қыздырумен құрастырылған температураны бөлу негізінде ТБТ көлеміндегі шағылысу толқын ұзындығы $\Delta \lambda_B$ температуралық индукциялық жылжуының сандық бағасы орындалды. Бұл жергілікті жылулық бұзылыстарға сенсордың реакциясының кеңістіктік көрінісін алуға мүмкіндік береді.

Математикалық модель.

Толқын ұзындығының ығысуы келесі формула бойынша есептеледі:

$$\Delta\lambda_B(x, y, z) = \lambda_0 \cdot (\alpha + \xi) \cdot (T(x, y, z) - T_0), \qquad (3.8)$$

мұндағы:

– $\lambda_0 = 1550$ нм – номиналды толқын ұзындығы,

- $\alpha = 0.55 \cdot 10^{-6} c$ – термиялық кеңею коэффициенті,

- $\xi = 8,6 \cdot 10^{-6} / C$ термооптикалық коэффициент,
- T(x,y,z) температураның таралуы,
- $T_0=20$ °*C* негізгі температура.

Температура T(z) талшық ұзындығының центрінде максимуммен Гаусс заңымен (14) формула бойынша есептелді, мұндағы L=10 мм – талшықтың ұзындығы, $\sigma=L/6$, $T_{min}=20\circ C$, $T_{max}=150\circ C$.

Визуализация нәтижелері.

3.7 суретте әрбір көлемді талшық элементінде алынған шағылысу толқын ұзындығының $\Delta \lambda_B$ ығысуының үш өлшемді картасы көрсетілген. Түс палитрасы нанометрдегі толқын ұзындығының өзгеруінің абсолютті мәнін көрсетеді.

 $\Delta \lambda_B$ максималды мәні талшықтың орталық бөлігінде шамамен 17,5 нм жетеді, мұнда температура ең жоғары деңгейге жетеді. Ұштарға жақынырақ, температура төмендеген сайын ауысымның нөлге дейін біртіндеп төмендеуі байқалады.



3.7-Сурет - Жергілікті қыздыру арқылы талшықты Брегг торындағы ΔλВ толқын ұзындығының температура әсерінен шағылуының үш өлшемді визуализациясы

3.2.6 ТБТ көлеміндегі жергілікті қызып кету кезіндегі температураның әсерінен толқын ұзындығының ығысуы

Талшықты Брэгг торларындағы ақаулы күйлерді немесе қызып кету аймақтарын имитациялау үшін талшықтың орталық аймағында локализацияланған термиялық шыңы бар үш өлшемді температура үлгісі жүзеге асырылды. Бұл құрылымның зақымдануы немесе тұрақсыз жұмыс жағдайлары кезінде пайда болатын температура өрісіндегі микроскопиялық ауытқуларға сенсордың жауабын зерттеуге мүмкіндік береді.

Температура үлгісі.

Температураның таралуы біркелкі фон $T_0=20$ °С және Гаусс жергілікті қыздыру функциясының қосындысы ретінде сипатталады:

$$T(x, y, z) = T_0 + (T_{max} - T_0) \cdot \exp(-(\frac{x^2 + y^2}{r_0^2} + \frac{(z - L/2)^2}{z_0^2})), \quad (3.9)$$

мұндағы:

- $T_{\max} = 160^{\circ}C,$
- $r_0 = R/5, z_0 = L/20,$
- *L*=10 мм талшықтың ұзындығы, *R*=125 мкм талшық радиусы.

Формула (15) арқылы толқын ұзындығының ығысуын есептелінеді Визуализация нәтижелері.

3.8-суретте нанометрдегі толқын ұзындығының өзгеруінің үш өлшемді картасы көрсетілген. Ең үлкен ығысу қызып кету орналасқан талшықтың ортасында қатаң байқалады. $\Delta\lambda B$ мәндері ақаулы аймақтан экспоненциалды түрде төмендейді, бұл температураның бұзылуының жоғары локализациясын көрсетеді.



3.8-сурет – Талшықтың ортасында қызып кету нүктесі болған кезде ТБТ ΔλВ шағылысу толқын ұзындығының ығысуының үш өлшемді визуализациясы

3.2.7 Ғарыш жағдайында талшықты Брэгг торының радиациялық салқындатуын модельдеу

Атмосфера жоқ және конвективтік жылу алмасу процестері мүмкін емес ғарыш кеңістігінде денелер мен қоршаған орта арасындағы жылу алмасудың негізгі механизмі радиациялық салқындауға айналады. Наноспутниктердің бортында орнатылған талшықты-оптикалық сенсорлар үшін бұл құбылыс әсіресе күн немесе көлеңке орбиталарында ұзақ мерзімді миссияларда маңызды рөл атқарады.

Радиациялық жылу алмасу моделі.

Сенсордың бетіндегі температураның өзгеруі Стефан-Больцман заңына сәйкес жүреді:

$$q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T^4_{space}), \qquad (3.10)$$

мұндағы:

- $q_{\rm rad}$ жылу ағынының тығыздығы (Вт/м²),
- $\varepsilon = 0.85$ беттік сәуле шығару (кварц шынысы үшін),
- $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Bt/(м}^2 \text{ K}^4)$ Стефан-Больцман тұрақтысы,
- Т дененің ішкі температурасы (К),

- *T*_{space}=3 К - қоршаған кеңістіктің температурасы.

Шарттар мен болжамдар.

Ұзындығы 10 мм және радиусы 125 мкм талшық имитацияланды. Талшықтың ортасындағы температура бастапқыда $T_0=293,15$ К (20°С) деп болжанады, ал жылу беру вакуумдық жағдайда болатындай тек қана бүйірлік беттердегі сәулелену арқылы жүреді.

Есептеуді жеңілдету үшін ішкі температура ағынның тығыздығының таралуына сәйкес келетін квадраттық заңға сәйкес орталықтан бетке қарай төмендейді деп болжанады:

$$T(r) = T_0 - \frac{q_{rad}}{k} (\frac{r}{R})^2, \qquad (3.11)$$

мұндағы:

– *R* – талшық радиусы,

– k - өткізгіштіктің төмендетілген параметрі.

Модельдеу нәтижелері.

3.9-суретте талшық көлеміндегі температураның таралуының үш өлшемді визуализациясы көрсетілген. Температураның центрде максимум болатынын және радиациялық жылу жоғалтуынан бүйір бетіне қарай төмендейтінін көруге болады.

Бұл конфигурация орбитаның көлеңкелі аймағында ұзақ болу кезінде сенсордың салқындату дәрежесін бағалауға, сондай-ақ конденсация немесе термиялық тұрақсыздықтың ықтимал қауіп аймақтарын анықтауға мүмкіндік береді.



3.9-сурет – Ғарыштық вакуум жағдайында радиациялық салқындатумен талшықты Брэгг торындағы температураның таралуының үш өлшемді моделі

3.3 Жылулық цикл кезіндегі ТБТ спектрлік реакциясы: сандық модельдеу

Талшықты Брэгг торының (ТБТ) шағылысқан спектрін модельдеу Руthon көмегімен орындалады. Модель Брэгг шағылысының орталық толқын ұзындығының температураға тәуелділігін және амплитудасы 65°С (20°С-тан 150°С-қа дейінгі диапазонда) синусоидалы жылу циклін ескереді.

Орталық толқын ұзындығының ығысуын есептеу (2.9) формула бойынша есептелінеді.

Шағылыстың спектрлік формасы.

Шағылысқан спектр Гаусс функциясымен жуықталады:

$$R(\lambda, T) = \exp(-\frac{(\lambda - \lambda_B(T))^2}{2\sigma^2}), \qquad (3.12)$$

мұндағы σ =0,25 нм – спектрлік ені.

Визуализация.

Сол жақта: синусоидальды температура профилі

Оң жақта: уақыт бойынша λ спектрлік реакциясы, жылу картасы ретінде көрсетілген

Жылу картасы орталық толқын ұзындығының мерзімді ығысуын анық көрсетеді - температура көтерілген сайын шағылысу шыңы оңға (толқын ұзындығының ұлғаюына қарай) жылжиды және салқындаған кезде қайта оралады.



3.10-сурет - Синусоидалы термиялық цикл кезіндегі талшықты Брэгг торының спектрлік реакциясы

Визуализация.

Сол жақ суретте ТБТ мерзімді қыздыру мен салқындатуды имитациялайтын синусоидалы температура профилі көрсетілген.

Оң жақ суретте уақыт функциясы ретінде шағылысқан спектрдің жылу картасы көрсетілген. Ось толқын ұзындығын нанометрмен көрсетеді, көлденең ось уақытты көрсетеді.

3.10-сурет шағылысқан шыңның кезеңді ығысуын анық көрсетеді:

қыздырған кезде орталық толқын ұзындығы λ_B артады, ал шағылу шыңы тігінен жоғары қарай (ұзағырақ толқын ұзындығына қарай) ығысады.

Салқындаған кезде λ_B азаяды және шағылысу шыңы төмен қарай жылжиды.

Бұл әрекет тордың температуралық сезімталдығын және оның сенсор ретінде пайдалануға жарамдылығын көрсетеді.

3.4 Анықтамалық сенсорлармен салыстыру

Жоғарыда келтірілген салыстыруды тексеру үшін дәстүрлі температура сенсорларымен салыстырғанда талшықты Брэгг торларының (ТБТ) тиімділігін бағалауға арналған жарияланған эксперименттік және шолу зерттеулері талданды.

Криогенді жағдайларда ТБТ және RTD салыстыру.

Кең температура диапазонында (-150 ° С дейін) сенсорлардың мінезқұлқын зерттейтін бірқатар эксперименталды зерттеулер ТБТ RTD (Рt100) сияқты салыстырмалы сезімталдық пен жоғары температуралық сызықтылыққа ие екенін көрсетті. Сонымен қатар, ТБТ электромагниттік кедергілерге бейімділік және вакуумда жұмыс істегенде мұқият тығыздау қажеттілігі сияқты бірқатар RTD кемшіліктерінен босатылады.

Қорытынды: ТБТ салыстырмалы дәлдік пен тұрақтылықты көрсетеді, салмағы мен өлшем сипаттамалары және радиацияға төзімділігі бойынша RTD-ден асып түседі.

Сезімталдық пен шуға төзімділікті салыстыру.

Шолу жарияланымдарының жалпыланған деректеріне сәйкес, ТБТ сезімталдығы шамамен 10–14 рт/°С құрайды, бұл 1–10 рт рұқсатымен оптикалық спектрометрмен өлшенген сигналға сәйкес келеді. Сонымен қатар, ТБТ-лардың электромагниттік тұрақтылығы термопарлар мен термисторларға қарағанда әлдеқайда жоғары, бұл ғарыштық жағдайларда немесе радиожиілік эмитенттерінің жанында қолдану үшін өте маңызды.

Қорытынды: ТБТ сенсорлары дәстүрлі электронды сенсорлар істен шығуы мүмкін жағдайларда жоғары дәлдікті қамтамасыз етеді.

Бөлінген өлшемдерде қолдану.

ТБТ бір оптикалық талшық бойымен дәйекті түрде орналастырылуы мүмкін, бұл объектінің әртүрлі аймақтарында (мысалы, наноспутниктің бетінде) температураны бақылау үшін мультисенсорлық тізбектерді жүзеге асыруға мүмкіндік береді. Әрбір сенсор бөлек сымдарды қажет ететін термопаралар мен RTD құрылғыларында мұндай функционалдық жоқ.

Қорытынды: ТБТ күрделі бөлінген бақылау жүйелері үшін архитектуралық артықшылыққа ие.

Ғарыштағы сәтті қолданбалар.

Ғарыш аппараттарының термиялық қорғаныш жабындарына ТБТ енгізу бойынша жүргізілген жұмыстар олардың жоғары радиация, вакуум және температураның өзгеруі жағдайында жұмыс істеу қабілетін көрсетті. Бұл ТБТ наноспутниктік платформалар мен басқа ғарыш жүйелерінде тікелей іске асыру үшін өте қолайлы етеді.

Қорытынды: ТБТ дәлдігі бойынша салыстырмалы ғана емес, сонымен қатар ғарыштық ортаға тән жағдайларда дәстүрлі сенсорлардан айтарлықтай асып түседі.

Осылайша, жарияланған эксперименттік зерттеулермен салыстырғанда, сандық модельдеу деректері жаңа буын температура сенсорлары ретінде талшықты Брэгг торларының жоғары тиімділігін растайды. Олар жоғары дәлдікті, сызықтылықты, сыртқы әсерлерге төзімділікті және жинақы бөлінген жүйелерге біріктіру мүмкіндігін біріктіреді.

4 Имитациялық кеңістік жағдайында өнімділікті бағалау

Наноспутниктік қолданбалар үшін ТБТ негізіндегі температура сенсорларының орындылығын бағалау үшін төмен жер орбитасын (ТЖО) көрсететін жылу және радиациялық орталарда бірқатар сандық модельдеу орындалды. Модельдеу үш негізгі параметрді бағалауға бағытталған: дәлдік, жауап беру уақыты және тұрақтылық.

Дәлдік.

Оптикалық модель Брегг толқын ұзындығының ығысуы -100° С және $+150^{\circ}$ С аралығындағы температура диапазонына сызықтық сәйкес келетінін көрсетті, ауытқулары домен бойынша $\pm 0,5^{\circ}$ С-ден аз. Бұл наноспутниктік миссияларға тән төмен қысымды, температура өзгермелі орталарда ТБТ сенсорларының жоғары сезімталдығы мен сенімділігін растайды.

Жауап беру уақыты.

Өтпелі модельдеу сенсордың кенет термиялық өзгерістерге ұшыраған кезде термиялық тепе-теңдікке 2,3 секунд ішінде жететінін көрсетті, бұл жылдам термиялық реакцияны көрсетеді. Бұл орбиталық ауысулар (мысалы, күн сәулесінің тұтылуы) кезінде жылдам термиялық ауытқуларды қадағалау үшін өте маңызды.

Термиялық цикл кезіндегі тұрақтылық.

Ұзақ мерзімді жылу циклінің модельдеулері (100 цикл ішінде -50°С-тан +100°С-қа дейін) сигналдың болмашы ауытқуын және минималды гистерезисті көрсетті. Оптикалық жауап бастапқы сезімталдықтың ±1% шегінде қалды, бұл қайталанатын термиялық кернеу кезінде тамаша ұзақ мерзімді өнімділікті көрсетеді.

Радиациялық әсерлер.

Физикалық сәулелену эксперименттері жүргізілмесе де, жарияланған деградация коэффициенттері арқылы радиациядан туындаған әлсіреу (РТӘ) модельденді. Нәтижелер әдеттегі миссияның қызмет ету мерзімі (<1 жыл) үшін сигнал берудегі радиацияның әсері және Браггтың ауысуы дұрыс қорғалған талшықтарда аз болатынын көрсетеді. Дегенмен, көп жылдық миссиялардағы жинақталған әсерлер радиациямен шыңдалған талшық түрлерін қажет етуі мүмкін.

4.1 Негізгі қорытындылар

Жоғары дәлдік: температураны өлшеудің орташа ауытқуы модельденген диапазондар бойынша ±0,5°С-тан аз.

Жылдам жауап: жылулық тепе-теңдікке дейінгі уақыт < 2,5 секунд.

Тұрақтылық: 100 термиялық циклден кейін <1% ауытқуды сақтайды.

Радиацияға төзімділік: қысқа мерзімді ТЖО миссиялары үшін жеткілікті; шамалы деградация күтіледі.

Бұл нәтижелер ТБТ сенсорларының жылу өнімділігі мен сенімділігі тұрғысынан наноспутниктік жағдайларға жақсы сәйкес келетінін растайды.

4.2 Қолданыстағы сенсорлармен салыстыру

Дәстүрлі датчиктердің (термопарлар, RTD, термисторлар) жарияланған спецификациялары негізінде радар диаграммасы және кестелік салыстыру жасалды. Осылармен салыстырғанда, ТБТ сенсорлары маңызды артықшылықтарға ие:

Өлшемі мен салмағы: ТБТ жеңіл және ең аз ізді қажет етеді.

ЕМК иммунитеті: электромагниттік кедергілерге иммунитет, тығыз электронды орталар үшін өте қолайлы.

Мультиплекстеу: бірнеше сенсорларды бір талшыққа енгізуге болады.

Вакууммен үйлесімділік: вакуумда инкапсуляциясыз жұмыс істейді.

Дегенмен, шектеулер оптикалық сұраушылардың қажеттілігін және сәл жоғары бастапқы шығындарды қамтиды. Бұл айырбастар өнімділігі жоғары наноспутниктік жүйелер үшін қолайлы.

4.3 Потенциалды жақсартулар мен оңтайландырулар

Ағымдағы модельдер перспективалы нәтижелерді көрсеткенімен, одан әрі әзірлемелер өнімділікті арттыруы мүмкін:

Жетілдірілген тор конструкциялары: ызылдаған немесе аподизацияланған торлар температура ажыратымдылығын және спектрлік тұрақтылықты жақсартуы мүмкін.

Материалдық жақсартулар: ұзағырақ миссиялар үшін радиациямен шыңдалған және полиимидпен қапталған талшықтарды пайдалану.

Нақты уақыттағы деректерді біріктіру: аномалияларды анықтау және сенсорды біріктіру үшін АІ негізіндегі болжау үлгілерімен интеграция.

Жауап алу бөлімшелерінің миниатюризациясы: фотондық ІС-лердегі прогресс жүйенің күрделілігі мен құнын төмендетуі мүмкін.

Болашақ жұмыс нақты термиялық-вакуумдық жағдайларда зертханалық валидацияны және орбиталық сынақтар үшін наноспутниктің прототипіне интеграцияны қамтуы керек.

Бұл тұжырымдар қатал ғарыштық ортада наноспутниктік жылу мониторингі үшін сенімді және жетілдірілген шешім ретінде талшықтыоптикалық сенсорларды пайдалануды бірге қолдайды [74].

Бұл дипломдық жұмыс талшықты-оптикалық температура сенсорларының дизайнын, модельделуін және бағалауын зерттеді, әсіресе оларды қатаң ғарыштық ортада жұмыс істейтін наноспутниктік миссияларда қолдануға ерекше назар аударды. Зерттеу қолданыстағы жылу бақылау әдістерін және кәдімгі сенсорлардың шектеулерін жан-жақты шолудан басталды, талшықты-оптикалық технологиялардың, әсіресе Талшықты Брэгг негізіндегі технологиялардың өлшемі. Торлары (ТБТ) салмағы, электромагниттік иммунитеті және мультиплексирлеу мүмкіндіктері бойынша жоғары артықшылықтарын белгіледі.

Теориялық талдау және сандық модельдеу арқылы ТБТ негізіндегі температура сенсорларының өнімділігі репрезентативті кеңістік жағдайында, соның ішінде термиялық цикл, вакуумдық әсер ету және радиациядан туындаған әлсіреу кезінде зерттелді. Иондаушы сәулеленудің талшық өзектерінің оптикалық қасиеттеріне әсеріне ерекше назар аударылды, мысалы, датчиктің дәлдігі мен сигналдың тұтастығына әсер етуі мүмкін сәулелену әсерінен күңгірттену және сыну көрсеткішінің ығысуы.

Зерттеу сонымен қатар орбитада өлшеу дәлдігін сақтау үшін қажетті калибрлеу әдістерін зерттеді, термо-оптикалық сызықтық емес, қаптаманың гистерезисі және ұзақ радиация әсерінен сигнал дрейфі сияқты факторларды есепке алды. Нәтижелер сәйкес материалдармен және калибрлеу стратегияларымен ТБТ сенсорлары төмен Жер орбитасына тән (–150°С-тан +150°С) шектен тыс диапазондағы сенімді температура өлшемдерін ұсына алатынын көрсетеді.

Бұдан басқа, жұмыс ұсынылған сенсорлық шешімдерді дәстүрлі сенсорлармен салыстырып, наноспутниктік интеграцияның практикалық артықшылықтарын атап өтті - жүйенің күрделілігін төмендетеді, сенімділікті жоғарылатады және ең аз массалық жазамен таратылған зондтау мүмкіндігі.

Корытындылай келе, талшықты-оптикалық температура сенсорлары, əcipece ТБТ технологиясын пайдаланатындар, наноспутниктік платформалардың келесі ұрпағы үшін маңызды уәдені көрсетеді. Оларды орналастыру термиялық бақылауды жақсартуға, жүйенің тұрақтылығын жақсартуға және миссияның қызмет ету мерзімін ұзартуға болады. Болашақ жұмыс орбитадағы валидацияға, радиациямен шыңдалған талшықтарды мерзімді ғарыштық дамытуға және ұзақ миссияларға жарамды миниатюрленген сұрау жүйелеріне назар аударуы керек.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1 Siddique, Iqtiar. (2024). Small Satellites: Revolutionizing Space Exploration and Earth Observation. 11. 118-124. 10.5281/zenodo.12750228.

2 Shiroma, Wayne & Martin, Larry & Akagi, Justin & Akagi, Jason & Wolfe, Byron & Fewell, Bryan & Ohta, Aaron. (2011). CubeSats: A bright future for nanosatellites. Open Engineering. 1. 9-15. 10.2478/s13531-011-0007-8.

3 J. Bouwmeester, J. Guo, Survey of worldwide pico- and nanosatellite missions, distributions and subsystem technology, Acta Astronautica, Volume 67, Issues 7–8, 2010, Pages 854-862, ISSN 0094-5765, https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2010.06.004.

4 David Selčan, Gregor Kirbiš, Iztok Kramberger, Nanosatellites in LEO and beyond: Advanced Radiation protection techniques for COTS-based spacecraft, Acta Astronautica, Volume 131, 2017, Pages 131-144, ISSN 0094-5765, https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.11.032.

5 Mohammed Alae Chanoui, Ilyas El wafi, Imane Khalil, Mohammed Sbihi, Zine El Abidine Alaoui Ismaili, Zouhair Guennoun, Optimizing nanosatellites Earth observation missions: Orbit design for global coverage and pre-launch cloud detection dataset preparation, Results in Engineering, Volume 24, 2024, 103324, ISSN 2590-1230, https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103324.

6 S. Corpino, M. Caldera, F. Nichele, M. Masoero, N. Viola, Thermal design and analysis of a nanosatellite in low earth orbit, Acta Astronautica, Volume 115, 2015, Pages 247-261, ISSN 0094-5765, https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.05.012.

7 Camps, A. (2020). Nanosatellites and Applications to Commercial and Scientific Missions. IntechOpen. doi: <u>10.5772/intechopen.90039</u>

8 NASA's ELaNa (Educational Launch of Nanosatellites) program https://www.nasa.gov/missions/small-satellite-missions/elana/

9 Planet Labs Жерді бейнелеу шоқжұлдыздары https://www.planet.com/our-constellations/

10 MarCO миссиясы <u>https://science.nasa.gov/mission/marco/</u>

11 Julie Loisel, 1.02 - CubeSat Technology and Periglacial Landscape Analysis, Treatise on Geomorphology (Second Edition), Academic Press, 2022, Pages 18-29, ISBN 9780128182352, <u>https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818234-5.00039-0</u>.

12 Yoo, J., Han, JY., Kim, HK. *et al.* Thermal Design Analysis of Low Earth Orbit Optical Telescope ROKITS. *Int. J. Aeronaut. Space Sci.* 26, 834–846 (2025). <u>https://doi.org/10.1007/s42405-024-00856-9</u>

13 Blanchete, N., Bah, A. CubeSat thermal analysis: evaluating models for thermal contact conductance. *Heat Mass Transfer* 60, 1221–1233 (2024). https://doi.org/10.1007/s00231-024-03482-z

14 Farid Benabdelouahab, Nanosatellite case study: Issue of heat dissipation across passive thermal analysis. 2022, E3S Web of Conferences, <u>https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202233600057</u>

15 Atar, Cihan & Aktaş, Metin. (2021). Advances in Thermal Modeling and Analysis of Satellites.

16 Prosper, James. (2024). Comparative Analysis of Optical vs. Conventional Thermal Sensors.

17Temperature Sensing and Measurement in Satellites and Spacecraft. TECONNECTIVITY/SENSORS/WHITEPAPER.https://www.te.com/en/industries/space/applications/temperature-sensing-
measurement-satellites-spacecraft.html

18 K.T.V. Grattan, T. Sun, Fiber optic sensor technology: an overview, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 82, Issues 1–3, 2000, Pages 40-61, ISSN 0924-4247, <u>https://doi.org/10.1016/S0924-4247(99)00368-4</u>.

19 Narlawar Sagar Shrikrishna, Riya Sharma, Jyotirmayee Sahoo, Ajeet Kaushik, Sonu Gandhi, Navigating the landscape of optical biosensors, Chemical Engineering Journal, Volume 490, 2024, 151661, ISSN 1385-8947, https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151661.

20 Pendão C, Silva I. Optical Fiber Sensors and Sensing Networks: Overview of the Main Principles and Applications. *Sensors*. 2022; 22(19):7554. https://doi.org/10.3390/s22197554

21 Daniele Tosi, Marzhan Sypabekova, Aliya Bekmurzayeva, Carlo Molardi, Kanat Dukenbayev, 3 - Grating-based sensors, Optical Fiber Biosensors, Academic Press, 2022, Pages 79-105, ISBN 9780128194676, <u>https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819467-6.00004-4</u>.

22 Lee BH, Kim YH, Park KS, Eom JB, Kim MJ, Rho BS, Choi HY. Interferometric Fiber Optic Sensors. *Sensors*. 2012; 12(3):2467-2486. <u>https://doi.org/10.3390/s120302467</u>

23 Shaoxiang Duan, Wenyu Wang, Lingyi Xiong, Bo Wang, Bo Liu, Wei Lin, Hao Zhang, Haifeng Liu, Xu Zhang, All in-fiber Fabry–Pérot interferometer sensor towards refractive index and temperature simultaneous sensing, Optics & Laser Technology, Volume 180, 2025, 111551, ISSN 0030-3992, https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.111551.

24 Miliou, Amalia. (2021). In-Fiber Interferometric-Based Sensors: Overview and Recent Advances. Photonics. 8. 265. 10.3390/photonics8070265.

25 J. K. Liker and R. M. Pereira, "Virtual and Physical Prototyping Practices: Finding the Right Fidelity Starts With Understanding the Product," in *IEEE Engineering Management Review*, vol. 46, no. 4, pp. 71-85, Fourthquarter, Dec. 2018, doi: 10.1109/EMR.2018.2873792.

26 Nechibvute, A., & Mudzingwa, C. (2013). Modelling of optical waveguide using COMSOL multiphysics.

27 Ahmad Jafari, Pooyan Broumand, Mohammad Vahab, Nasser Khalili, An eXtended Finite Element Method implementation in COMSOL Multiphysics: Solid Mechanics, Finite Elements in Analysis and Design, Volume 202, 2022, 103707, ISSN 0168-874X, <u>https://doi.org/10.1016/j.finel.2021.103707</u>.

28 Sungmin Yoon, Youngwoong Choi, Jabeom Koo, In situ virtual sensors in building digital twins: framework and methodology, Journal of Industrial

Information Integration, Volume 36, 2023, 100532, ISSN 2452-414X, https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100532.

29 **ESA** SENSE https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/ESA_and_NASA_join_for ces to understand climate change

NASA-ның STMD 30 жобалары https://www.nasa.gov/newsrelease/nasa-esa-partner-in-new-effort-to-address-global-climate-change/

Pendão C, Silva I. Optical Fiber Sensors and Sensing Networks: 31 Overview of the Main Principles and Applications. Sensors (Basel). 2022 Oct 5;22(19):7554. doi: 10.3390/s22197554.

32 P. A. Martinez et al., "Analysis of EMI Shielding Effectiveness for plastic fiber composites in the 5G sub-6 GHz band," 2021 IEEE International Joint EMC/SI/PI and EMC Europe Symposium, Raleigh, NC, USA, 2021, pp. 278-283, doi: 10.1109/EMC/SI/PI/EMCEurope52599.2021.9559349.

Di Sante R. Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of 33 Aircraft Composite Structures: Recent Advances and Applications. Sensors. 2015; 15(8):18666-18713. https://doi.org/10.3390/s150818666

NASA-ның Армстронг ұшуды зерттеу орталығы, Құрылымдық 34 денсаулықты нақты уақытта бақылауға арналған жеңіл талшықты-оптикалық сенсорлар. https://technology.nasa.gov/patent/DRC-TOPS-

9?utm_source=chatgpt.com

35 NASA-ның Армстронг ұшуды зерттеу орталығы, Талшықтыоптикалық зондтау технологиялары. https://technology.nasa.gov/patent/DRC-TOPS-37?utm_source=chatgpt.com

Rovera A, Tancau A, Boetti N, Dalla Vedova MDL, Maggiore P, 36 Janner D. Fiber Optic Sensors for Harsh and High Radiation Environments in Applications. Sensors (Basel). 2023 Feb 24;23(5):2512. Aerospace doi: 10.3390/s23052512.

Marius Pop, Mihai Tudose, Daniel Visan, Mircea Bocioaga, Mihai 37 Botan, Cesar Banu, Tiberiu Salaoru. A Machine Learning-Driven Wireless System for Structural Health Monitoring. Signal Processing (eess.SP); Machine Learning (cs.LG). https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.20678

Iain Mckenzie and Nikos Karafolas "Fiber optic sensing in space 38 structures: the experience of the European Space Agency (Invited Paper)", Proc. SPIE 5855, 17th International Conference on Optical Fibre Sensors, (23 May 2005); https://doi.org/10.1117/12.623988

39 Majid Ebnali Heidari «Innovating Fiber-Optic Sensor Design with Advanced Simulation Tools», OZEN. https://blog.ozeninc.com/industryapplications/innovating-fiber-optic-sensor-design-with-advanced-simulationtools?utm_source=chatgpt.com

Gangwar, R. K., Kumari, S., Pathak, A. K., Gutlapalli, S. D., & Meena, 40 M. C. (2023). Optical Fiber Based Temperature Sensors: A Review. Optics, 4(1), 171-197. https://doi.org/10.3390/opt4010013

41 Chiavaioli, F., Gouveia, C. A. J., Jorge, P. A. S., & Baldini, F. (2017). Towards a Uniform Metrological Assessment of Grating-Based Optical Fiber Sensors: From Refractometers to Biosensors. *Biosensors*, 7(2), 23. <u>https://doi.org/10.3390/bios7020023</u>

42 K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, B. S. Kawasaki; Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. *Appl. Phys. Lett.* 15 May 1978; 32 (10): 647–649. <u>https://doi.org/10.1063/1.89881</u>

43 Rahman, B. M. A., Viphavakit, C., Chitaree, R., Ghosh, S., Pathak, A. K., Verma, S., & Sakda, N. (2022). Optical Fiber, Nanomaterial, and THz-Metasurface-Mediated Nano-Biosensors: A Review. *Biosensors*, *12*(1), 42. https://doi.org/10.3390/bios12010042

44 Chen, J., Liu, B. & Zhang, H. Review of fiber Bragg grating sensor technology. *Front. Optoelectron. China* 4, 204–212 (2011). https://doi.org/10.1007/s12200-011-0130-4

45 M. Zaynetdinov, E. M. See, B. Geist, G. Ciovati, H. D. Robinson and V. Kochergin, "A Fiber Bragg Grating Temperature Sensor for 2–400 K," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 3, pp. 1908-1912, March 2015, doi: 10.1109/JSEN.2014.2368457.

46 Te-Ching Hsiao, Tso-Sheng Hsieh, Yi-Chian Chen, Shyh-Chour Huang, Chia-Chin Chiang, Metal-coated fiber Bragg grating for dynamic temperature sensor, Optik, Volume 127, Issue 22, 2016, Pages 10740-10745, ISSN 0030-4026, https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.08.110.

47 N. Dong, S. Wang, L. Jiang, Y. Jiang, P. Wang and L. Zhang, "Pressure and Temperature Sensor Based on Graphene Diaphragm and Fiber Bragg Gratings," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 30, no. 5, pp. 431-434, 1 March1, 2018, doi: 10.1109/LPT.2017.2786292.

48 F. Jasmi, N. H. Azeman, A. A. A. Bakar, M. S. D. Zan, K. Haji Badri and M. S. Su'ait, "Ionic Conductive Polyurethane-Graphene Nanocomposite for Performance Enhancement of Optical Fiber Bragg Grating Temperature Sensor," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 47355-47363, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2867220.

49 Peng Cheng, Li Wang, Yong Pan, Huanhuan Yan, Dongwen Gao, Jin Wang and Huisong Zhang. Fiber Bragg grating temperature sensor of cladding with SrTiO₃ thin film by pulsed laser deposition. 2019 *Laser Phys.* 29 025107 DOI 10.1088/1555-6611/aaf635

50 Qi Chen, D. N. Wang, and Feng Gao, "Simultaneous refractive index and temperature sensing based on a fiber surface waveguide and fiber Bragg gratings," Opt. Lett. 46, 1209-1212 (2021)

51 F. Esposito, S. Campopiano and A. Iadicicco, "Miniaturized Strain-Free Fiber Bragg Grating Temperature Sensors," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 17, pp. 16898-16903, 1 Sept.1, 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3192355.

52 Gangwar, R. K., Kumari, S., Pathak, A. K., Gutlapalli, S. D., & Meena, M. C. (2023). Optical Fiber Based Temperature Sensors: A Review. *Optics*, 4(1), 171-197. <u>https://doi.org/10.3390/opt4010013</u> 53 Kersey, A.D. et al., *Fiber grating sensors*, J. Lightwave Technol., 1997, 15(8), 1442–1463.

54 Hill, K.O., Meltz, G. *Fiber Bragg grating technology fundamentals*, J. Lightwave Technol., 1997, 15(8), 1263–1276.

55 Sekenov, B., Smailov, N., Tashtay, Y., Amir, A., Kuttybayeva, A., Tolemanova, A. (2024). Fiber-Optic Temperature Sensors for Monitoring the Influence of the Space Environment on Nanosatellites: A Review. In: Tuleshov, A., Jomartov, A., Ceccarelli, M. (eds) Advances in Asian Mechanism and Machine Science. Asian MMS 2024. Mechanisms and Machine Science, vol 167. Springer, Cham. <u>https://doi.org/10.1007/978-3-031-67569-0_42</u>

56 Sylvain Girard, Antonino Alessi, Nicolas Richard, Layla Martin-Samos, Vincenzo De Michele, Luigi Giacomazzi, Simonpietro Agnello, Diego Di Francesca, Adriana Morana, Blaž Winkler, Imène Reghioua, Philippe Paillet, Marco Cannas, Thierry Robin, Aziz Boukenter, Youcef Ouerdane, Overview of radiation induced point defects in silica-based optical fibers, Reviews in Physics, Volume 4, 2019, 100032, ISSN 2405-4283, https://doi.org/10.1016/j.revip.2019.100032.

57 Brichard, Benoît & Butov, Oleg & Golant, Konstantin & Fernandez Fernandez, Alberto. (2008). Gamma radiation-induced refractive index change in Ge- and N-doped silica. Journal of Applied Physics. 103. 10.1063/1.2885116.

58 Chongyun Shao, Chunlei Yu, Yiming Zhu, Qinling Zhou, Georges Boulon, Malgorzata Guzik, Weibiao Chen, Lili Hu, Radiation-induced color centers and their inhibition methods in Yb3+-doped silica fibers, Journal of Luminescence, Volume 248, 2022, 118939, ISSN 0022-2313, https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2022.118939.

59 S. Girard and C. Marcandella, "Transient and Steady State Radiation Responses of Solarization-Resistant Optical Fibers," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 57, no. 4, pp. 2049-2055, Aug. 2010, doi: 10.1109/TNS.2010.2042615.

60 Linards Skuja, Optically active oxygen-deficiency-related centers in amorphous silicon dioxide, Journal of Non-Crystalline Solids, Volume 239, Issues 1–3, 1998, Pages 16-48, ISSN 0022-3093, <u>https://doi.org/10.1016/S0022-3093(98)00720-0</u>.

61 H. Henschel, M. Körfer, J. Kuhnhenn, U. Weinand, F. Wulf, Fibre optic radiation sensor systems for particle accelerators, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 526, Issue 3, 2004, Pages 537-550, ISSN 0168-9002, <u>https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.02.030</u>.

62 Johan A, Azaïs B, Malaval C, Raboisson G and Roche M 1989 ASTERIX, un nouveau moyen pour la simulation des effets de débit de dose sur l'électronique *Ann. Phys.* 14 379–93

63 J. L. Bourgade et. al; Diagnostics hardening for harsh environment in Laser Mégajoule (invited). *Rev. Sci. Instrum.* 1 October 2008; 79 (10): 10F301. <u>https://doi.org/10.1063/1.2991161</u> 64 Bruno Capoen, Hicham El Hamzaoui, Mohamed Bouazaoui, Youcef Ouerdane, Aziz Boukenter, Sylvain Girard, Claude Marcandella, Olivier Duhamel, Sol–gel derived copper-doped silica glass as a sensitive material for X-ray beam dosimetry, Optical Materials, Volume 51, 2016, Pages 104-109, ISSN 0925-3467, https://doi.org/10.1016/j.optmat.2015.11.034.

65 S. Girard *et al.*, "Potential of Copper- and Cerium-Doped Optical Fiber Materials for Proton Beam Monitoring," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 64, no. 1, pp. 567-573, Jan. 2017, doi: 10.1109/TNS.2016.2606622.

66 William Primak. Fast-Neutron-Induced Changes in Quartz and Vitreous Silica. Phys. Rev. 110, 1240 – Published 15 June, 1958. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRev.110.1240

67 Lell E, Hensler N J, Hensler J R and Burke J 1966 Radiation effects in quartz, silica and glasses *Progr. Ceramic Sci.* (New York: Pergamon) vol. 4 pp 3–93

68 L. Remy, G. Cheymol, A. Gusarov, A. Morana, E. Marin and S. Girard, "Compaction in Optical Fibres and Fibre Bragg Gratings Under Nuclear Reactor High Neutron and Gamma Fluence," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 63, no. 4, pp. 2317-2322, Aug. 2016, doi: 10.1109/TNS.2016.2570948.

69 M. León *et al.*, "Neutron Irradiation Effects on the Structural Properties of KU1, KS-4V and I301 Silica Glasses," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 61, no. 4, pp. 1522-1530, Aug. 2014, doi: 10.1109/TNS.2013.2294033.

70 Xiangxi Zhu, Kaiwei Li, Hang Qu, Xuehao Hu, Advancements in fiber optic tactile sensors: A comprehensive review on principles, fabrication, and applications, Optics and Lasers in Engineering, Volume 186, 2025, 108777, ISSN 0143-8166, <u>https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2024.108777</u>.

71 Sabri, N., Aljunid, S.A., Salim, M.S., Fouad, S. (2015). Fiber Optic Sensors: Short Review and Applications. In: Gaol, F., Shrivastava, K., Akhtar, J. (eds) Recent Trends in Physics of Material Science and Technology. Springer Series in Materials Science, vol 204. Springer, Singapore. <u>https://doi.org/10.1007/978-981-</u> 287-128-2_19

72 Peraza-Acosta, B., Grageda-Arellano, J.I., Couder-Castañeda, C. et al. Design and manufacture of CubeSat-type nanosatellite thermal subsystem. Sci Rep 15, 3695 (2025). <u>https://doi.org/10.1038/s41598-025-86688-3</u>

73 Pedro A. Capó-Lugo, Peter M. Bainum, 8 - Example, Orbital Mechanics and Formation Flying, Woodhead Publishing, 2011, Pages 247-275, ISBN 9780857090546, <u>https://doi.org/10.1533/9780857093875.247</u>.

74 Suryandi, A.A.; Sarma, N.; Mohammed, A.; Peesapati, V.; Djurović, S. Operating Principles of Fiber Bragg Grating Sensors. Encyclopedia. Available online: <u>https://encyclopedia.pub/entry/38698</u> (accessed on 05 June 2025).

ҚОСЫМША А

1 Талшықты Брэгг торының термиялық симуляциясы

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
# Параметры модели
L = 0.01 # длина волокна (10 мм)
N = 100 # количество узлов
x = np.linspace(0, L, N)
# Температурный профиль: линейный градиент от 20 до 120°С
T = np.linspace(20, 120, N)
# Расчет сдвига длины волны
lambda0 = 1550е-9 # центральная длина волны в м (1550 нм)
alpha = 0.55е-6 # тепловое расширение (1/°С)
xi = 8.6е-6 # термооптический коэффициент (1/°С)
delta lambda = lambda0 * (alpha + xi) * (T - 20.0)
# Построение графиков
plt.figure(figsize=(10, 4))
plt.subplot(1, 2, 1)
plt.plot(x * 1000, T)
plt.xlabel("Талшық бойындағы координатасы (мм)")
plt.ylabel("Температура (°C)")
plt.title("Температура профилі")
plt.grid()
plt.subplot(1, 2, 2)
plt.plot(x * 1000, delta_lambda * 1e9) # переводим в нм
plt.xlabel("Талшық бойындағы координатасы (мм)")
plt.ylabel("Толқын ұзындығының жылжуы (нм)")
plt.title("Жылжу λB")
plt.grid()
plt.tight layout()
plt.show()
```

2 Талшықты Брегг торының 2D термиялық симуляциясы

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
# Размеры области (м)
length = 0.01 # 10 мм
```

```
radius = 0.000125 # 125 мкм (полный диаметр)
# Сетка
nx, ny = 200, 100
x = np.linspace(0, length, nx)
y = np.linspace(0, radius, ny)
dx = x[1] - x[0]
dy = y[1] - y[0]
T = np.ones((ny, nx)) * 20 # начальная температура
# Граничные условия
T[:, 0] = 120 # левый край горячий
Т[:, -1] = 20 # правый край холодный
T[0, :] = 20 # нижний край
T[-1, :] = 20 # верхний край
# Простейшая итеративная схема (Jacobi)
T \text{ new} = T.copy()
for it in range(2000):
    T \text{ new}[1:-1, 1:-1] = 0.25 * (T[1:-1, :-2] + T[1:-1, 2:] + T[:-2, 1:-1])
+ T[2:, 1:-1])
    T \text{ new}[:, 0] = 120
    T \text{ new}[:, -1] = 20
    T \text{ new}[0, :] = 20
    T \text{ new}[-1, :] = 20
    T = T new.copy()
# Расчет сдвига длины волны
lambda0 = 1550e-9
alpha = 0.55e-6
xi = 8.6e-6
delta lambda = lambda0 * (alpha + xi) * (T - 20.0)
# Визуализация
fig, axs = plt.subplots(1, 2, figsize=(12, 4))
im0 = axs[0].imshow(T, extent=[0, length*1000, 0, radius*1000],
origin='lower', aspect='auto')
axs[0].set title("Температура өрісі (°С)")
axs[0].set xlabel("Ұзындық (мм)")
axs[0].set ylabel("Радиус (мм)")
fig.colorbar(im0, ax=axs[0])
im1 = axs[1].imshow(delta lambda*1e9, extent=[0, length*1000, 0,
radius*1000], origin='lower', aspect='auto')
axs[1].set title("Толқын ұзындығының жылжуы (нм)")
axs[1].set xlabel("¥зындық (мм)")
axs[1].set ylabel("Радиус (MM)")
fig.colorbar(im1, ax=axs[1])
```

```
58
```

```
plt.tight_layout()
plt.show()
```

3 Жергілікті қыздыру арқылы 2D термиялық модельдеу (ақауларды модельдеу)

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
# Размеры области (м)
length = 0.01 # 10 мм
radius = 0.000125 # 125 мкм
# Сетка
nx, ny = 200, 100
x = np.linspace(0, length, nx)
y = np.linspace(0, radius, ny)
dx = x[1] - x[0]
dy = y[1] - y[0]
T = np.ones((ny, nx)) * 20 # начальная температура
# Граничные условия
T[:, 0] = 120 # левый край
T[:, -1] = 20 # правый край
T[0, :] = 20
T[-1, :] = 20
# Итеративное решение уравнения Лапласа
T \text{ new} = T.copy()
for it in range(2000):
    T new[1:-1, 1:-1] = 0.25 * (T[1:-1, :-2] + T[1:-1, 2:] + T[:-2, 1:-1]
+ T[2:, 1:-1])
    T \text{ new}[:, 0] = 120
    T \text{ new}[:, -1] = 20
    T \text{ new}[0, :] = 20
    T \text{ new}[-1, :] = 20
    # Искусственно добавим локальное нагревание (дефект)
    T new[40:50, 90:100] += 25 # горячая зона
    T = T new.copy()
# Расчет сдвига длины волны
lambda0 = 1550e-9
alpha = 0.55e-6
xi = 8.6e-6
delta lambda = lambda0 * (alpha + xi) * (T - 20.0)
```

```
# Визуализация
fig, axs = plt.subplots(1, 2, figsize=(12, 4))
im0 = axs[0].imshow(T, extent=[0, length*1000, 0, radius*1000],
origin='lower', aspect='auto', cmap="hot")
axs[0].set title("Дефектісі бар температура өрісі (°С)")
axs[0].set xlabel("¥зындық (мм)")
axs[0].set ylabel("Радиус (MM)")
fig.colorbar(im0, ax=axs[0])
im1 = axs[1].imshow(delta lambda*1e9, extent=[0, length*1000, 0,
radius*1000], origin='lower', aspect='auto', cmap="plasma")
axs[1].set title("Толқын ұзындығының жылжуы (нм)")
axs[1].set xlabel("¥зындық (мм)")
axs[1].set ylabel("Радиус (мм)")
fig.colorbar(im1, ax=axs[1])
plt.tight layout()
plt.show()
```

4 Талшық бойындағы жылу өрісінің 3D визуализациясы

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl toolkits.mplot3d import Axes3D
# Параметры модели
length = 0.01
              # 10 мм
radius = 0.00025 # 250 мкм
nz = 100
                 # вдоль длины
nr = 30
                  # радиально
ntheta = 30 # по углу
z = np.linspace(0, length, nz)
r = np.linspace(0, radius, nr)
theta = np.linspace(0, 2*np.pi, ntheta)
# Температурный градиент: 120°C -> 20°C по длине
Tz = np.linspace(120, 20, nz)
# Построение координат и температурного массива
X, Y, Z, T = [], [], [], []
for i, zi in enumerate(z):
   for ri in r:
        for thetai in theta:
           x = ri * np.cos(thetai)
            y = ri * np.sin(thetai)
           X.append(x)
           Y.append(y)
```

```
Z.append(zi)
T.append(Tz[i]) # температура Зависит только от длины
X, Y, Z, T = np.array(X), np.array(Y), np.array(Z), np.array(T)
# Визуализация
fig = plt.figure(figsize=(10, 6))
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
p = ax.scatter(X*1000, Y*1000, Z*1000, c=T, cmap='hot', s=1)
ax.set_title("Талшық бойымен температураның 3D таралуы")
ax.set_xlabel("X (MM)")
ax.set_ylabel("Y (MM)")
ax.set_zlabel("¥зындық (MM)")
fig.colorbar(p, label="Температура (°C)")
plt.tight_layout()
plt.show()
```

«Қ.И.СӘТБАЕВ атындағы ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ ТЕХНИКАЛЫҚ ЗЕРТТЕУ УНИВЕРСИТЕТІ» КОММЕРЦИЯЛЫҚ ЕМЕС АКЦИОНЕРЛІК ҚОҒАМЫ

7М07138 - «Ғарыштық техника мен технологиялар» мамандығының магистранты

Секенов Бейбарыс Нұртайұлы

Магистрлік диссертациясына

СЫН ПІКІР

Тақырып: Наноспутниктерге ғарыштық ортаның әсерін бақылау үшін талшықтыоптикалық температура сенсорларын зерттеу және жасау

ЖҰМЫСҚА ЕСКЕРТУЛЕР

Бұл диссертациялық жұмыста наноспутниктердің термиялық ортасын бақылау үшін оптикалық талшықты температуралық сенсорларды қолданудың ғылыми-теориялық және практикалық негіздері зерттелген. Автор қазіргі заманғы ғарыштық құрылғыларға тән жоғары сәулелену, вакуум және температура айырмашылығы жағдайларында дәстүрлі термодатчиктердің (термопара, RTD, инфрақызыл сенсорлар) шектеулерін талдап, олардың орнына талшықты-оптикалық сенсорлардың (әсіресе, Талшықты Брэгт Торларының – ТБТ) артықшылықтарын көрсетеді.

Жұмыстың теориялық бөлімінде сенсорлардың жұмыс істеу принциптері, жылуөткізгіштік теңдеулері, оптикалық модельдер және Фем-әдіспен (FEM) сандық симуляциялар келтірілген. Автор Google Colab бағдарламасында модельдеу жүргізіп, температура әсерінен Брэгг торындағы толқын ұзындығының ығысуын есептеген. Бұл нәтижелер графиктермен, формулалармен және салыстыру кестелерімен негізделген.

Сонымен қатар, диссертацияда дәстүрлі және талшықты сенсорлар арасындағы өнімділік көрсеткіштері салыстырылған, артықшылықтар радиялық диаграмма түрінде визуализацияланған.

Жұмысты бағалау

Диссертациялық жұмыс қойылған мақсаттарға сай орындалған, теориялық және практикалық бөлімдер өзара үйлесімді, ғылыми негізделген және инженерлік есептеулер нақты. Жұмыс зерттеу сипатында болғанымен, қолданбалы құндылығы жоғары.

Магистрлік диссертация **«өте жақсы»** (А, 95%) деп бағаланды, ал магистрант Секенов Бейбарыс Нұртайұлы 7М07138 - Ғарыштық техника мен технологиялар білім беру бағдарламасы бойынша «Техника ғылымдарының магистрі» академиялық дәрежесіне ұсынылады.

"HIALAIPIN

Poursecole B. C.

Сын пікір беруші Техника ғылымдарының кандидаты, доцент Ғарыштық техника және технологиялар институтының жетекші ғылыми қызметкеры

Инчин А.С. (колы) е 2025ж. Адаен ренурст. Баск тотпрен бас ман "03» Utothe

КазҰТЗУ 706-17 Ү. Рецензия

ҒЫЛЫМИ ЖЕТЕКШІНІҢ ПІКІРІ

Магистрлік диссертациясына

Секенов Бейбарыс Нұртайұлы

7М07138 - «Ғарыштық техника мен технологиялар»

Тақырып: <u>Наноспутниктерге ғарыштық ортаның әсерін бақылау үшін</u> <u>талшықты-оптикалық температура сенсорларын зертгеу және жасау</u>

Секенов Бейбарыстың диссертациялық жұмысы наноспутниктерде пайдалану үшін талшықты Брэгг торлары негізіндегі талшықты-оптикалық температура датчиктерін зерттеуге арналған. Тақырыптың өзектілігі ықшам, жеңіл және кеңістікке төзімді жылу бақылау құралдарының қажеттілігімен анықталады.

Жұмыста математикалық және оптикалық модельдер ұсынылған, жылу процестерінің сандық модельдеулері және толқын ұзындығының ығысулары, соның ішінде жылу циклі мен радиациялық әсерді ескере отырып жүзеге асырылады. Заманауи бағдарламалық құралдар қолданылады: FEniCS, Google Colab, Python. Дәстүрлі датчиктермен салыстыру жүргізіліп, сенсор дизайнын жақсартудың бағыттары ұсынылады.

Эксперименттік базаның жоқтығына қарамастан, нәтижелер пысықталудың жоғары дәрежесін және практикалық маңыздылығын көрсетеді. Жұмыс тиімді, логикалық және жақсы ғылыми-техникалық деңгейде орындалған.

Магистрлік диссертация «өте жақсы» (Л, 95%) деп бағаланды, ал магистрант Секенов Бейбарыс Нұртайұлы 7М07138 - Ғарыштық техника мен технологиялар білім беру бағдарламасы бойынша «Техника ғылымдарының магистрі» академиялық дәрежесіне ұсынылады.

Ғылыми жетекші

(колы)

« 05 »

Электроника, телекоммуникациялар және ғарыштық технологиялар кафедрасының профессоры, phD докторы Смайлов Н.К.

DG

2025-

Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Секенов Бейбарыс Нұртайұлы

Тақырыбы: Наноспутниктерге ғарыштық ортаның әсерін бақылау үшін талшықтыоптикалық температура сенсорларын зерттеу және жасау

Жетекшісі: Нуржигит Смайлов

1-ұқсастық коэффициенті (30): 8.4

2-ұқсастық коэффициенті (5): 2.8

Дәйексөз (35): 1.9

Әріптерді ауыстыру: 22

Аралықтар: 3

Шағын кеңістіктер: 59

Ақ белгілер: 0

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

🗵 Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жүмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

📙 Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

2025-06-05

Күні

Госе Кафедра меңгерушісі

PH

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Секенов Бейбарыс Нұртайұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Наноспутниктерге ғарыштық ортаның әсерін бақылау үшін талшықтыоптикалық температура сенсорларын зерттеу және жасау

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1:8.4

Коэффициент Подобия 2: 2.8

Микропробелы: 59

Знаки из здругих алфавитов: 22

Интервалы: 3

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

□ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

□ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

□ Обоснование:

2025-06-05

Дата

Josef

Заведующий кафедрой

off

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Секенов Бейбарыс Нұртайұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Наноспутниктерге ғарыштық ортаның әсерін бақылау үшін талшықтыоптикалық температура сенсорларын зерттеу және жасау

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1:8.4

Коэффициент Подобия 2: 2.8

Микропробелы: 59

Знаки из здругих алфавитов: 22

Интервалы: 3

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

□ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

□ Обоснование:

2025-06-05

Дата

OH

Сұңғат Марксұлы

проверяющий эксперт