

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ
МИНИСТРЛІГІ**
Коммерциялық емес акционерлік қоғамы
**Ғумарбек Даукеев атындағы АЛМАТЫ ЭНЕРГЕТИКА ЖӘНЕ
БАЙЛАНЫС УНИВЕРСИТЕТІ**

Кафедра: Телекоммуникациялық желілер және жүйелер

Мамандығы: 6М071900 – Радиотехника, электроника және телекоммуникация

Қорғауға жіберіледі
ТКЖЖ кафедра меңгерушісі
PhD, доцент Темырканова Э.К.
(ғылыми дәрежесі, атағы, аты-жөні)

(қолы)

« _____ » _____ 2020 г.

МАГИСТЕРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ
түсіндірме жазба

Тақырыбы: «OptiSystem бағдарламасын қолдана БРЭГГ торы арқылы
сенсор жүйелерінің сипаттамасын модельдеу»

Магистрант: Расул Д.Қ _____ группа МРЭТн-18-1
(аты-жөні.) (қолы)

Жетекшісі: к.т.н., профессор _____ Касимов А.О.
(ғылыми дәрежесі, атағы) (қолы) (аты-жөні.)

Пікір жазушы _____
(ғылыми дәрежесі, атағы) (қолы) (аты-жөні)

ЕТ қолдану кеңесшісі к.т.н., профессор _____ Касимов А.О.
(ғылыми дәрежесі, атағы) (қолы) (аты-жөні.)

Мөлшер бақылаушы: к.т.н., профессор _____ Касимов А.О.
(ғылыми дәрежесі, атағы) (қолы) (аты-жөні.)

Алматы 2020

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ
МИНИСТРЛІГІ**
Коммерциялық емес акционерлік қоғамы
**Ғумарбек Даукеев атындағы АЛМАТЫ ЭНЕРГЕТИКА ЖӘНЕ
БАЙЛАНЫС УНИВЕРСИТЕТІ**

Ғарыштық инженерия және телекоммуникациялар институты
Кафедра: Телекоммуникациялық желілер және жүйелер
Мамандығы:6М071900 – Радиотехника , электроника және телекоммуникация

Магистрлік диссертацияны орындауға арналған тапсырма

Магистрант Расул Даулетхан Қазнабиқызы

(аты-жөні)

Диссертацияның тақырыбы « OptiSystem бағдарламасын қолдана БРЭГГ торы арқылы сенсор жүйелерінің сипаттамасын модельдеу »

Университеттің Ғылыми кеңесімен № 43 бұйрығымен «18» наурыз 2020 жылы бекітілген

Аяқталған диссертацияны тапсыру мерзімі «25» мамыр 2020 ж.

Диссертациялық жұмыстың мақсаты: FBG технологиясына жүйелі теориялық талдау жасау және FBG сенсордің характеристикасын OptiSystem бағдарламасы арқылы модельдеу.

Магистрлік диссертациялық сұрақтарда немесе мәселелерде баяндалатын мәселелер тізімі Магистрлік диссертацияның қысқаша мазмұны:

1. OptiSystem бағдарламасы арқылы температура мен толқын ұзындығы арасындағы байланысты модельдеу, талдау және қортындылау.
2. OptiSystem бағдарламасы арқылы механикалық кернеу мен толқын ұзындығы арасындағы байланысты модельдеу, талдау және қортындылау.
3. Кросс-сезімталдық мәселесіне теориялық талдау, оны шешу амалын жобалап модельдеу арқылы жарамдылығын дәлелдеу.
4. FBG сенсорының өзіндік параметрі, оның характеристикасына қандай әсері болатынын модельдеу және талдау.

Графикалық материалдардың тізімі (міндетті сызбаларды нақты көрсете отырып):

- 2.7 сурет – Температураның өзгеруіне байланысты шағылысу спектры;
- 2.15 сурет - Сенсордың шағылысу спектры (механикалық кернеуге 6 түрлі мән берілген);
- 3.5 сурет - шағылысу спектры (температура:0 -50 °C,механикалық кернеу:0-500μξ);
- 4.2-сурет. Екі түрлі өткізу қабілеттілігі әсеріндегі FBG сенсорінің шағылысу спектрі;
- 4.3-сурет. Модельдеудегі шағылысу спектрі;
- 4.5-сурет. шағылысу коэффициенті мен өткізу қабілетінің байланысы;

4.6-сурет. шағылысу коэффициенті мен оптикалық қуат байланысы.

Ұсынылған негізгі әдебиеттер

1. Кусамбаева Н.Ш, Касимов А.О. Влияние аподизации сменно периодической брэгговской решетки на поляризационно-модовую дисперсию Новости науки Казахстана. № 1 (135). 2018
2. T. Erdogan and J. Light wave, "Fiber Grating Spectra," Journal of Light wave Technology, Vol. 15, No. 8, 1997

магистрлік диссертацияны дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлімдердің атауы, әзірленетін мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге ұсыну мерзімдері	Ескерту
1. Тақырыпқа сәйкес ақпараттық шолу	08.10.2018	
2. FBG сенсор технологиясының шолу жасау, теориялық талдау (теориялық бөлім)	05.02.2019	
3. OptiSystem арқылы сенсордың температура мен механикалық кернеу сипаттамаларын модельдеу (зерттеу бөлімі)	20.01.2020	
4. Кросс-сезімталдық мәселесін шешу амалын жобалап модельдеу арқылы жарамдылығын дәлелдеу (зерттеу бөлімі)	12.03.2020	
5. FBG сенсорының өзіндік параметрі, оның характеристикасына қандай әсері болатынын модельдеу және талдау(зерттеу бөлімі)	02.05.2020	

Тапсырманың берілген уақыты 30 қыркүйек 2018ж

Кафедра меңгерушісі _____ (Темырканова Э.К.)
(қолы) (аты-жөні)

Ғылыми диссертация жетекшісі _____ (Касимов А.О.)
(қолы) (аты-жөні)

Тапсырма орындалуға қабылданды магистрант _____ (Расул Д.Қ.)
(қолы) (аты-жөні)

АНДАТПА

Бұл жұмыста FBG сенсорының зерттеу әдістерінің дамуы мен қолданылу жағдайы, FBG сенсорлық технологиясының теориялық негіздері егжей-тегжейлі қаралып, оның ішінде FBG сенсорының температура мен механикалық кернеу сипаттамалары теориялық талданып ғана қоймай модельдеу арқылы эксперимент жасалып көз жеткізілген, сондай-ақ FBG толқын ұзындығының ығысуы мен температура және механикалық кернеу өзгерістері модельдеу арқылы олар түзу сызықты қатынаста болатыны диаграммамен көрсетілген. Температура және механикалық кернеуге сезімталдық мәні сәйкесінше $14.2\text{pm}/^\circ\text{C}$ және $1.226\text{pm}/\mu\xi$ болатыны модельдеу арқылы анықталған. FBG сенсорының кросс-сезімталдық мәселесінің туу себебі мен шешілу амалдары талданады, температураны компенсациялау теориясы негізінде жобаланған шешімі ұсынылды және модельдеу арқылы дәлелденеді. Сонымен қатар модельдеу арқылы толқынды өткізу қабілеттілігі, оптикалық тордың ұзындығы, шағылысу және сыну коэффициентінің шағылысу спектрінің жарық қуатына, өлшеу дәлдігіне, өлшеу диапазонына әсерінің байланысы қандай болатыны көрсетілген. Модельдеу эксперименттерінің нәтижелері бойынша сенсорлық массивтің Нұр-Сұлтан қаласы үшін қолайлы сенсорлардың интервал ұзындығы 4.7nm деп есептеп шығарылды. Соңында өлшеу құралының сенсордың өлшеу нәтиже дәлдігіне әсері туралы қарапайым сынақ және талдау жасалды.

Бұл барлық модельдеу жұмыстары OptiSystem бағдарламалық жасақтамасында жүзеге асырылған.

ABSTRACT

In the beginning of this thesis, the overview of the research methods, development, application in the nearby years and the basic Knowledge of FBG sensing technology was given successively. Next, simulated the spectral characteristics of FBG sensor when the sensor was applied with certain value of temperature and strain, the temperature sensitivity and strain sensitivity of FBG sensor obtained are $14.2\text{pm}/^\circ\text{C}$ and $1.226\text{pm}/\mu\xi$ respectively. Then, the methods for solving the cross-sensitivity problem of FBG sensor when using FBG sensor to Simultaneous measure of temperature and strain was introduced. following that, a solution based on the temperature compensation method was designed and simulated for verification. After that, the influence of parameters on FBG sensor was analyzed

and simulated by varying bandwidth, reflectivity, grating length and refractive index, and the distance between the two sensor wavelengths suitable for Nur-Sultan is 4.7nm, which was calculated by using the simulation results. Finally, the impact of measuring instrument on the accuracy of sensor measurement results was briefly discussed and simulated.

All of the propose designs were tested by using simulation software OptiSystem 16.1.

АННОТАЦИЯ

В данной работе подробно рассматриваются ситуации развития и применения методов исследования сенсоров FBG, теоретические основы сенсорной технологии FBG, в том числе не только теоретически проанализированы характеристики температуры и механического напряжения сенсора FBG, но также подтверждены экспериментом путем моделирования. А также, через моделирование сдвига длины волны и изменение температуры и механического напряжения сенсора FBG, показано в диаграмме что они находятся в линейном отношении. Моделированием было определено, что значения чувствительности к температуре и механическим воздействиям соответственно составляют $14.2\text{pm}/^\circ\text{C}$ и $1.226\text{pm}/\mu\text{ξ}$. Проанализированы причины возникновения и способы решения проблемы кросс-чувствительности сенсора FBG, предложено решение спроектированное на основе теории компенсации температуры и доказано путем моделирования. Кроме того, моделированием показаны способность пропускания волны, длина оптической сетки, взаимосвязь влияния спектра отражения коэффициента отражения и преломления на оптическую мощность, точность измерения и диапазон измерения. влиянием отражения и показателя преломления спектра отражения на оптическую мощность, точность измерения, диапазон измерения. По результатам экспериментов по моделированию длина интервала датчиков, подходящих для города Нур-Султан из массива датчиков, была рассчитана на 4.7nm. Наконец, был проведен простой тест и анализ влияния измерительного прибора на точность результата измерения датчика.

Вся эта работа по моделированию выполняется в программном обеспечении OptiSystem.

ҚЫСҚАРТУЛАР МЕН БЕЛГІЛЕУЛЕР

FBG	Брэгг оптикалық талшықты торы, fiber Bragg grating
LRT	Light rail train
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences
WDM	Wavelength Division Multiplexing
CATV	антенналы теледидар
SONET	Синхронды оптикалық желі
SDH	Синхронды сандық иерархия
MATLAB	Matrix laboratoriya
CMT	Coupled mode theory, жұптастырылған режим теориясы
DC	тікелей тоқ
AC	айнымалы ток
RBW	Resolution bandwidth, Разрешение полосы пропускания
α	талшықтың термиялық ұлғаю коэффициенті
ζ	термо-оптикалық коэффициент (сыну көрсеткішінің температураға тәуелділігі)
k	Брэгг торының К факторы
k	АС(айнымалы ток) байланыс коэффициенті
ν	интерферометриялық көріну
\bar{n}_{eff}	талшықтағы эффективті сыну көрсеткіші,
Λ	тордың периоды
L_g	талшықты тордың ұзындығы
'0	DC(тікелей тоқ) байланыс коэффициенті,
k_{Ti}	БРЭГГ толқын ұзындығының температураға сезімталдық коэффициенті
ρ_e	Оптикалық майсқақтық эффектісінің коэффициенті (variation of index of refraction with axial tension)
$k_{\epsilon i}$	БРЭГГ толқын ұзындығының механикалық кернеуге сезімталдық коэффициенті

МАЗМҰНЫ

ҚЫСҚАРТУЛАР МЕН БЕЛГІЛЕУЛЕР	6
КІРІСПЕ.....	8
1 FBG технологиясын теориясын талдау түрлерге бөлу және OptiSystem	12
1.1 FBG сенсорының дамуы және қолданысына шолу	12
1.2 Қолданыстағы жағдайы.....	13
1.3 Брэгг талшықты оптикалық торы және оның жұмыс істеу қағидасы ...	14
1.3.1 FBG жұмыс істеу принципі	14
1.3.2 Оптикалық тор құобылымының түрлерге бөлінуі.....	15
1.3.3 FBG сенсорының құрылымы	17
1.3.4 FBG сенсорінің артықшылықтары	18
1.4 Модельдеуге арналған OptiSystem бағдарламасын талдау.....	18
2 Брэгг талшықты оптикалық тор сенсоры арқылы температура мен механикалық кернеуді өлшеуді OptiSystem бағдарламасында модельдеу және талдау	20
2.1 FBG сенсорын модельдеу.....	20
2.2 Брэгг талшықты оптикалық торы сенсорын температура сенсоры ретінде қолданғанда	22
2.2.1 Брэгг талшықты оптикалық торы негізіндегі температура сенсорын зерттеу әдісі	24
2.2.2. Модельдеу нәтижесі және спектрлік сипаттамасына талдау жасау ...	25
2.3 Брэгг талшықты оптикалық торы негізіндегі механикалық кернеу сенсорын зерттеу	28
2.3.1 Брэгг талшықты оптикалық торы негізіндегі механикалық кернеу сенсорын зерттеу әдісі	29
2.3.2 Модельдеу және спектр нәтижелері	30
2.3.3 Нәтижесіне талдау жасау.....	33
3 Брэгг талшықты оптикалық торының кросс-сезімталдық мәселесінің туындау себебі және оны шешу амалдарын зерттеу	35
3.1 Температура мен механикалық кернеудегі кросс-сезімталдықты ажырата анықтау әдісі.....	35
3.2 Брэгг талшықты торының кросс-сезімталдық мәселесін температураны компенсациялау әдісі арқылы шешу амалы.....	37
3.2.1 Зерттеудің модельдеу дизайны және нәтижесі.....	38
3.2.2 Қарастырылған жобаны модельдеу және нәтижесіне талдау жасау ...	39
3.2.3 Модельдеуден алынғын нәтижеге талдау жасау	44

3.2.4 Брэгг талшықты оптикалық торының кросс-сезімталдық мәселесін зерттеуден алынатын қортынды	44
4 FBG сенсорының параметрлерінің FBG сенсорының жұмысына әсерін модельдеу, зерттеу және нәтижеге талдау жасау	45
4.1 Сенсордың өткізу қабілеттілігінің сенсор характеристикасына әсері...	47
4.2 Шағылыстыру коэффициентінің FBG сенсорына әсерін модельдеу және талдау	49
4.3 Тордың ұзындығының FBG сенсорына әсерін модельдеу және талдау	54
4.4 Сыну коэффициентінің FBG сенсорына әсерін модельдеу және талдау	59
4.5 FBG сенсорының толқын ұзындығының интервалы есептеу	61
4.6 Өлшеу инструментінің FBG сенсорының өлшеу нәтижесіне келтіретін әсерін модельдеу және талқылау	62
4.7 Бөлім бойынша қортынды.....	64
ҚОРТЫНДЫ.....	66
ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ.....	68
ҚОСЫМША	73

КІРІСПЕ

Жұмыстың өзектілігі және мәні. Жуық жылдары оптикалық сенсор

саласындағы технологияның қарқынды дамып айрықша жетістіктерге жетуіне байланысты, FBG(Брэгг оптикалық талшықты торы, fiber Bragg grating) сенсорының қолданыс аумағы барынша кеңейді, FBG сенсорлары геодинамика, ғарыш аппараттары, кеме жасау, электр энергетикасы, медицина және химиялық зондтау саласында кеңінен қолданылуда. Сонымен қатар ғимараттың, LRT(Light rail train) жолының, ақылды көпірдің т.б пішін өзгерісін, зақымдалуын бақылау, сыртқы соққы күштерді тексеруде FBG сенсорлар ең жақсы сезімтал компоненттер болып табылады. Үйткені FBG сенсоры өте жоғары сезімталдыққа, өте жоғары дәлдікке, құрылымдық қарапайымдылыққа және өзіндік құнының арзан, электростатикалық, электромагниттік және радио көздерінің кедергілеріне ұшырамайтын әдепкі электронды сенсорларда болмаған ерекше қасиеттерге ие.

FBG сенсоры жалғыз талшықты тор бойындағы мыңдаған нүктесіндегі температурамен механикалық кернеу өзгерісін бақылай алатындықтан температура мен деформацияны үздіксіз бақылауды қажет ететін орындарда көп сұранысқа ие, оның ішінде температура мен механикалық кернеуді бір уақытта өлшеу маңызды болады, осы мақсатқа жету барысында кросс-сезімталдық мәселесін айналып өту мүмкін емес, сондықтан кросс-сезімталдық мәселеін шешуге қатысты зерттеулер өте маңызды. Сонымен қатар өндірісте FBG сенсорын жобалау барысында, әрқашан тордың параметрлік мәнін күтілетін оптикалық сипаттама арқылы анықтағымыз келеді, яғни оптикалық талшықты тордың характеристикасына модельдеу жасау жобалау шығыны мен жобалау уақытын қысқартудың бірден-бір жолы. Әлем бойынша бұндай модельдеуге арналған көптеген бағдарламалар бар, мысалы PC-Grate, Grating Mod, FOGS, SPSS(Statistical Package for the Social Sciences) және Optiwave (OptiGrating&OptiSystem) сияқты бағдарламалар бар. Бұл жұмыста OptiSystem бағдарламасын қолданатын боламыз, үйткені OptiSystem, FBG сенсорын модельдеуде жаңадан қолданып келе жатқан компоненттерге бай, қолдануға ыңғайлы. Ең маңыздысы OptiSystem 16 версиясынан бастап қосылған әр-түрлі FBG сенсор және FBG сенсорына арналған WDM (Wavelength Division Multiplexing) FBG сенсор интеррогатор компоненті бар, бұл пайдаланушыларға жеткізуші ұсынған нақты физикалық параметрлерге сәйкес FBG талшығын жобалауға, температураны, кернеуді және деформацияны сезуді жүзеге асыруға мүмкіндік береді.

Осылайша, FBG негізіндегі температуралық және механикалық кернеу сенсорын зерттеу, кросс-сезімталдық мәселесін шешу, әр-түрлі параметрлердің сенсор характеристикасына әсерін зерттеу және модельдеу

осы жұмыстың мәні болып саналады.

Жұмыстың мақсаты. FBG технологиясына жүйелі теориялық талдау жасау және FBG сенсордің характеристикасын OptiSystem бағдарламасы арқылы модельдеу. Мақсатқа жету үшін төмендегідей жұмыстар істеледі:

- 1) FBG сенсор технологиясының қазіргі жағдайына, даму бағытына, қол жеткен жетістіктерге шолу жасау;
- 2) FBG сенсор технологиясына теориялық талдау;
- 3) Модельдеуге арналған OptiSystem бағдарламасын толықтай меңгеру;
- 4) OptiSystem бағдарламасы арқылы температура мен толқын ұзындығы арасындағы байланысты модельдеу, талдау және қортындылау;
- 5) OptiSystem бағдарламасы арқылы механикалық кернеу мен толқын ұзындығы арасындағы байланысты модельдеу, талдау және қортындылау;
- 6) Кросс-сезімталдық мәселесіне теориялық талдау, оны шешу амалын жобалап модельдеу арқылы жарамдылығын дәлелдеу;
- 7) FBG сенсорының өзіндік параметрі, оның характеристикасына қандай әсері болатынын модельдеу және талдау;
- 8) FBG сенсорын қолдану барысында дәлдігіне әсер етуші факторларды табу талдау және модельдеу арқылы көз жеткізу.

Осы жұмыстар арқылы елімізде Брэгг талшықты оптикалық тор технологиясын теориялық жетілдіруге аз да болса үлес қосу, сонымен қатар зерттедің нәтижесі және алынған қортынды, практикалық жобалауда және өлшеу дәлдігін одан әрі арыттыруда бағыт-бағдар береді.

Зерттеу әдісі. Алға қойған мақсатты орындау барысында алдымен теориялық негізде формула арқылы есептеулер жасап, одан кейін модельдеу арқылы алынған нәтижелерді бір-бірімен салыстырып талдау жасау.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы. Бұл диссертацияның ғылыми жаңалығы:

- a) Брэгг талшықты оптикалық тордың толқын ұзындығының температураға тәуелділік заңдылығы анықталды;
- b) Механикалық кернеу өзгерісінің яғни деформацияның Брэгг талшықты оптикалық тордың толқын ұзындығының тәуелділік заңдылығы анықталды;
- c) Температураны компенсациялау әдісі негізінде кросс-сезімталдық мәселесін шешудің тың жобасы дайындалды;
- d) FBG сенсорының өткізу қабілеті, сыну коэффициенті, шағылысу коэффициенті және оптикалық тор ұзындығы өзара байланыс заңдылығы

анықталды;

е) Барлық жобалар мен дәлелдеулер OptiSystem бағдарламасы арқылы модельденді;

ф) FBG сенсорын құрылыста температура мен деформацияны бақылауға қолдануда, Нұр-Сұлтан қаласы ауа-райы факторлары ескеріле отырып, FBG сенсор массивінің толқын ұзындығының интервалы нақты модельдеу арқылы анықталды.

Жұмыстың жалпы сипаттамалары. Осы жұмыс кіріспе, негізгі бөлім, қортынды, пайдаланған әдебиеттер және қосымшалардан тұрады. Кіріспе бөлімі диссертациялық жұмыстың өзектілігі мен мәні, мақсаты, зерттеу әдісі, ғылыми жаңалығы және жалпы сипаттамасы

Негізгі бөлім 4 бөліктен тұрады:

Бірінші бөлімде – FBG технологиясының зерреу әдістеріне, зерттеген жұмыстарға, қол жеткен жетістіктерге, FBG сенсорының қазіргі дамуы, FBG сенсорының қазіргі қолданыс салалары және қолданыстағы прогрестерге қысқаша шолу; FBG-дің жұмыс принципіне, түрлерге бөлінуі, FBG сенсорының құрылымы және артықшылықтары мазмұндалды; диссертацияда қолданылған модельдеу бағдарламасы болған OptiSystem қысқаша таныстырылды;

Екінші бөлімде – FBG сенсорының характеристикасына, FBG негізіндегі температура сенсоры және механикалық кернеу сенсорына теориялық талдау, теориялық есептеулер, модельдеу және модельдеу нәтижесін талдау мен қортындылау;

Үшінші бөлімде – FBG сенсорының кросс-сезімталдық мәселесінің себебі және шешу амалдарына егжей-тегжейлі талдау жасай келе, температураны компенсациялау негізінде шешу амалының жобасы әзірленіп, модельдеу арқылы жарамдылығы дәлелденді;

Төртінші бөлімде – FBG сенсорының өткізу қабілетіне, оптикалық тор ұзындығына, шағылыстыру коэффициенті мен сыну коэффициентінің өзгерісі FBG сенсорының характеристикасына әсері формулалық есептеу арқылы талданды, жеке-жеке модельденді және нәтиже қортындыланды; FBG сенсор интеррогатордың (Interrogator) сенсор нәтижесіне беретін ықпалы қысқаша мазмұндалды.

Қортынды бөлімінде, атқарылған жұмыс және алынған нәтижелер жинақталды. OptiSystem бағдарламасында FBG сенсорының температура мен механикалық кернеу өзгерісіне байланысын модельдеу бойынша, жарықтың толқын ұзындығы ығысуының өзгерісі, сенсордың температура мен сенсорға

түскен механикалық кернеу өзгерістері сызықтық байланыста болды, сондай ақ температураға деген сезімталдығы $14.2\mu\text{m}/^\circ\text{C}$, механикалық кернеуге деген сезімталдығы $1,226\mu\text{m} / (\mu\text{m} / \text{m})$ деген нақты нәтиже алынды. Температураны компенсациялау негізінде 3 орынға 4 сенсор қою арқылы температура мен деформацияның өзгерісін үздіксіз бақылауды іске асыратын жобаның жарамдылығы модельдеу арқылы дәлелденді және дәлдігі 99% дейін жетті.

Соңында қолданған әдбиеттер тізімі және қосымшалар берілген. Қосымшада OptiSystem бағдарламасында модельдеудің дизайны, кейбір параметрлерді парақтар келтірілген.

Диссертациялық жұмыс 94 парақтан тұрады, 44 сурет және 8 кестесі бар, 60 әдебиет қолданылған.

Жұмыстың көлемі және құрылымы. Диссертациялық жұмыс 94 парақтан тұрады, 44 сурет және 8 кестесі бар. Жұмыс кіріспеден әдеби шолудан, зерттеу нәтижелерінен және оларды талдау мен қорытындылаудан тұрады. Диссертациялық жұмыста 60 әдебиет қолданылған.

1 FBG технологиясын теориясын талдау түрлерге бөлу және OptiSystem

1.1 FBG сенсорының дамуы және қолданысына шолу

Қазіргі таңда оптикалық тордың спектрлық ерекшеліктерін зерттеу негізінен 2 сатыдан тұрады, ол теориялық есептеп талдау және тәжірибе

арқылы тексеру. А. Yariv және Н. Kogelnik жеке-жеке жұптық режим теориясы(Coupled mode theory) және цифрлық талдау әдісі арқылы біркелкі және біркелкі емес талшықты оптикалық тор спектрлік характеристикасына талдау жасады, ал бұл талдау әдісі есептеуге күрделі және көп уақытты ысырып еткізетін кемшілігі бар. [1][2]; Чжан Донгшен және басқалары талшықты тордың резонансты толқын ұзындығы мен толқын ұзындығының параметірінің талшықты оптикалық тордың спектрын контролдауға болатыны жәйлі зерттеулер жүргізді, бұл оптикалық торды жасауда маңызды бағдар берді [3]; Ду гы және басқалары зерттеу нысаны ретінде талшықты тордың шағылысу спекрін алып, FC және APC коннекторларының талшықты тордың спектріне әсерін салыстырды және талдады. Деректерді талдау нәтижелері APC коннекторының талшықты тордың шағылысу спектріне әсерін, ал сыну коэффициентін арттыру арқылы жарықтың шағылысқан сәулесінің спектрге әсерін азайтады және практикалық инженерлік қолданыста жақсы байланыс әдісі ретінде қолдануға болатынын ұсынды [4]; Теориялық есептеудің негізінде сенсордың өзіндік параметрлерінің өзгеруі кезіндегі талшықты тордың шағылысу спектрі модельденеді, содан кейін тордың шағылыстыру коэффициенті, өткізу қабілеті және тор ұзындығы мен сыну коэффициентінің өзгерістері арасындағы ең жақсы комбинация талданып алынды, оны теориялық негіз етіп жақсы талшықты тор жасауға болатынын зерттеді. Осылайша көптеген ғалымдардың оптикалық тордың спектрлік ерекшелігін зерттеу нәтижесінде талшықты торды жасауда, құрылғы дизайндауда және өндірісте қолдануда үлкен ілгерлеушілікке ие болды.

Ғалымдар компоненттерді зерттеп шығару және кемелдендіру мақсатында осьтік, радиалды және механикалық кернеу әсерлері кезінде талшықты тордың спектрлік сипаттамаларының байланысы бойынша зерттеулер жүргізді. Moreудің зерттеуі талшықты оптикалық тор арқылы температурамен механикалық кернеуді өлшеуге болатыны дәлелденді [5].

1.2 Қолданыстағы жағдайы

Жуық жылдары оптикалық сенсор саласындағы технологияның қарқынды дамып айрықша жетістіктерге жетуіне байланысты, FBG сенсорының қолданыс аумағы барынша кеңейді, FBG сенсорлары геодинамика, ғарыш аппараттары, кеме жасау, электр энергетикасы, медицина және химиялық зондтау саласында кеңінен қолданылуда. Сонымен қатар ғимараттың, LRT жолының, ақылды көпірдің т.б пішін өзгерісін, зақымдалуын бақылау, сыртқы соққы күштерді тексеруде FBG сенсорлар ең жақсы сезімтал

компоненттер болып табылады. Үйткені FBG сенсоры өте жоғары сезімталдыққа, өте жоғары дәлдікке, құрылымдық қарапаймдылыққа және өзіндік құнының арзан, электростатикалық, электромагниттік және радио көздерінің кедергілеріне ұшырамайтын әдепкі электоронды сенсорларда болмаған ерекше қасиеттерге ие. Мысалы көпір құрылысында:

Біраз уақыттан бері талшықты оптикалық тор сенсорын бетонды көпірлерде қолдану әлде қашан іске асқанымен, болат құрылымды көпірде қолдану өте аз кезігеді, үйткені талшықты оптикалық торды болат темір элементтеріне біріктіру мүмкін болмады. Сондықтан болат темірдің сыртқы қабатына біріктіру бірден-бір жолы, АҚШ тағы Вермонт штатының Уоетербори(Waterbury) көпірі[6] мысал бола алады;

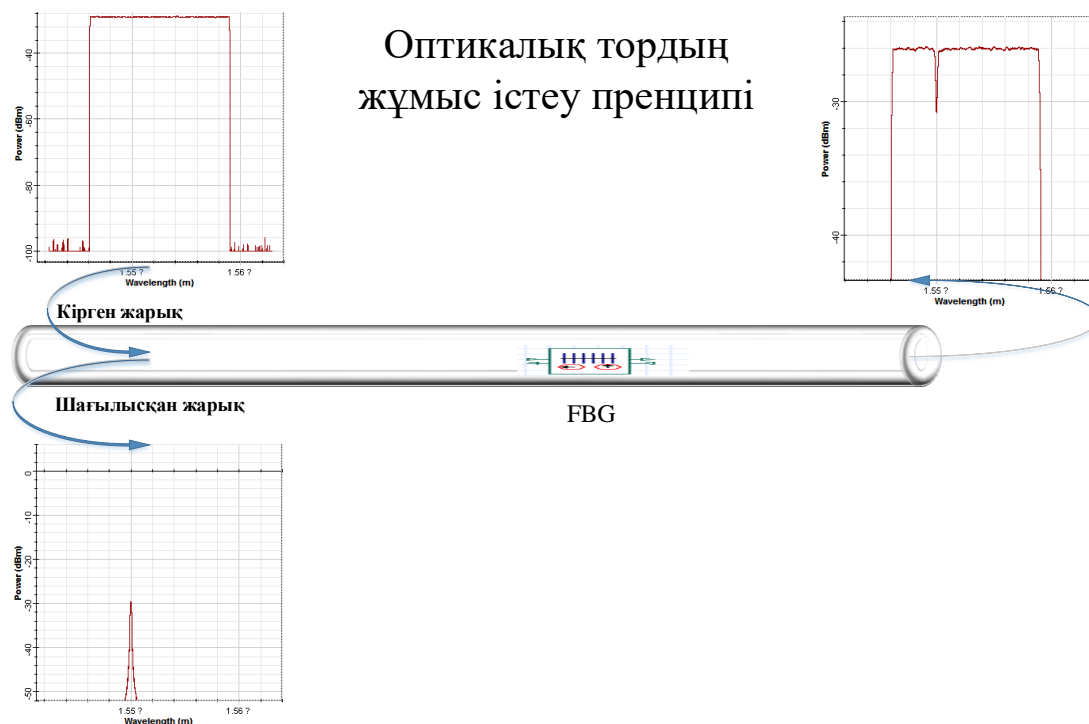
Қазба жұмыстарын бақылау: Сингапурдың оңтүстігінде жаңа автокөлік станциясының құрылысы үшін топырақ қазба жұмыстары кезінде топырақтың құлауының алдын ала бақыдау үшін FBG[7] және PZT(Lead zirconate titanate piezoelectric ceramics)[8,9] сенсорлары қолданылды. Бір жылдан астам жүргізілген мониторинг FBG және PZT сенсоры уақытша құрылымдардың жүк көтергіштігі мен тұрақтылығын тиімді қадағалай алатындығын көрсетті[10].

1.3 Брэгг талшықты оптикалық торы және оның жұмыс істеу қағидасы

1.3.1 FBG жұмыс істеу пренципі.

Брэгг талшықты оптикалық торы- оптикалық талшықтың жарық өткізгіш өзегінде қалыптасатын, белгілі толқын ұзындығына ие жарықты шағылыстыратын және қалған жарық толқындарын трансмиссиялайтын қасиетке иа құрылым, ол жарық спектры тар(Брэгг толқын ұзындығын центр етіп алып) болатын жарықты ғана шағылыстырады да қалғандарын еш өзгертпестен, жоғалтпастан өткізеді(1.1-сурет).

Оптикалық тордың жұмыс істеу принципі



1.1- сурет. FBG жұмыс істеу принципі

Ал оптикалық тор жалғыз модты талшықтың өзегі периодты жолақты күшті ультракүлгін сәулесіне ұшырағанда, талшық өзегінің сыну коэффициенті өзгеруінен жасалғандықтан Брэгг толқынының ұзындығы, микроқұрылымның периоды және талшық өзегінің сыну коэффициенті арқылы анықталады. сонымен қатар брэгг оптикалық торы симметриялы құрылым болғандықтан, жарық қай бағыттан өтсе де ол шағылыстыруын жалғастыра береді.

Микроқұрылымның периоды- Λ және оптикалық талшық өзегінің сыну коэффициенті - n_{ef} арқылы, Брэгг толқын ұзындығы- λ_B келесі теңдеумен анықталады:

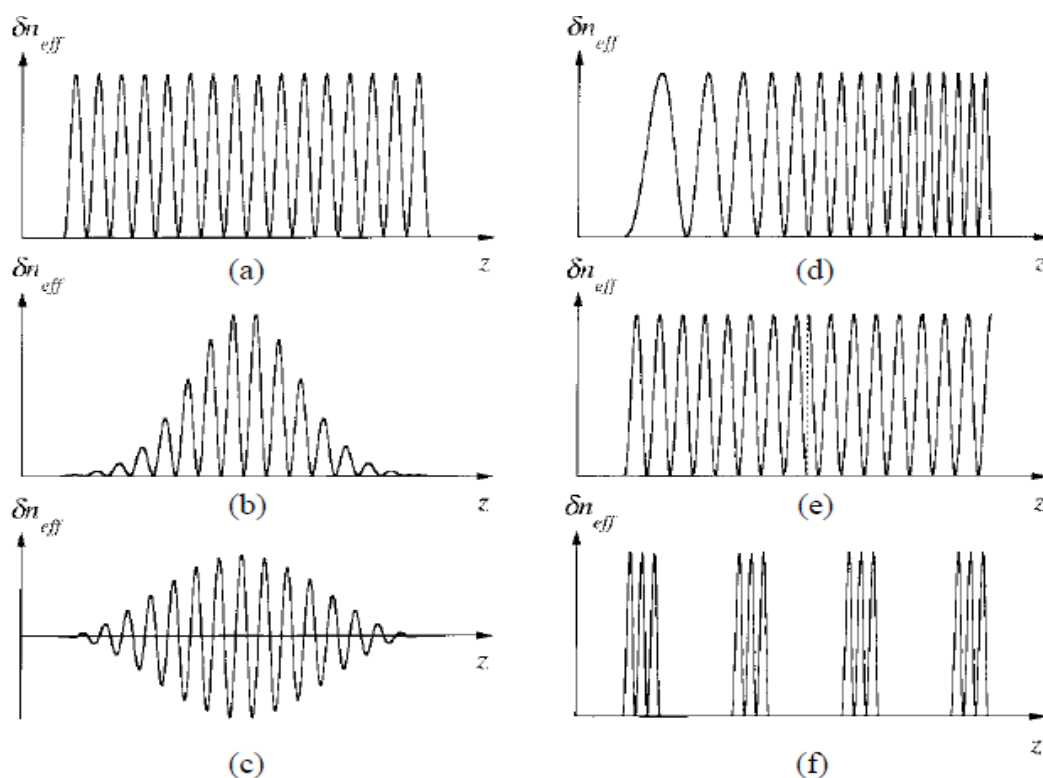
$$\lambda_B = 2n_{ef}\Lambda \quad (1)$$

1.3.2 Оптикалық тор құрылымының түрлерге бөлінуі.

Оптикалық тордың қолданысына қарай әр-түрлі құрылымда болады, олар сыну коэффициенті өзгеруін индукциялау арқылы іске асады, 1997 жылғы Ердоған(Т. Erdogan) сипаттамасы бойынша (1.2-сурет)негізінен 6 түрге бөлінеді[11]:

а) Біркелкі оптикалық талшықты торы (Uniform with positive only index change);

- b) Гауусиан опозидті талшықты оптикалық торы (Gaussian apodised);
- c) Косинус опозидті талшықты оптикалық тор (Raised cosine apodised);
- d) Чирпті (Chirped);
- e) Дискретті фазамен ауысатын оптикалық тор (Discrete phase shift);
- f) Суперструктура (Superstructure).



1.2- сурет. Талшықты оптикалық тордың құрылым түрлері
(T. Erdogan and J. Light wave, "Fiber Grating Spectra," Journal of Light wave Technology, Vol. 15, No. 8, 1997, pg. 1277)

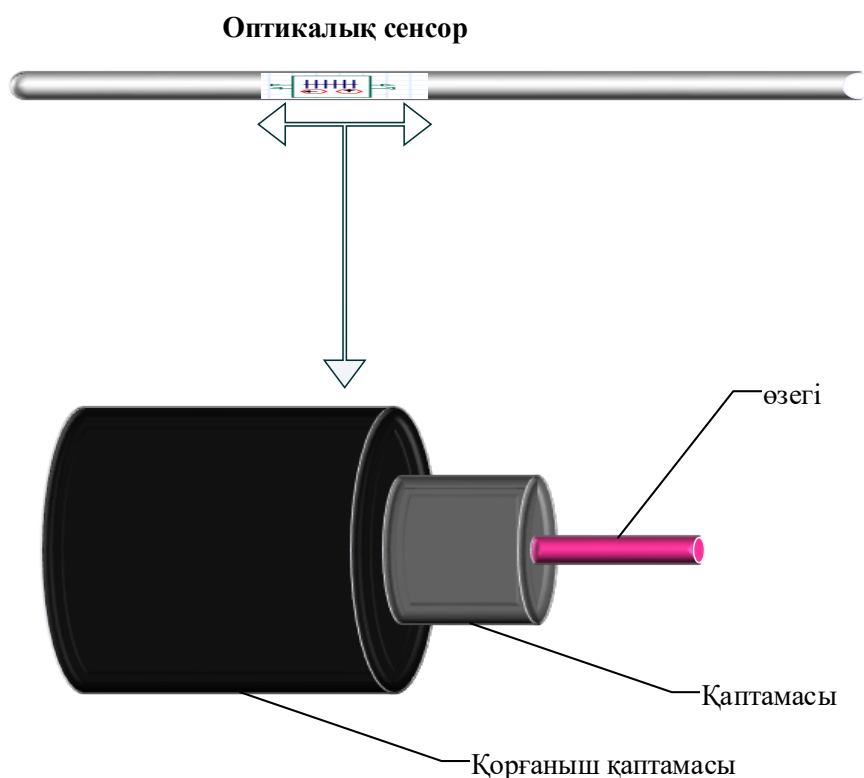
Бұлардың арасында біркелкі талшықты тордың құрылымы өндіруге қарапайым және негізгі формасы болып табылады [12]. Анодталған торлар жанындағы лобтарды(side lobes) басу үшін қолданылады және телекоммуникациялық салада қолдануға ыңғайлы[13]. Чирпті талшықты тор шағылысу спектрының өткізу қабілетін арттырады, телекоммуникациялық салада қолдануға ыңғайлы болғанымен, жуық жылдары адамдар онымен ахау болған орынның ақпаратын жинауға пайдалануға көшті[14]. Дискретті фазамен ауысатын оптикалық тор және суперструктура оптикалық торын көбінде дисперсті сүзгілер ретінде телекоммуникацияда қолданады.

Барлық құрылымдарды сенсорлық қосымшаларда қолдануға болады, бірақ біркелкі оптикалық торлар жиі қолданылатындықтан, осы жұмыста тек біркелкі оптикалық торларға зерттеу жүргізіледі.

1.3.3 FBG сенсорының құрылымы.

Жоғарыда айтып өткендей, талшықты оптикалық тордың шағылысқан жарықтың толқын ұзындығы, талшық өзегінің сыну коэффициенті және оптикалық тордың периодымен байланысты болады, ал деформация мен температура талшықтың сыну коэффициенті мен оптикалық тордың периодына әсер ететіндіктен, оны температура мен деформацияның өзгерісін өлшеуге болатын сенсор ретінде пайдалануға болады[15].

Оптикалық талшықты торды сенсор ретінде қолданғандағы құрылымы 1.3-суретте көрсетілгендей болады.



1.2-сурет. Талшықты оптикалық тор сенсорының құрылымы

Брэгг талшықты оптикалық тор сенсоры 3 бөліктен құралады, олар талшықтың өзегі (Көбіне ол арқылы оптикалық сигнал таратылады[16]), қаптамасы (Өзекшені қоршайтын талшықтан сигналдың шығуына кедергі болатын шағылу қабығы[16]) және қорғаныш қаптамасы(Өзекшені сыртқы

әсер мен ылғалдан қорғайтын қабығы[16]). Өзегтің сыну коэффициенті, қаптамасының сыну коэффициентінен жоғары материалдан жасалатын болғандықтан жарық тек өзегінде ғана таралуына алып келеді.

1.3.4 FBG сенсорінің артықшылықтары.

FBG технологиясына негізделген сенсорлық жүйелер қарапайым электр сенсорлерімен салыстырғанда көптеген артықшылықтарға ие. Сенсордың өзі кез-келген электрлік сигналға сезімтал, оңай жарылғыш ортада да сезу жүйесі мен сенсорды біріктіруге мүмкіндік беретін сенсорлық желідегі пассивті компонент ретінде әрекет етеді. Талшықты оптикалық сенсорлар әдеттегі сенсорлардағыдай электр тогын емес, сигнал тасушы ретінде жарықты пайдаланады, бұл оларға электростатикалық, электромагниттік және радио көздерінің кедергілеріне ұшырамайтын етеді. Сондайақ сенсор экстремалды температурада жұмыс істей алады.

Қазіргі таңда, оптикалық талшықта деректерді тасымалдау телекоммуникация саласының стандарты болып үлгірді, үйткені оның жоғары өткізу қабілеттілігі, деректерді аз шығындайтыны және күшейткішті қажет етпей ақ, ұзақ қашықтыққа тасымалдай алатын ерекшелігіне байланысты. FBG технологиясы негізіндегі сенсорлар жүйесі, оптикалық талшықты оның дерек тасымалдаушысы етіп қолданады. Осылайша сенсор ұзақ уақыттық тұрақтылыққа және дәлділікке ие болады, сонымен қоса FBG сенсорының компоненті өте кішкене болғандықтан, ол орнатылған құрылымының жұмысына ешқандай әсері болмайды.

Электронды сенсорлар әр сенсорға арнаулы арна мен кабельді қажет ететіндіктен, үлкен құрылымдарға бақылау жасау кезінде өте күрделі жоспарлауды қажет етеді, ал FBG технологиясына негізделген сенсорлер, керісінше бір ғана оптикалық талшыққа көптеген оптикалық торды орнатуға болады, сенсор ретінде жұмыс істей береді және олардан жиналған деректерді қабылдау үшін жалғыз FBG интеррогатор жеткілікті. үлкен құрылымды қадағалауда арзан әрі уақыт үнемдейді қадағалау барысын оңайластырады.

1.4 Модельдеуге арналған OptiSystem бағдарламасын талдау

OptiSystem - бұл пайдаланушыларға заманауи оптикалық желілердің тарату қабатындағы оптикалық байланыстарды жоспарлауға, тестілеуге және модельдеуге мүмкіндік беретін бағдарламалық жасақтаманың кешенді жиынтығы [27].

OptiSystem келесідей ерекшеліктерге ие:

- а) Қолданушы компоненттерінен жүйеге дейін иерархиялық дизайн

жасау мүмкіншілігі бар және компоненті мен скрипт тілін (Script language) өзі құрастырып талдай алады;

b) Талшықты оптика негізіндегі телекоммуникацияны модельдей алады;

c) Бағдарлама қоры барлық пассивті және активті компоненттер және реалды толқын ұзындығына қатысты параметрлермен қамтылған;

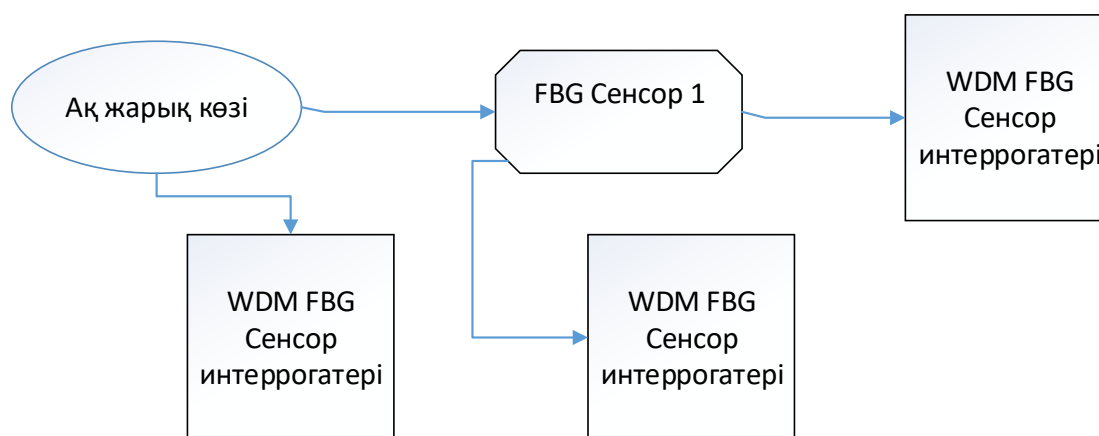
d) Параметрлерін сканерлеу және оптимизациялау [28].

OptiSystem CATV (антенналы теледидар) / WDM желісінің дизайны мен SONET (Синхронды оптикалық желі) / SDH (Синхронды сандық иерархия) картаның дизайны мен таратқышы, арнасы, күшейткіші және қабылдағыш дизайнына дейінгі көптеген қосымшаларға қызмет көрсетеді. OptiSystem құрамында MATLAB (Matrix laboratoriya) компоненті бар [29], ол қолданушыға MATLAB арқылы компонент немесе үлгіні бағдарламада құрастыруға болатын мүмкіншілік береді. OptiSystem бағдарламасы MATLAB.dll файлы арқылы құрылған компонентті тексереді және есептейді.

2 Брэгг талшықты оптикалық тор сенсоры арқылы температура мен механикалық кернеуді өлшеуді OptiSystem бағдарламасында модельдеу және талдау

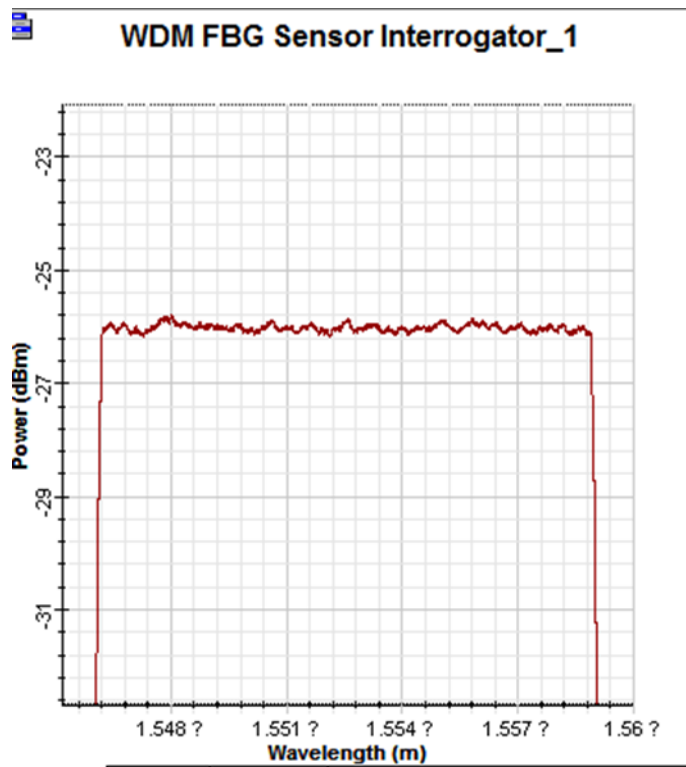
2.1 FBG сенсорын модельдеу

Біріншіден, бірінші тарауда келтірілген FBG сенсорының принципіне сәйкес OptiSystem бағдарламасы көмегімен модельдеу диаграммасы жасалды, дизайнын көрсетуге арналған блок-схема сурет 2.1-де көрсетіледі.

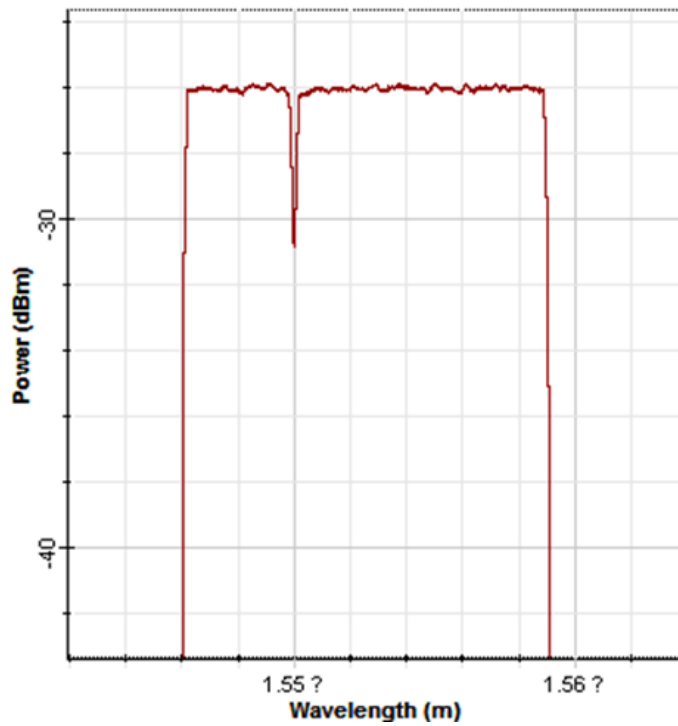


2.1-Сурет. OptiSystem дизайнын көрсетуге арналған блок-схем

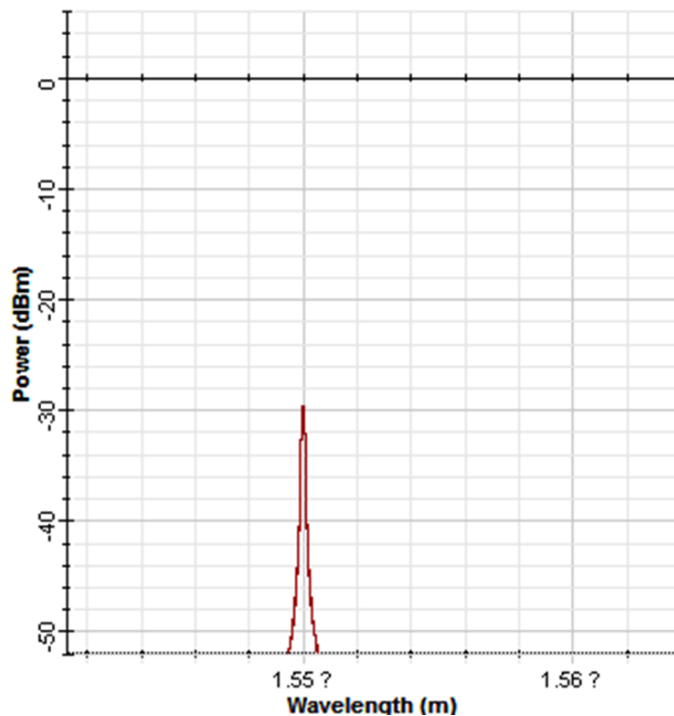
Бұл жоба бойынша 1 ақ жарық көзі, 1 талшықты FBG сенсоры және 3 WDM FBG сенсоры интеррогаторы болады. OptiSystem бағдарламасында әдепкі параметрлер пайдаланылды. OptiSystem бағдарламасымен жасалған модельдеудің нәтижесі төменде көрсетілген. 2.2-суретте жарық көзінің спектры көрсетілген, 2.3-суретте трансмиссия спектры ал шағылысу спектры 2.4-суретте көрсетілген.



2.2-сурет. жарық көзінің спектры



2.3-сурет. трансмиссия спектры

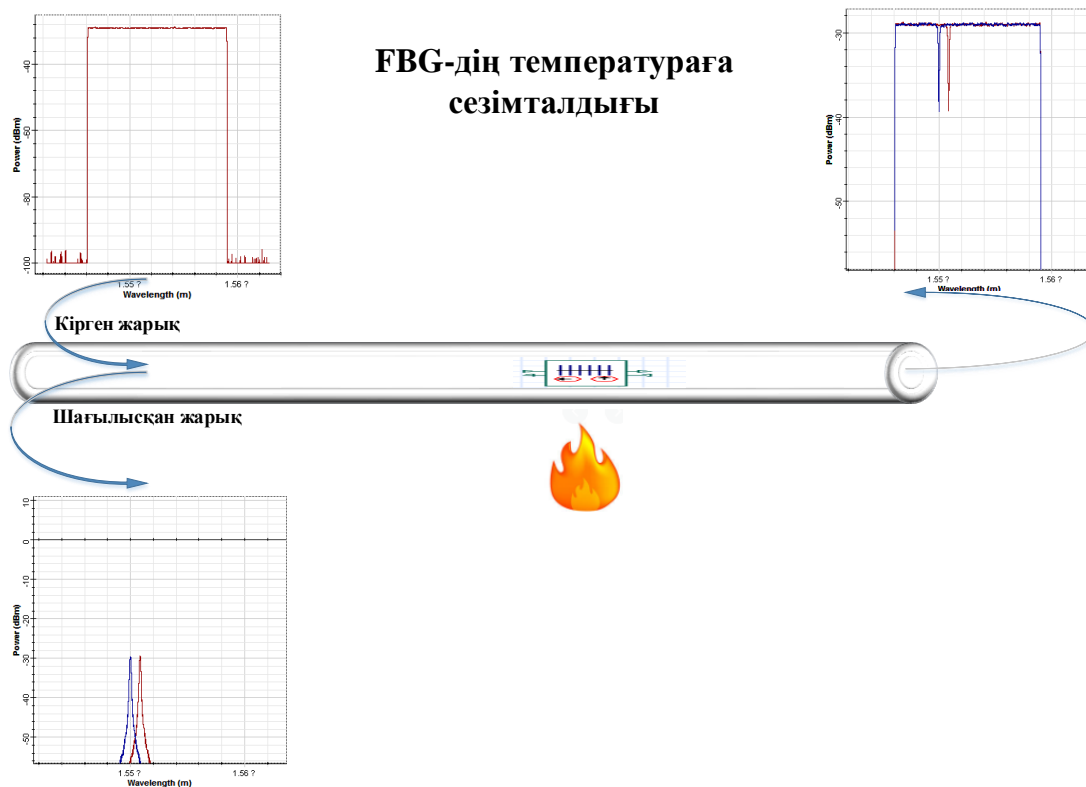


2.4-сурет. шағылысу спектры

Модельдеуден көрініп тұрғанындай, модельдеу нәтижесі 1-тарауда айтылып өткен FBG сенсорының жұмыс принципімен сәйкес шықты. Яғни оптикалық талшықтың жарық өткізгіш өзегінде қалыптасатын, белгілі толқын ұзындығына ие жарықты шағылыстыратын және қалған жарық толқындарын трансмиссиялайтын қасиетке ие құрылым деген едік, модельдегенде ол жарық спектры тар(Брэгг толқын ұзындығын центр етіп алып) болатын жарықты ғана шағылыстырды да қалғандарын еш өзгертпестен, жоғалтпастан өткізді

2.2 Брэгг талшықты оптикалық торы сенсорын температура сенсоры ретінде қолданғанда

Температураға сезімталдық FBG сенсорының маңызды ерекшелігі болып табылады, бұл жағдайда Брэгг толқын ұзындығының өзгеруі термо-оптикалық эффект әсерінен болған кремнийдің сыну көрсеткішіне байланысты болады(2.5-сурет). Термиялық ұлғаю микроқұрылымның периодын өзгертеді, алайда кремнийдің көлемдік ұлғаю термиялық коэффициенті төмен болуынан әсері шектеулі, сондықтан ескермеуге болады.



2.5-сурет. FBG-дің температураға сезімталдығы

Толқын ұзындығы өзгеруінің температураға байланысын келесі формуламен көрсетуге болады:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \Delta(n_{ef}\Lambda) / (n_{ef}\Lambda) \quad (1)$$

$$= \left[\left(\frac{1}{\Lambda} \right) (\Lambda / \partial T) + \left(\frac{1}{n_{ef}} \right) (\partial n_{ef} / \partial T) \right] \Delta T = (\alpha + \zeta) \Delta T \quad (2)$$

α - талшықтың термиялық ұлғаю коэффициенті;

ζ – термо-оптикалық коэффициент (сыну көрсеткішінің температураға тәуелділігі).

Температураға сезімталдығын шамалап есептеу үшін келесі мәндерді температура өзгеру аумағында тұрақты деп аламыз:

$$\alpha = 0.55 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \quad (3)$$

$$\zeta = 5.77 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \quad (4)$$

демек термо сезімталдығы:

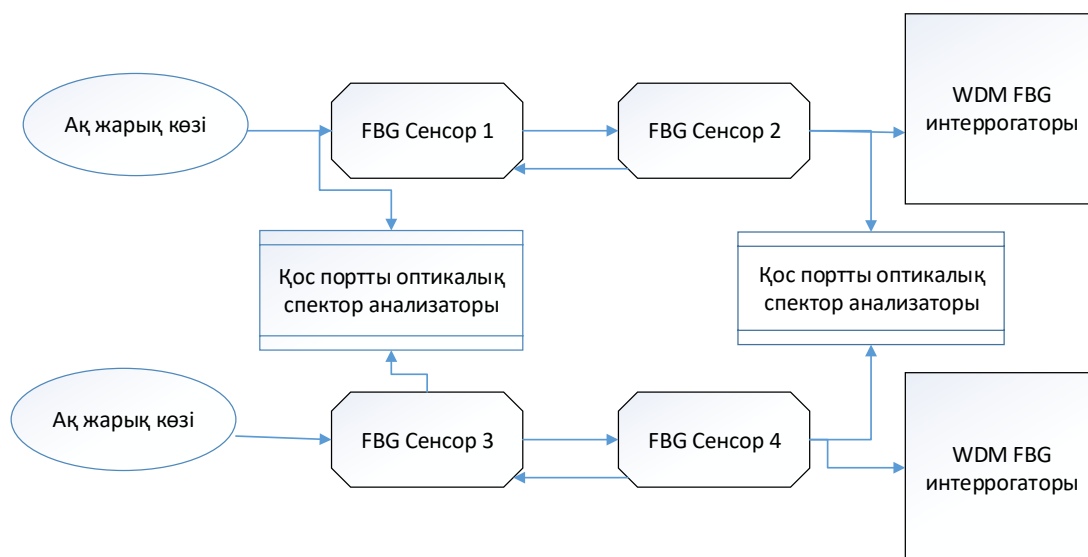
$$\Delta \lambda / \Delta T = (\alpha + \zeta) \lambda_0 = 6.3 \lambda_0 \quad (5)$$

Типтік FBG-да толқын ұзындығын 1550nm деп алғанда, температураға сезімталдығы қысқартылып:

$$\Delta \lambda / \Delta T = 10 \text{ pm}/^\circ\text{C} \quad (6)$$

2.2.1 Брэгг талшықты оптикалық торы негізіндегі температура сенсорын зерттеу әдісі.

Бұл әдістің негізі, FBG сенсорына берілген температураға байланысты FBG сенсорының харектирикасының өзгеруін модельдеу және талдау. Температураның өзгерісі толқын ұзындығының ығысуына әкеледі, оны WDM FBG сенсоры интеррогатор (wavelength-division multiplexing FBG Sensor Interrogator) көрсетеді. Бұндағы барлық модельдеу OptiSystem 16.1 бағдарламасында жүгізілді. Модельдеуге арналған дизайынның блок-схемасы 2,6- суретте көрсетілген.



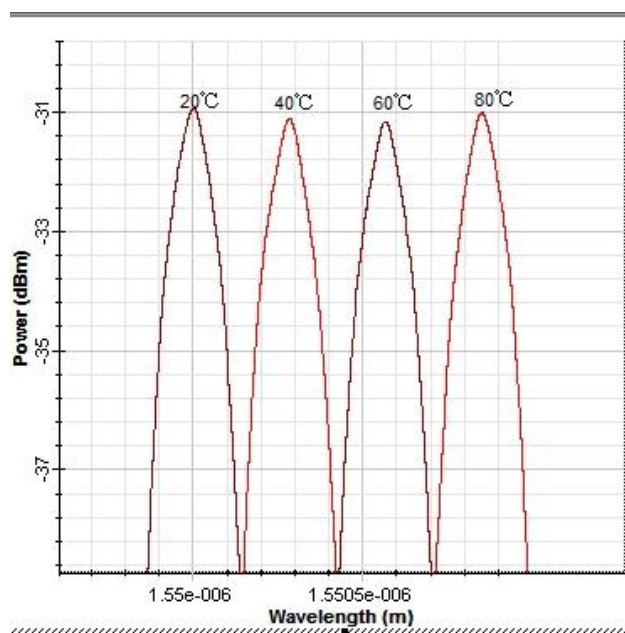
2.6-сурет. Модельдеуге арналған дизайынның блок-схемасы

Дизайнда 2 ақ жарық көзі, төрт FBG сенсоры, 2 оптикалық кідіріс, 2 оптикалық нөл, 2 порттық спектр анализаторы және екі WDM FBG сенсор

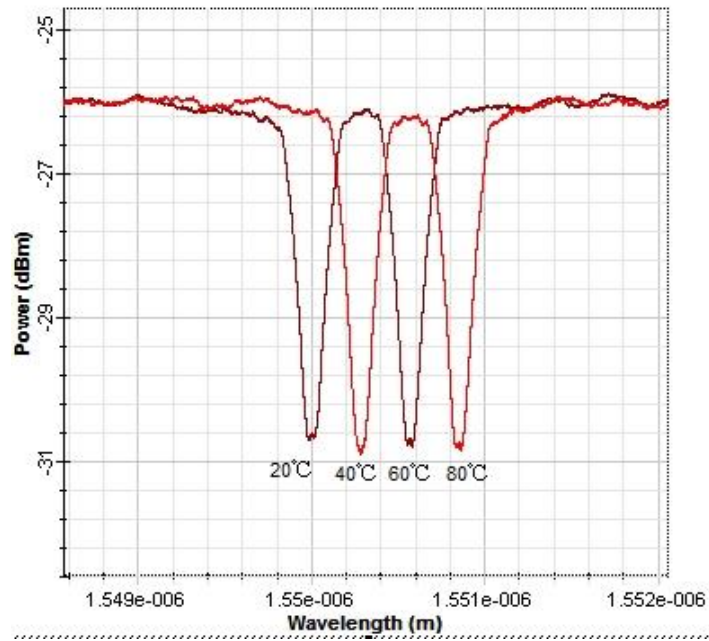
интеррогаторы болады. 4 FBG сенсорларына төрт түрлі температура беріледі, температураның өзгеруіне байланысты, толқын ұзындығының ығысуы өзгереді, ығысуының өзгеруі шағылысу спектры мен трансмиссия спектрының өзгеруіне әкеп соғады, екі портты спектр анализаторы бір уақытта екі оптикалық сигнал кірістерін қарайды және ол әдепкі оптикалық спектр анализаторының интерфейсімен еш айырмашылығы жоқ. Ал компонент кіріс портында сигнал табалмай қалу себебінен модельдеу орындалмай және жүйе жұмыс істемей қалмас үшін оптикалық кідіріс пайдаланылды[20], одан бөлек OptiSystem бағдарламасында әдепкі параметрлер пайдаланылды.

2.2.2. Модельдеу нәтижесі және спектрлік сипаттамасына талдау жасау.

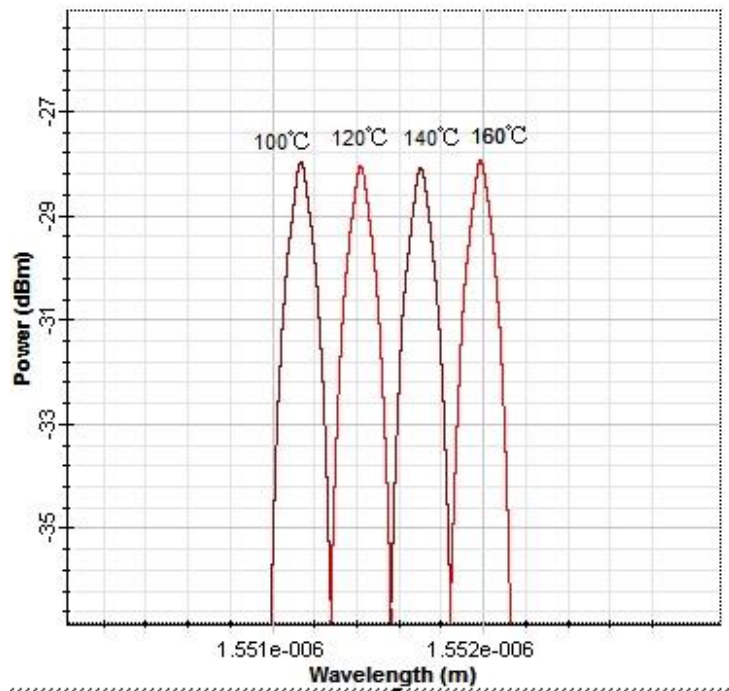
Модельдеуді тексеру 2 рет жүргізілді, 1-тексеруде FBG сенсорларына 20 °C дан 80 °C аралығында температура берілді, ал модельдеуден алынған шағылысу спектры мен трансмиссия спектры жеке-жеке 2.7-сурет және 2.8-суретте көрсетілді. 2- тексеруде FBG сенсорларына 100 °C дан 160 °C аралығында температура берілді, оның модельдеуден алынған шағылысу спектры мен трансмиссия спектры жеке-жеке 2.9-сурет және 2.10-суретте көрсетілді



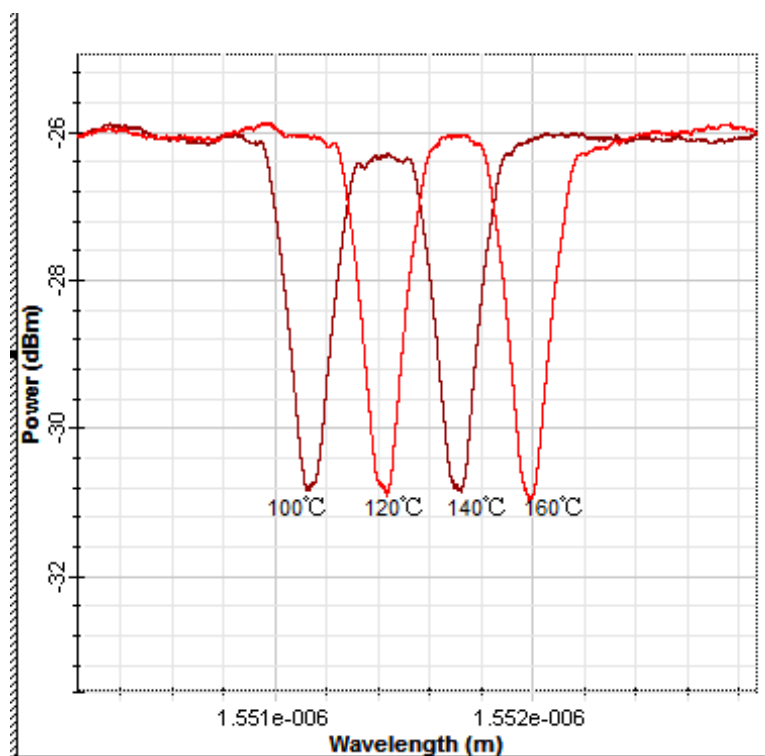
2.7-сурет. 20 °C, 40 °C, 60 °C және 80 °C болғандағы
Шағылысу спектры



2.8-сурет. 20°C, 40°C, 60°C және 80°C болғандағы Трансиссия спектры



2.9-сурет. 100°C, 120°C, 140°C және 160°C болғандағы Шағылысу спектры



2.10-сурет. 100°C, 120°C, 140°C және 160°C болғандағы Трансиссия спектры

Модельдеуде қолданған компоненттің параметрлер және модельдеуден алынған толқын ұзындығы ығысуының өзгеріс нәтижелері 1-кестеде көрсетілген.

1-кесте. толқын ұзындығы ығысуының өзгеріс нәтижесі

Бастапқы Брэгг толқын ұзындығы (nm)	Өткізу қаблеті (nm)	Шағылыстыру коэффициенті (reflectivity, %)	Температура (temperature, °C)	Механикалық кернеу (Strain)	Толқын ұзындығы ығысуының өзгерісі (Wavelength shifting, nm)
1550	0.25	99	20	0	0.00
1550	0.25	99	40	0	0.28
1550	0.25	99	60	0	0.57
1550	0.25	99	80	0	0.85
1550	0.25	99	100	0	1.14
1550	0.25	99	120	0	1.42
1550	0.25	99	140	0	1.70
1550	0.25	99	160	0	1.99

Жоғарыдағы сурет және кестеде көрсетілгендей температура 20 °C дан 160 °C аралығында өзгергенде, толқын ұзындығының ығысуы өзгерген, нәтиже бойынша толқын ұзындығының ығысуы 0 ден 1,99 нанометрге дейін тұрақты өзгеріп отырған, көріп отырғанымыздай нәтижелер толқын ұзындығының ығысуы өзгерісі температураға түзу сызықтық қатынаста екенін көрсетеді. Толықн ұзындығының ығысуы теориялық тұрғыдан 10pm/ °C өзгереді (6-ші теңдеу), бірақ модельдеу нәтижелері толқын ұзындығының өзгеруі шамамен 14.2pm/°C -ге өзгергенін көрсетеді.

Бұл модельдеудің бағыты температураның өзгеруімен FBG сенсорінен өткен жарық толқын ұзындығы ығысуының байланысын анықтау болатын, модельдеу нәтижесі теориялық тұрғыда есептелген нәтижеге негізінен сәйкес келді, азғантай айырмашылық болды, үйткені модельдеу бағдарламасына енгізілген параметрлерге байланысты толқын ұзындығы ығысуының модельдеу нәтижесі теориялық нәтижеден сәл көбірек.

2.3 Брэгг талшықты оптикалық торы негізіндегі механикалық кернеу сенсорын зерттеу

Брэгг талшықты оптикалық торы сенсор ретінде пайдалануға таптырмас ерекше қасиеттері бар, айтар болсақ тор созылғанда немесе қысым түскенде деформацияға ұшырағандықтан, микроқұрылымынан өткен жарықтың периодты өзгерісі және толқын ұзындығының ығысуы пайда болады, сол ерекшелігіне байланысты Брэгг талшықты торын механикалық кернеу сенсоры ретінде пайдалануға болады.

Деформация әсерінен талшықты Брэгг торын мына теңдеумен сипаттауға болады:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \Delta(n_{ef}\Lambda)/(n_{ef}\Lambda) = \left[1 + \left(\frac{1}{n_{ef}} \right) (\partial n_{ef} / \partial \varepsilon) \right] \Delta\varepsilon = (1 + \rho_e) \Delta\varepsilon = k \Delta\varepsilon \quad (7)$$

Бұндағы :

k – Брэгг торының К факторы;

ρ_e – Оптикалық майсқақтық эффектісінің коэффициенті (variation of index of refraction with axial tension).

Оптикалық талшықта шамамен ρ_e болады:

$$\rho_e \approx 0.21 \quad (8)$$

Демек Брэгг талшықты оптикалық торының механикалық кернеуге сезімталдығы:

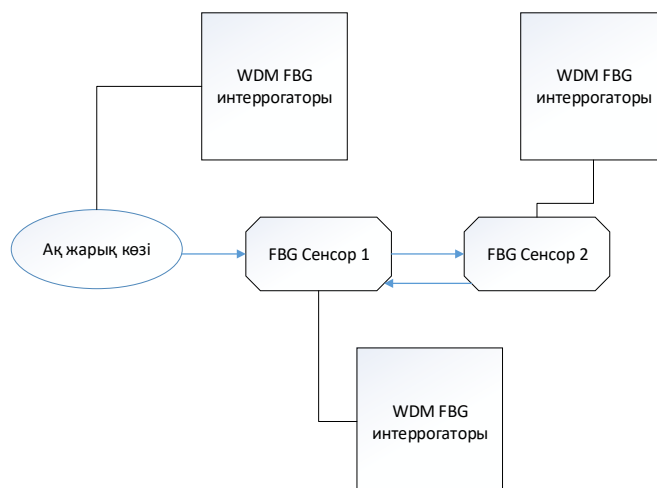
$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta\varepsilon} = k\lambda_0 = 0.79\lambda_0 \quad (9)$$

Типтік FBG-да толқын ұзындығын 1550nm деп алғанда, механикалық кернеуге сезімталдығы қысқартылып:

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta\varepsilon} = 1.2\text{pm}/\mu\xi \quad (10)$$

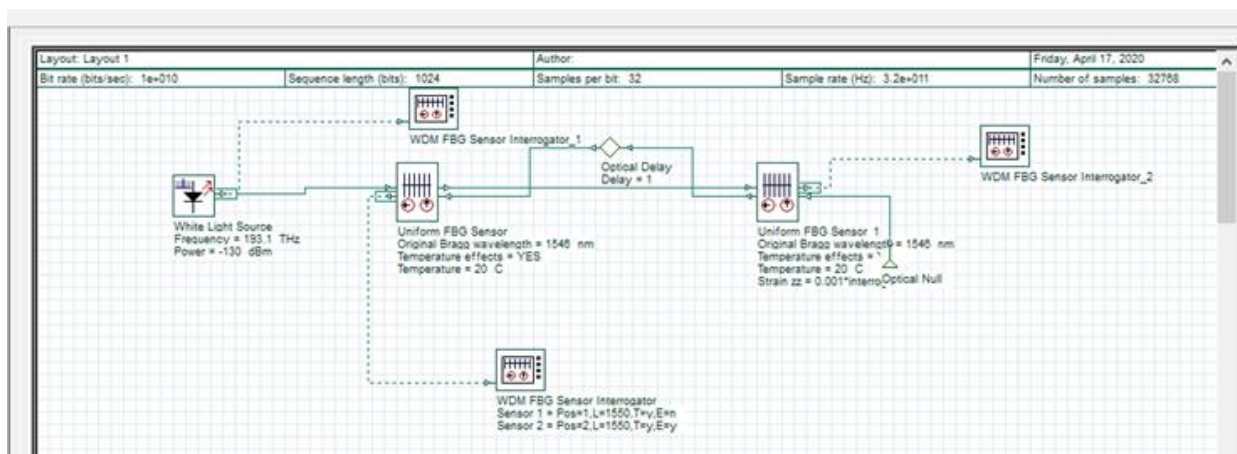
2.3.1 Брэгг талшықты оптикалық торы негізіндегі механикалық кернеу сенсорын зерттеу әдісі.

Модельдеуге арналған дизайнға сәйкес Брэгг талшықты оптикалық торы сенсорына берілген механикалық кернеуге байланысты, Брэгг талшықты торы сенсорының характеристикасы өзгереді, яғни механикалық кернеудің өзгерісі толқын ұзындығының ығысуына әкеледі, оны WDM FBG сенсоры интеррогатор көрсетеді. Бұндағы барлық модельдеу OptiSystem 16.1 бағдарламасында жүгізілді. Модельдеуге арналған дизайынның блок-схемасы 2.11-суретте көрсетілген.



2.11- сурет. OptiSystem арқылы модельдеудің блок-схемасы

Дизайнда 1 ақ жарық көзі, 2 Брэгг талшықты оптикалық тор сенсоры, екі WDM FBG сенсор интеррогаторы болады. Мұнда FBG сенсор 2 механикалық кернеу әсерінде болады, ал FBG сенсор 1 ешқандай механикалық кернеу әсерінде болмайды. WDM FBG интеррогаторын шағылысу спектры мен трансмиссиялық спектрды көрсетуге қолданамыз.

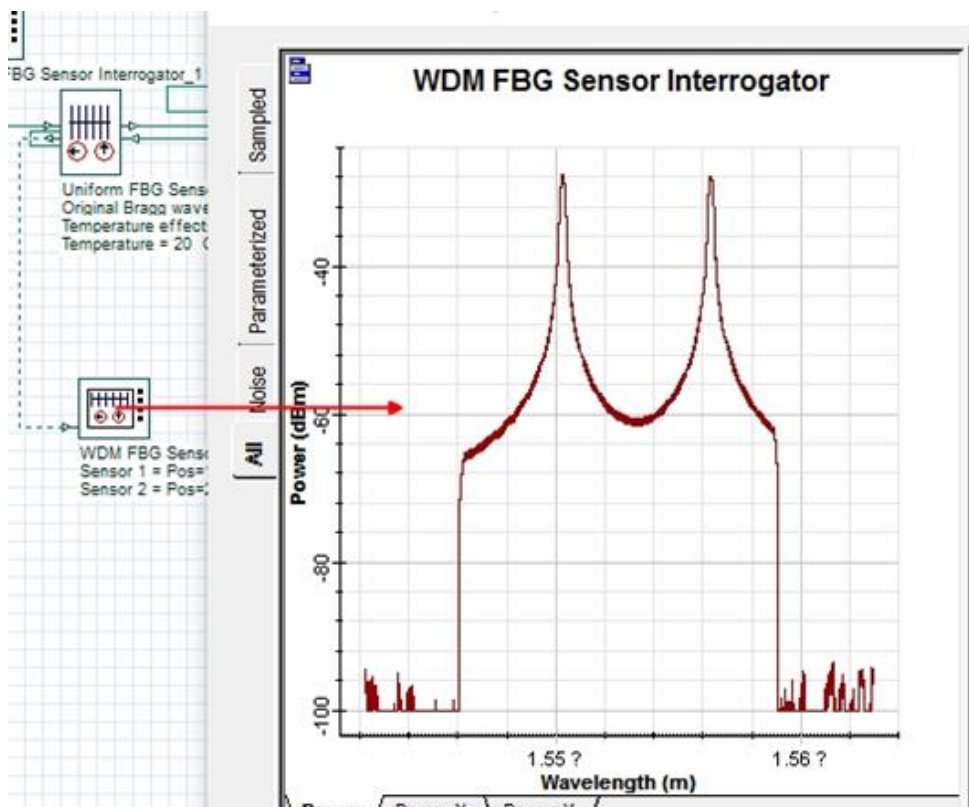


2.12-сурет. OptiSystem де құрастырылған жоба схемасы

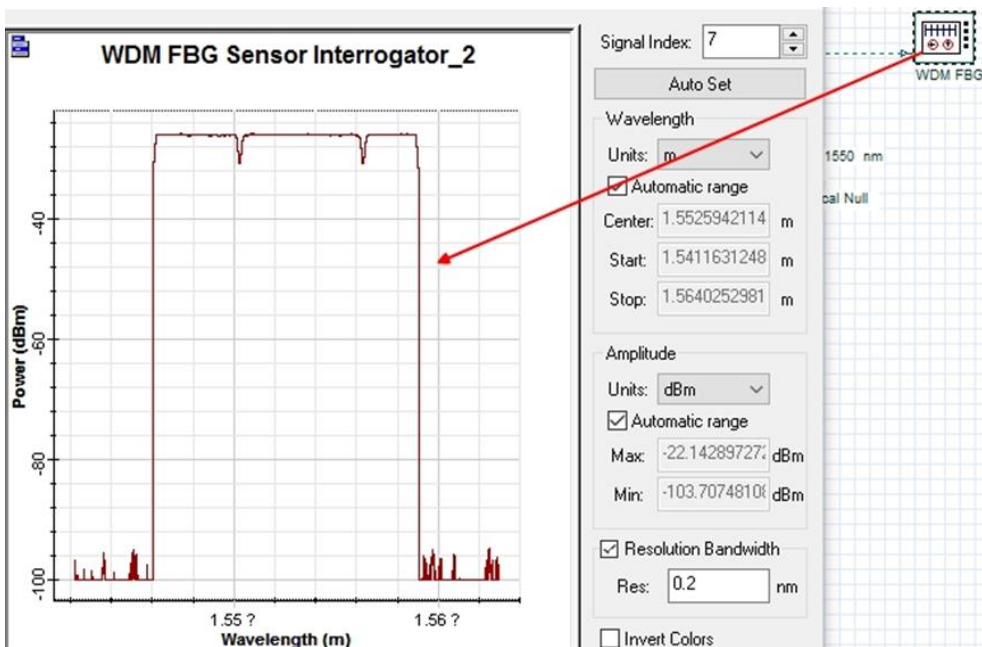
2.12- суретте, OptiSystem жүйеде осы модельдеудің құрылымын көрсетеді, компонент кіріс портында сигнал табылмай қалу себебінен модельдеу орындалмай және жүйе жұмыс істемей қалмас үшін 2 FBG сенсорының арасында оптикалық кідіріс қойылды. Бұндағы барлық FBG сенсорының температурасы әдепкі параметр 20 °C да өзгеріссіз қалады, ал тек FBG сенсор 2 ге $5 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-1} \mu\epsilon$ аралығында механикалық кернеу мәні беріледі, барлық сенсорлар үшін алғашқы толқын ұзындығы 1550nm етіп алынады, басқа параметрлер әдепкі параметрде болады. Барлық модельдеу OptiSystem 16.1 бағдарламасында жасалады.

2.3.2. Модельдеу және спектр нәтижелері.

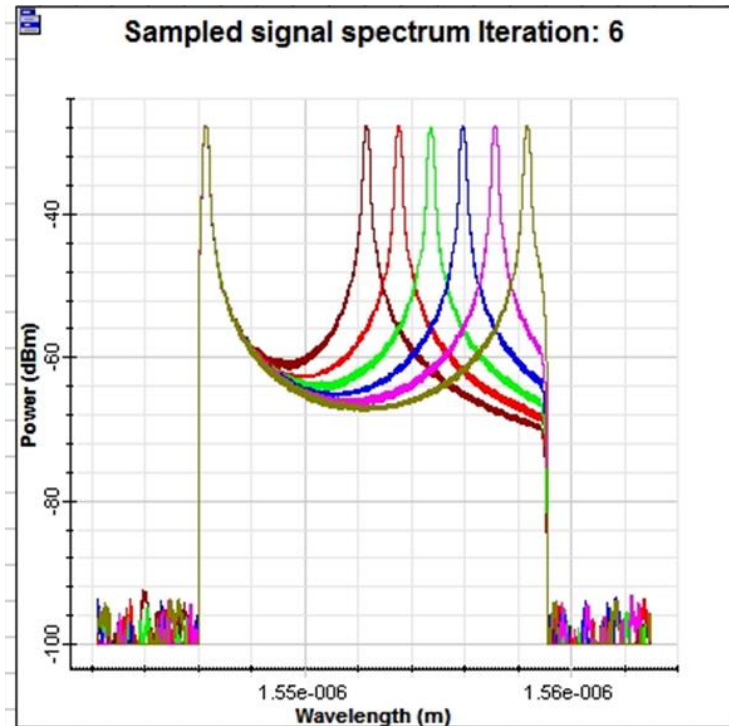
OptiSystem де модельдеу нәтижесі бойынша, алғашқы толқын ұзындығы 1550nm болатын 2 FBG сенсорының шағылысу спектры және трансмиссия спектрын алдық, ол сурет 2.13 және 2.14 да көрсетілген, FBG сенсорының механикалық кернеу түскендегі характеристикасы тіпті де анық байқалу үшін, FBG сенсор 1-дің алғашқы толқын ұзындығын өзгертіп 1545nm деп аламыз, ал FBG сенсор 2-нің алғашқы толқын ұзындығы өзгеріссіз қалады, басқа параметрлер өзгермейді, қайтадан модельдеуден алынған нәтижесі сурет 2.15 және 2.16 де көрсетілген.



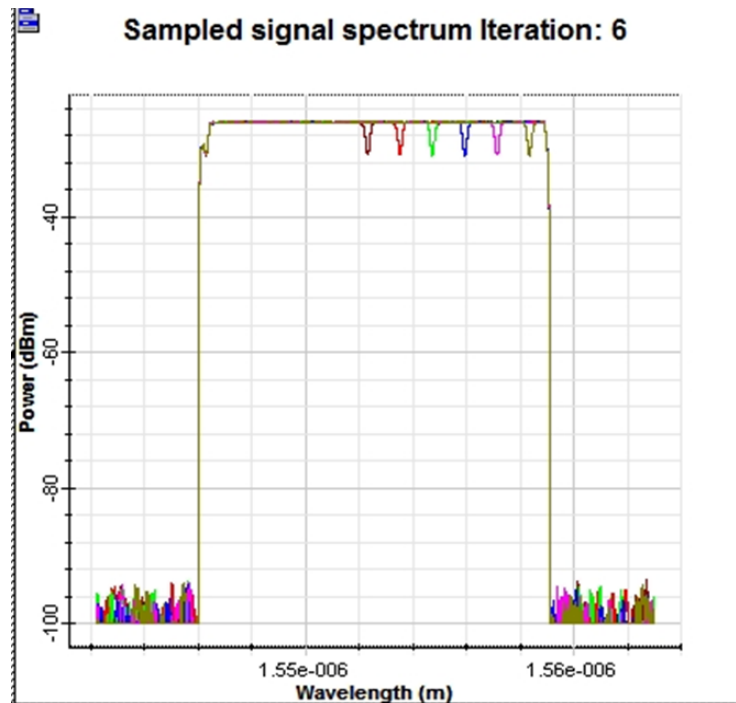
2.13-сурет. алғашқы толқын ұзындығы 1550nm кезіндегі шағылысу спектры



2.14-сурет. алғашқы толқын ұзындығы 1550nm кезіндегі трансмиссия спектры



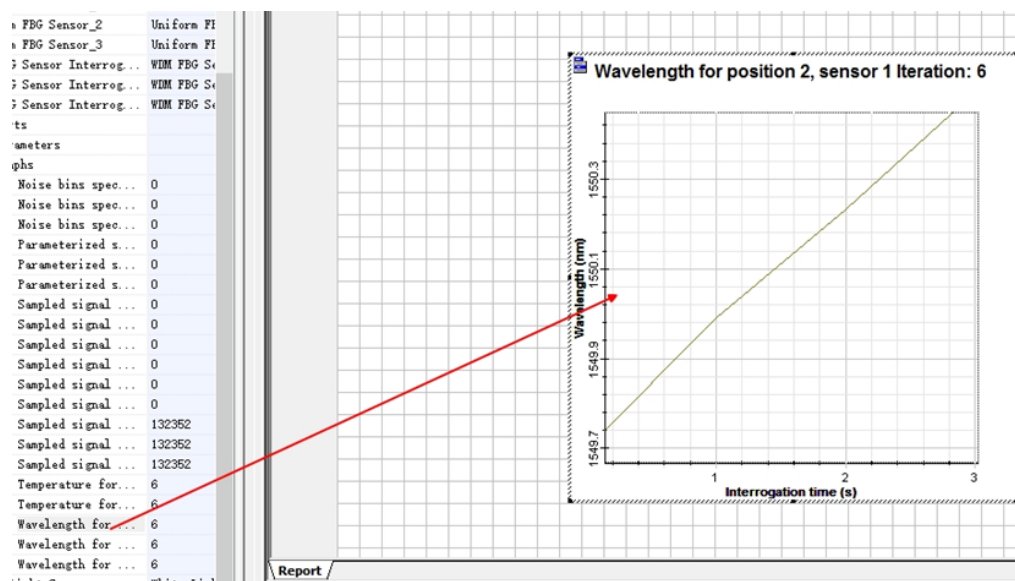
2.15-сурет. Сенсордың шағылысу спектры (механикалық кернеуге 6 түрлі мән берілген)



2.16-сурет. Сенсордың трансмиссия спектры (механикалық кернеуге 6 түрлі мән берілген)

Жоғарыдағы 2.15-суретте, сенсорға 6 түрлі ($5 \cdot 10^{-2}$, $6 \cdot 10^{-2}$, $7 \cdot 10^{-2}$, $8 \cdot 10^{-2}$, $9 \cdot 10^{-2}$ және $1 \cdot 10^{-1}$) мән берілгендегі шағылысу спектрлік сипаттамасы көрсетілген.

Жоғарыдағы 2.16-суретте, сенсорға 6 түрлі ($5 \cdot 10^{-2}$, $6 \cdot 10^{-2}$, $7 \cdot 10^{-2}$, $8 \cdot 10^{-2}$, $9 \cdot 10^{-2}$ және $1 \cdot 10^{-1}$) мән берілгендегі трансмиссия спектрлік сипаттамасы көрсетілген.



2.17-сурет. Толқын ұзындығының өзгеріс диаграммасы

FBG сенсорының толқын ұзындығының өзгеруі мен механикалық кернеу өзгеруі арасындағы байланыс жоғарыдағы 2.17-суретте көрсетілген.

2.3.3. Нәтижесіне талдау жасау.

Модельдеуден алынған шағылысу спектры мен трансмиссия спектрына талдау жасайтын болсақ, 2.13 және 2.14-суретте көрсетілгендей, FBG сенсорына механикалық кернеу берілгенде, толқын ұзындығының ығысуы пайды болған.

Ал 2.15 және 2.16-суреттегі спектр сипаттамасына талдау жасай келе толқын ұзындығы ығысуының үлкейуі, механикалық кернеудің артуына байланысты екенін әрі механикалық кернеу әсерінен болған толқын ұзындығы ығысуының үлкейуі тұрақты түрде болатынын талдауға болады.

Модельдеу жобамыз бойынша механикалық кернеу уақыт өткен сайын арта береді, ал нәтижесінде толқын ұзындығы да уақыттың артуына

байланысты арта берді, демек механикалық кернеудің ұлғаюы мен толқын ұзындығының ығысуы оң корреляциялық байланыста.

2.4 Брэгг талшықты оптикалық тор сенсоры арқылы температура мен механикалық кернеуді өлшеуді зерттеу қортындысы

Бұл тарауда OptiSystem бағдарламасы арқылы FBG сенсорының жұмыс атқару қағидасына және FBG сенсорының температура мен механикалық кернеу характеристикаларына модельдеу жасалды.

Біріншіден OptiSystem бағдарламасымен модельдеу арқылы жалғыз FBG сенсорының спектрлік сипаттамалары алынды, модельдеу нәтижесі теорияда айтылған қағидаларға сәйкес болды, әрі қарай модельдеуде FBG сенсорын температураға сезімтал сенсор ретінде қолданғанда, модельдеу нәтижесінің мәнімен теориялық мән арасында азғантай айырмашылық болғанымен, жалпы алғанда модельдеу нәтижесі теорияны жақсы қуаттады. Соңында FBG сенсорында әртүрлі механикалық кернеу мәндерін беру арқылы модельдеудің нәтижелері теорияға сәйкес келетін көрсетті, сонымен бірге FBG сенсордың толқын ұзындығының ығысуы температура мен кернеудің өзгеруіне байланысты әрі сызықты қатынаста. Теориялық нәтижелер модельдеулермен расталды.

3 Брэгг талшықты оптикалық торының кросс-сезімталдық мәселесінің туындау себебі және оны шешу амалдарын зерттеу

FBG сенсорлары FBG сенсорының ерекше қасиеттеріне байланысты құрылыста LRT сяқты транспортын құрылымдық бақылауда кеңінен қолданылады. LRT құрылымының температурасын немесе механикалық кернеу өзгерісін өлшеу үшін FBG сенсорын қолданылған кезде, FBG толқын ұзындығының ығысуы, температура және механикалық кернеуге түзу сызықтық қатынаста өзгереді, сонымен қатар механикалық кернеу мен температура бір уақытта орын алуы мүмкін, яғни, толқын ұзындығының өзгерісі қайсысының әсерінен екенін анықтау қиын, бұны FBG сенсорының кросс-сезімталдық мәселесі дейміз. Сондықтан температура мен механикалық кернеудің кросс-сезімталдығы талшықты торды сезіну технологиясын дамытуда әрқашан өзекті мәселе болып келді.

3.1 Температура мен механикалық кернеудегі кросс-сезімталдықты ажырата анықтау әдісі

Механикалық кернеу мен температураны бір уақытта өлшеуге арналған әдістер көп, оның негізгі түрлері қос толқын ұзындығының матрицалық әдісі(dual wavelength matrix method), қос параметрлі матрица әдісі(dual parameter matrix method), эталондық оптикалық тор әдісі(reference grating method), температураның компенсациялық әдісі(temperature compensation method) және жарық интенсивтік әдісі(light intensity measurement) сияқты бірнеше технологияларға негізделген[21,22,23]:

1) Қос толқын ұзындығының матрицалық әдісі – ең ерте пайда болған және қазіргі кезде кеңінен қолданылатын әдіс. Негізгі теориясы - бір сенсор басындағы екі түрлі БРЭГГ толқындарының ұзындығын белгілі бір жолмен алып, осы екі БРЭГГ толқын ұзындығының ығысуын анықтау арқылы механикалық кернеу мен температураны бір мезетте өлшеу. Егер формула бір уақытта екі өлшенген мәнге сезімтал болса және толқын ұзындығының ығысуы температура мен механикалық кернеу бойынша сызықты өзгерсе, ал температура мен механикалық кернеу өзгерістері тәуелсіз немесе аз ғана бұзылуға ие болса, онда келесі формуланы алуға болады:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1/\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2/\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{\varepsilon 1} & k_{T1} \\ k_{\varepsilon 2} & k_{T2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (11)$$

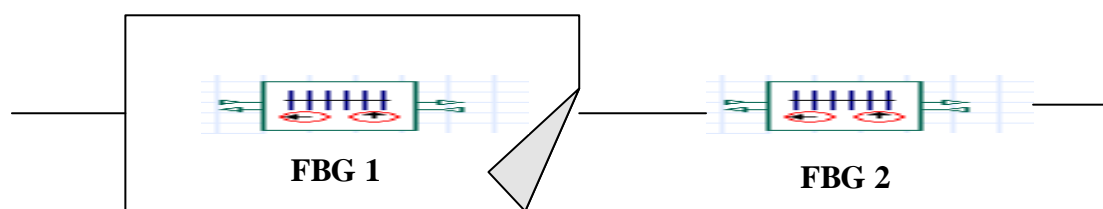
Формуладағы $k_{\varepsilon i}$ - бұл БРЭГГ толқын ұзындығының механикалық

кернеуге сезімталдық коэффициенті, талшықты Пуассонның қатынасына, Оптикалық майсқақтық эффектiсiнiң коэффициентiне және жарықтың талшықтағы эффективтi сыну көрсеткiшiне байланысты; k_{Ti} -БРЭГГ толқын ұзындығының температураға сезімталдық коэффициенті, ол ыстыққа ісіну коэффициенті мен термо-оптикалық коэффициентіне байланысты[30].

Бұл әдіс бойынша 2 FBG-дің толқын ұзындықтарының айырмашылығы жеткілікті үлкен болу керек, сондықтан 2 айырым оптикалық көзі және демодуляция құрылғысы болу керек, бағасы өте қымбат келеді.

2) Қос параметрлі матрица әдісі. Қосарлы параметрлер матрицасы әдісі температура мен механикалық кернеу әсерін бір жарық толқынының әртүрлі параметрлеріне әсер ету арқылы сәйкес қатынасты алып, содан кейін кернеу мен температураның дифференциалды өлшеуіне қол жеткізу. Соңғы жылдары осы идеяға негізделген кросс-сезімталдық мәселелерін шешуге арналған көптеген әдістер бар, мысалы аралас FBG / ұзақ циклді торлау әдісі, екі реттік гармоникалық әдіс, ерекше құрылымды оптикалық тор әдісі және т.б. Бұл әдіс жоғары дәлдікке ие, бірақ құрылымы күрделірек және техникалық жасалу талабы өте жоғары.

3) Эталондық оптикалық тор әдісі. Бұл әдіс бірдей өлшеу нүктесін өлшеу үшін бірдей параметрлері бар екі FBG қолданады, 2 өзара жақын және центрлік толқын ұзындығы ұқсас FBG арқылы бір сенсорлық зонд құрастырылады[24]. Ондағы FBG1-дің ұзындық өлшемі - L_1 , FBG2-нің ұзындық өлшемі- L_2 (2.12-сурет). Бұл жүйеде FBG1 сенсор тек температураның өзгерісіне жауап береді және ол механикалық кернеудің өзгерісінен оқшауланған болуы керек.



3.1-сурет. Қос FBG сенсор зондының схемалық диаграммасы

Сурет-3.1 де FBG1 шыны түтікке орнатылады, ал екі ұшы шыны түтікке бекітілген, сондықтан оған тек сыртқы температура әсер етеді, FBG2 шыны түтікке орнатылмаған, сондықтан температура мен механикалық кернеу бір уақытта әсер етеді. Оптикалық талшық пен шыны түтік бірдей ыстыққа ісіну қасиетіне ие болғандықтан, FBG1 және FBG2 температураларға сезімталдық

коэффициенттері бірдей. Бұл әдіс салыстырмалы түрде қарапайым және ығысуға аз ұшырайды, бірақ динамикалық өлшем алуда температураның гистерезисі өлшеу қателіктерін тудырады.

4) Температураның компенсациялық әдісі. Шындығында температураның компенсациялық әдісі қазіргі кезде ең көп зерттелген. Бұл әдіс негізінен температураның өзгеруіне байланысты толқын ұзындығының ығысуын белгілі бір әдіс немесе құрылғы арқылы жояды, сондықтан механикалық кернеуді өлшеуге температура әсер етпейді. Соңғы жылдары көптеген шетелдік ғалымдар FBG кросс-сезімталдығы туралы мәселені көтерді, көбінесе температураны және механикалық кернеуді бір уақытта өлшеу үшін температураның компенсациялық әдісін қарастырды. Олар екі санатқа бөлінеді: жалғыз FBG әдісі және қосарланған FBG әдісі. Бұл әдіс жақсы тәжірибеге ие, бірақ дизайн құрылымы күрделірек және ұзақ мерзімді тұрақтылығы әлі де жеткіліксіз.

5) Жарық интенсивтік әдісі арқылы температураны өлшеу температураның шамасын жарықтың қуаты мен өлшенетін нүктенің температурасы арасындағы байланыс арқылы анықтайды, осылайша температураның толқын ұзындығының жылжуына әсерін жоюға болады. Бұл әдіс FBG арнайы құрылымын қажет етеді және арнайы материалдарды қолдануды талап етеді. Сонымен бірге демодуляция схемасына сәйкес талаптар бар.

3.2 Брэгг талшықты торының кросс-сезімталдық мәселесін температураны компенсациялау әдісі арқылы шешу амалы

Бұл бөлімде Брэгг талшықты тор сенсоры температураны және механикалық кернеу параметрлерін бір уақытта өлшеу үшін температураны компенсациялау әдісі негізінде жүйені оңтайландырып, сол арқылы температура мен механикалық кернеудің кросс-сезімталдық мәселесін шешеді[25].

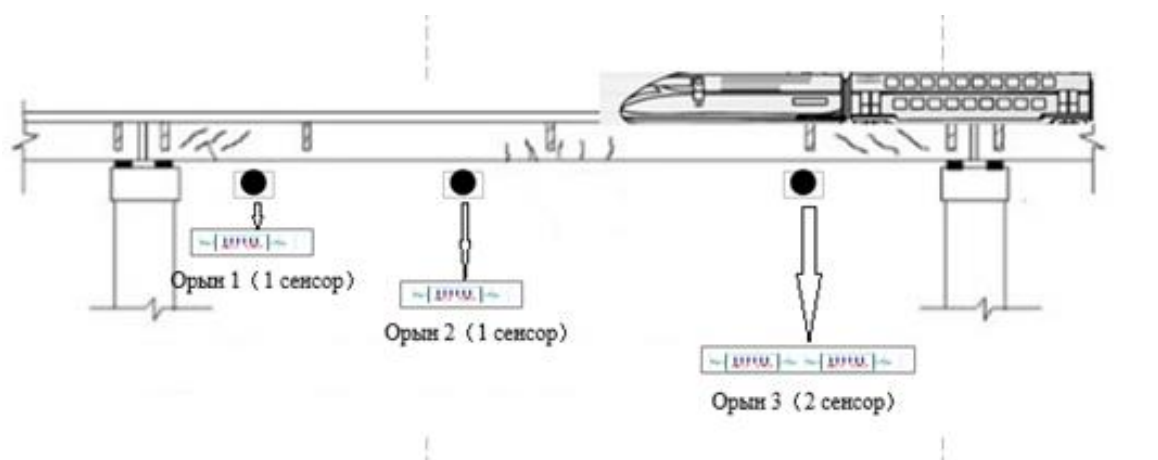
Көбінде бұл әдіс бойынша 2 Брэгг талшықты тор сенсорын пайдаланамыз, 1-ші сенсорды деформацияға ұшырамайтындай етіп жалғаймыз, ал 2-ші сенсорға деформацияны да температураны да сезінетіндей етіп жалғаймыз, осылайша біз келесі 12 және 13-ші теңдеуді аламыз.

$$\Delta\lambda_1 = \Delta T(\alpha + \zeta)\lambda_1 \quad (12)$$

$$\Delta\lambda_2 = [\varepsilon(1 - \rho_e) + \Delta T(\alpha + \zeta)]\lambda_2 \quad (13)$$

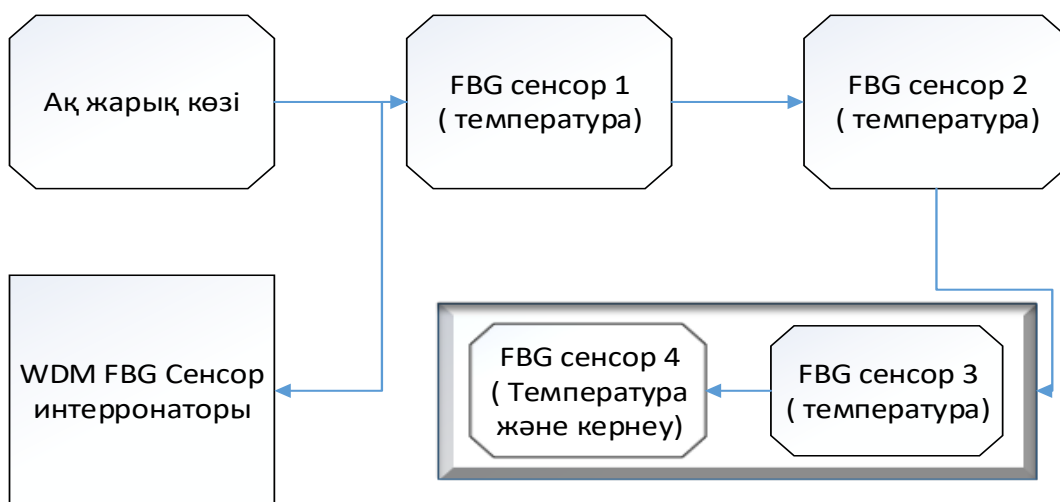
3.2.1 Зерттеудің модельдеу дизайны және нәтижесі.

Барлығымызға белгілі, Нұр-Сұлтан қаласында LRT салынууда, қаламыздың ауа-райы өте құбылмалы, әсіресе қыс мезгілінде, ол LRT-ның құрылымына зиян келтіріп құрылымын өзгертуі мүмкін, соны бақылап отыру үшін мысалға былай істеуге болады. 1-ші орынға 1 температура сенсорын, 2-ші орынға 1 температура сенсорын, 3-ші орынға бір температураны және бір деформацияны сезінетін жалпы 2 сенсор қоямыз. Жоба 3.2-суретте көрсетілген.



3.2-сурет. LRT-де 3 орынға қойылған 4 сенсор

Бұл жоба бойынша OptiSystem бағдарламасында FBG сенсорын қолдану арқылы әр секунд сайын температурамен деформация өзгерісін бақылап, жүйеге жеткізіп отыратын етіп жасақтаймыз, OptiSystem бағдарламасында осылай бірнеше компоненттерді бірге жасақтап сенсордағы өзгерістерді жүйеге мәлімдеу мүмкіншілігі қарастырылған. Жобадағы OptiSystem блок-схемасы 3.3-суретте көрсетілген, онда 1 ақ жарық көзі, 4 FBG сенсоры, 1 WDM FBG интеррогаторі бар.



3.3-сурет. OptiSystem блок-схемасы

3.2.2. Қарастырылған жобаны модельдеу және нәтижесіне талдау жасау.

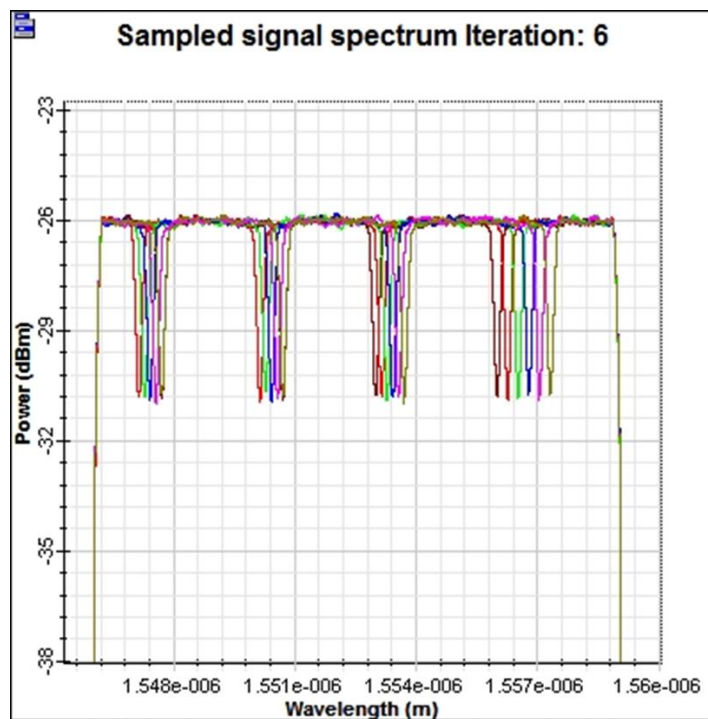
Талшықты оптикалық тордағы жарықтың таралу ерекшелігіне сәйкес, әдетте FBG сенсорындағы Брэгг толқын ұзындығы 1530nm-1570nm аралығында, модельдеудегі спектр анық бақылауға ыңғайлы болу үшін, 1-сенсордағы бастапқы толқын ұзындықтарын 1547nm, сенсор 2 дегі бастапқы толқын ұзындықтарын 1550nm, сенсор 3 дегі бастапқы толқын ұзындықтарын 1553nm, сенсор 4 дегі бастапқы толқын ұзындықтарын 1556nm деп алып, модельдеудегі 4 сенсор өзгерісін хабарлау интервалын 1 секунд деп алынды. Сонымен қатар әр секунд сайын температура 10 °C көтеріледі, механикалық кернеу әр секунд сайын 100μξ артады, 4-сенсордағы механикалық кернеу 0μξ ден 500μξ ге дейін артады, ал барлық жайғдайда FBG сенсорындағы температура 0 °C ден 50 °C ге дейін артады, бұл параметрлерді OptiSystem бағдарламасына енгізу үшін “.dat” форматында болуы керек(2-кесте). 3-ші және 4-ші сенсор бір орында орналасады.

2-кесте. Температура және механикалық кернеу өзгерісі

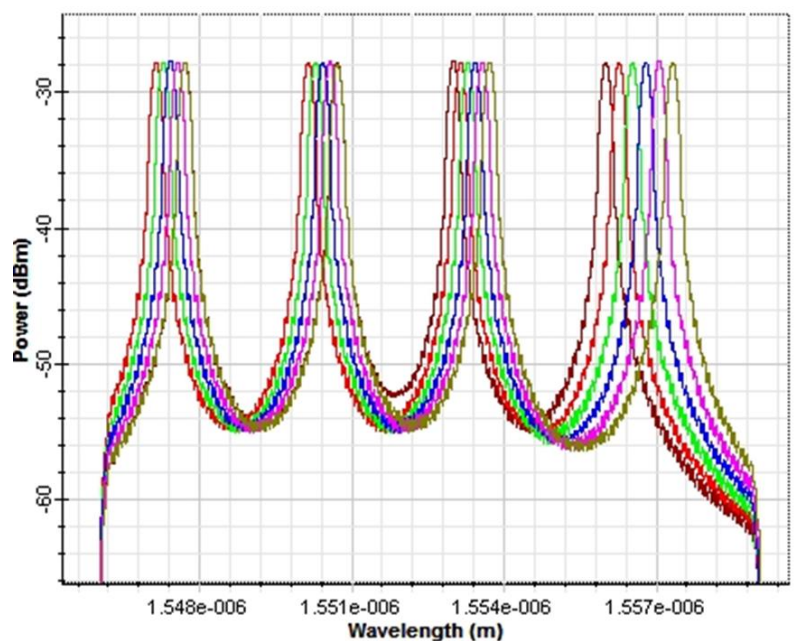
Temp.dat	0	10	20	30	40	50
Strain.dat	0	10e-5	20e-5	30e-5	40e-5	50e-5

Төмендегі 3.4-суретте, 1, 2, 3 орында орналасқан 3 FBG сенсорының 0-50 °C ге дейін өзгергендегі және 4-ші сенсордың механикалық кернеуінің 0-500μξ ге дейін өзгергендігі жарықтың шағылысу спектры көрсетілген, ал 3.5-суретте, 1, 2, 3 орында орналасқан 3 FBG сенсорының 0-50 °C ге дейін

өзгергендегі және 4-ші сенсордың механикалық кернеуінің 0-500 $\mu\xi$ ге дейін өзгергендегі жарықтың трансмиссия спектры көрсетілген.

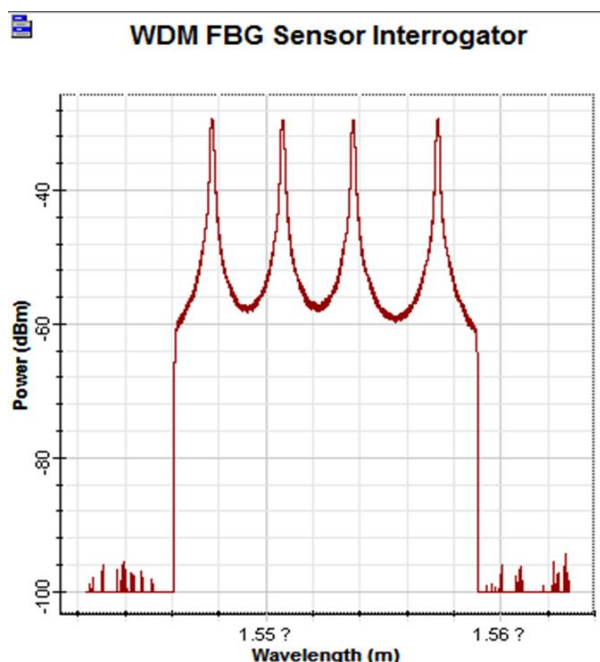


3.4-сурет. трансмиссия спектры
(температура: 0 -50 °C,механикалық кернеу:0-500 $\mu\xi$)

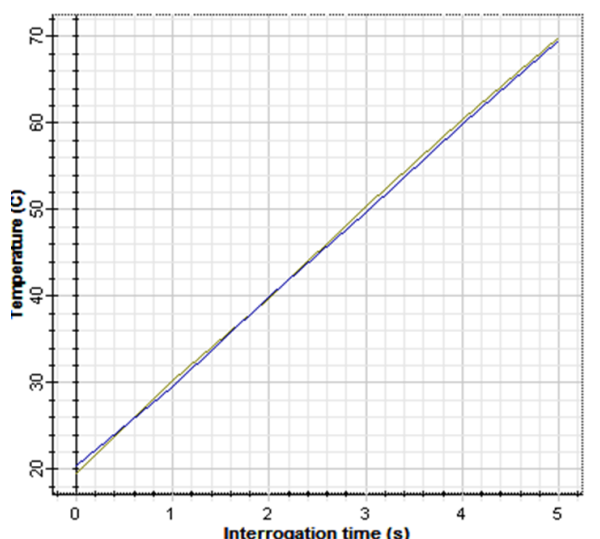


3.5-сурет. шағылысу спектры
(температура:0 -50 °C,механикалық кернеу:0-500 $\mu\xi$)

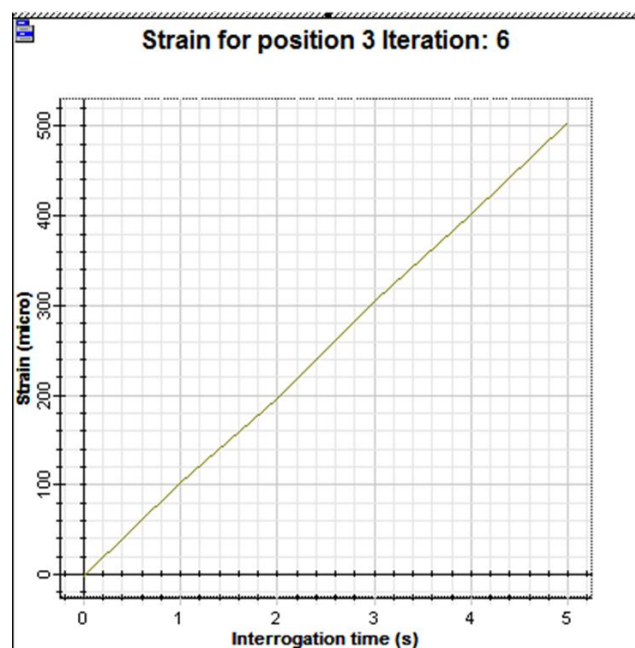
OptiSystem бағдарламасымен модульдеуден алынған белгілі бір сәттегі 3 орынға орналастырылған 4 сенсордың шағылысу спектры характеристикасы, температурамен толқын ұзындығы ығысуына байланысының характеристикасы және механикалық кернеудің толқын ұзындығы ығысуына байланысының характеристикасы 3.6, 3.7 және 3.8-суретте көрсетілген.



3.6-сурет. Шағылу спектрының нәтижес

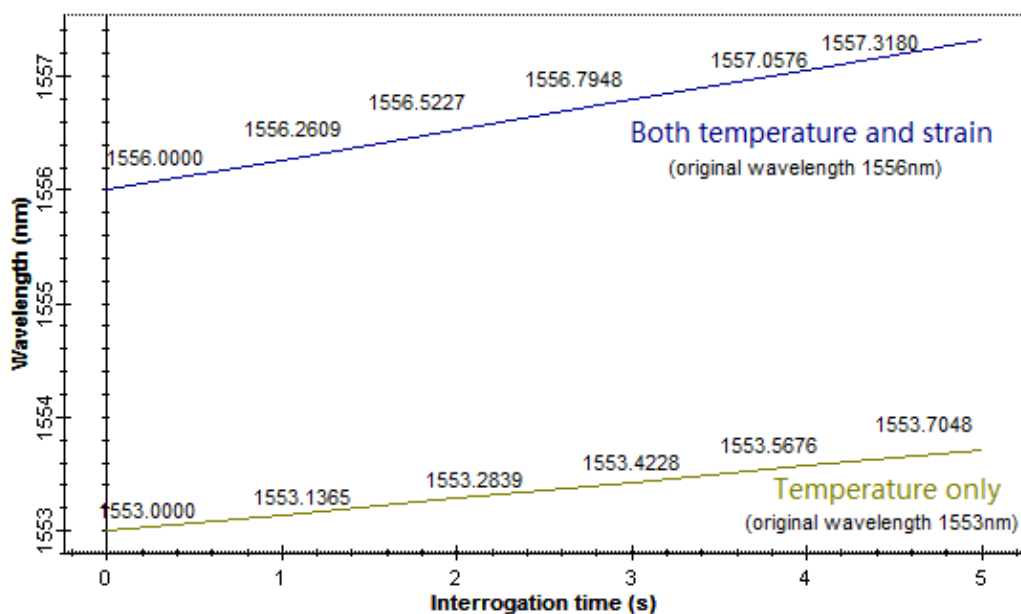


3.7-сурет. Температураның толқын ұзындығы ығысуына характеристикасы



3.8-сурет. Механикалық кернеу толқын ұзындығы ығысуына характеристикасы

Көріп отырғанымыздай, бақылау уақытының өзгерісіне қарай температура мен механикалық кернеу тұрақты өзгерісті ұстады, ол жоба бойынша күтілген нәтижеге сәйкес еді, ал температура мен механикалық кернеудің өзгеруіне байланысты толқын ұзындығы ығысу өзгерісінің тұрақтылығы, толқын ұзындығы мен механикалық кернеудің түсу сызықты қатынаста екенін тағы бір рет дәлелдеді. Модельдеу бойынша 3-ші орында тұрған 3-ші сенсордың температурадан болған толқын ұзындығы ығысуының өзгерісі мен 4-ші сенсордың температура және механикалық кернеулердің бірдей әсерінен болған толқын ұзындығы ығысуы өзгерісінің айырмашылығы, жағарыда айтылған температураның компенсациялық әдісі бойынша механикалық кернеудің әсерінен болған толықын ұзындығы ығысуының өзгерісі болады, ол 3.9-суретте және 3-кестеде айқын көрсетілген.



3.9-сурет. 3-ші орында орналасқан 3-ші және 4-ші FBG Сенсорындағы толқын ұзындығы

3-кесте. 3-ші орындағы модельдеуден алған мәнде

	орын 3 сенсор 3, бастапқы толқын ұзындығы 1553nm, (температура)	орын 3 сенсор 4, бастапқы толқын ұзындығы 1556nm, (температура және кернеу)	орын 3 (кернеу)	
температура (°C)	Толқын ұзындығының ығысуы, (nm)	кернеу	Толқын ұзындығының ығысуы, (nm)	Толқын ұзындығының ығысуы, (nm)
10	0.1365	1e-04	0.2609	0.1244
20	0.1474	2e-04	0.2618	0.1144
30	0.1389	3e-04	0.2721	0.1332
40	0.1448	4e-04	0.2628	0.1180
50	0.1372	5e-04	0.2604	0.1232

Жоғарыдағы кестеде, 3-ші орынға қойылған 2 FBG сенсорының модельдеуде қолданған температура мен механикалық кернеудің мәні жазылған, механикалық кернеу мен температураның әсерінен Брэгг толықын ұзындығы ығысуының өзгерісі сәйкесінше жеке-жеке көрсетілген және есептеу арқылы тек механикалық кернеу әсерінен өзгерген толқын ұзындығы

ығысуының мәні кестенің соңғы қатарында көрсетілген.

3.2.3 Модельдеуден алынғын нәтижеге талдау жасау.

3.3, 3.4 және 3.5 суреттегі спектрлық сипаттамалардан көретініміз 3-ші орында орналасқан 3- сенсордағы жарықтың толқын ұзындық ығысуы мен 1 және 2-ші орында тұрған 2 сенсордың толқын ұзындығының ығысу шамасы негізінен ұқсас болды, бұл деформацияның температураға сезімтал сенсорға еш әсері жоқ екендігін көрсетті. Берілген мәліметтерден сенсордың толқын ұзындығының ығысу өзгерісі мен механикалық кернеу өзгерісі түзу сызықты байланыста болатындығын көруге болады. Кестеде келтірілген модельдеуден алынған кернеудің әсерінен туындаған толқын ұзындығының ығысу мәні арқылы кернеудің сезімталдығы $1.226 \text{ pm}/\mu\epsilon$ болды, бұл алдыңғы тарауда қарастырылған формула (10) бойынша теориялық есептелген механикалық кернеуге сезімталдық мәні $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ға тамаша сәйкес келеді, осылайша FBG сенсорының кросс-сезімталдық мәселесі осы жобамен тамаша шешіледі

3.2.4 Брэгг талшықты оптикалық торының кросс-сезімталдық мәселесін зерттеуден алынатын қортынды.

FBG сенсорының толқын ұзындығы мен механикалық кернеу арасындағы байланыс характеристикасы OptiSystem бағдарламасы арқылы моделденді, модельдеу нәтижесіне қарағанда сенсорға түскен механикалық кернеу артқан сайын сенсордағы толқын ұзындығының ығысуы да артады, сенсордың механикалық кернеу сезімталдығы $1.226 \text{ pm} / \mu\epsilon$. Брэгг толқын ұзындығы мен механикалық кернеу арасында түзу сызықтық байланыс бар және екеуінің корреляция коэффициенті 0,98 ден астам болды, демек FBG сенсоры таптырмас, механикалық кернеуге жоғары сезімталды компонент екенін көрсетеді. Сонымен қатар деформацияның температураға сезімтал сенсорға еш әсері жоқ екендігін де түйіндедік. FBG сенсорының характеристикалары өте тұрақты екеніне көз жеткіздік және температура компенсациялық әдісімен FBG сенсорында болатын кросс-сезімталдық мәселесін идеялды шешуге болатынына көз жеткіздік, демек осы амалды қолдана отырып FBG сенсорын бір мезетте температура және деформациялық өзгерістерді бақылап отыруды қажет ететін LRT немесе басқа өндірістік объектілерде қолдануға болады.

4. FBG сенсорының параметрлерінің FBG сенсорының жұмысына әсерін модельдеу, зерттеу және нәтижеге талдау жасау

Бұл бөлімде FBG сенсорының өзіндік параметрлері FBG сенсорының жұмыс істеуіне әсерін талқылаймыз, OptiSystem де модельдейміз және модельдеу нәтижесіне талдау жасаймыз. FBG сенсорын шынайы практикада немесе өндірісте қолдану барысында әр түрлі жағдайға байланысты талаптарды қамтамасыз ету қажет болады, мысалы мұнай-газ өндірісінде[29], сейсмикалық барлау барысында жоғары өткізу қабілеттілігі талап етіледі, ал FBG сенсорының өзіндік қасиеттерінің бірі шағылысқан толқын ұзындығының төмен өткізу қабілеті, FBG әр-түрлі параметрлеріне өзгеріс енгізу арқылы модельдеп қолданыс талабына сәйкестендіру мүмкіншілігін қарастырамыз. Бұл жерде FBG сенсорының өткізгіштік қабілетімен қоса сыну эффект коэффициентіне, шағылысу коэффициентіне, FBG сенсор ұзындығының сенсор характеристикасына беретін әсерін модельдеу арқылы саралаймыз, талдаймыз және қортындылаймыз.

Негізінде FBG сенсорының қасиетін контролда ұстаудың 3 маңызды факторы бар, олар : талшықты оптикалы тордың ұзындығы, оптикалық тордың қуаттылығы және сыну эффект коэффициенті. FBG сенсоры температура, механикалық кернеу және қысымның қайсысының да өзгерісі толқын ұзындығына әсер етуі негізінде құрылған, осы параметрлерге байланысты FBG сенсорын температура, деформация және қысым өлшеуге қолдануға болады[26].

Толқын таратқыш каналдағы жарықтың таралуына анализ жасаудың ұтымды жолдарының бірі СМТ(Coupled mode theory, жұптастырылған режим теориясы), бұл теория- тарату режимі және Максвелл теңдеуі арқылы шешіледі. СМТ өрістің муфта құрылымының режимін сызықтық суперпозиция арқылы білдіруге болады деп болжайды [27]. Ал сызықты комбинацияны идеялды режимде болғанда, онда электр өрісі:

$$E(z)=\sum\{A_k^+ \exp(-j\beta_k z) + A_k^- \exp(j\beta_k z)\}E_k \quad (14)$$

Мұндағы A_k^+ , A_k^- - к-інші режиміндегі + z және -z бағытында таралған баяу өзгертін амплитудасы, β_k - к-інші режиміндегі + z және -z бағытындағы таралу константасы және E_k - к-інші режиміндегі + z және -z бағытындағы модальдық өріс. Толқындар режимдерінің қасиеттерін қолдана

отырып, жұптасқан режим теңдеулері келесідей болады:

$$dA_k^+ / dz = j \sum \{ A_m^+ C_{mk} \exp[-j(\beta_m - \beta_k)z] + A_m^- K_{mk} \exp[j(\beta_m + \beta_k)z] \} \quad (15)$$

$$dA_k^- / dz = j \sum \{ A_m^+ C_{mk} \exp[-j(\beta_m + \beta_k)z] + A_m^- K_{mk} \exp[j(\beta_m - \beta_k)z] \} \quad (16)$$

Жалғыз режимды Брэгг талшықты оптикалық торы үшін (15) және (16) теңдеу қысқартылып :

$$dA_k^+ / dz = j\delta A_k^+(z) - j\delta A_k^-(z) \quad (17)$$

$$dA_k^- / dz = j\delta A_k^-(z) + j\delta A_k^+(z) \quad (18)$$

Мұндағы δ – DC(тікелей ток) байланыс коэффициенті, k – AC(айнымалы ток) байланыс коэффициенті, оларды:

$$\delta = \delta + \sigma - \frac{d\psi}{2dz} \quad (19)$$

$$k = k^* = \frac{\pi}{\lambda} \bar{\nu} n_{eff} \quad (20)$$

Мұндағы $\bar{\nu} n_{eff}$ -талшықтағы эффективті сыну көрсеткіші, ν -интерферометриялық көріну, Теңдеудегі δ және σ :

$$\delta = \beta - \frac{\pi}{\Lambda} = 2\pi n \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right) \quad (21)$$

$$\sigma = \frac{2\pi}{\lambda} \bar{\nu} n_{eff} \quad (22)$$

Мұндағы Λ , n және λ_B - тордың периоды, талшықты тор өзегінің сыну көрсеткіші және Брэгг толқын ұзындығы. Берілген матрицалық әдісті қолдана

отырып FBG спектрлік жауабын алу үшін жұптасқан режим теңдеулерін шеше отырып, біркелкі FBG (uniform FBG) үшін шағылыстың аналитикалық өрнегі алынады:

$$r = \frac{\sin h^2\left(\sqrt{k^2 - \delta L_g}\right)}{\cos h^2\left(\sqrt{k^2 - \delta L_g}\right) - \frac{\delta^2}{k^2}} \quad (23)$$

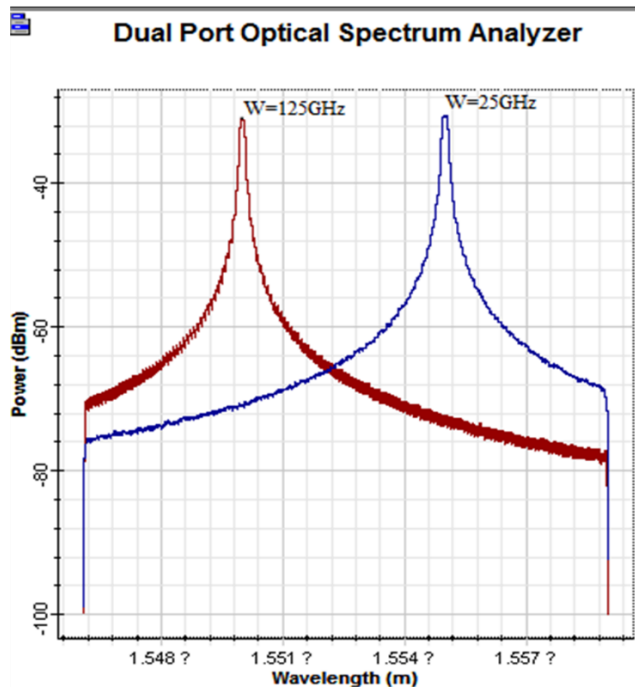
Мұндағы L_g талшықты тордың ұзындығы.

4.1 Сенсордың өткізу қабілеттілігінің сенсор характеристикасына әсері

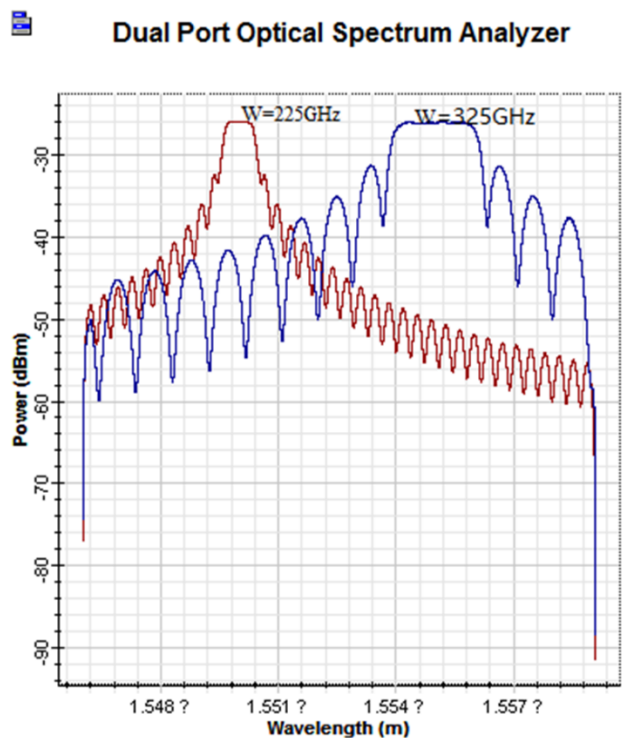
Төмен және жоғары ажырату жиілігі, бұл кезде қуат максималды қуаттың жартысына дейін азаяды, ал олардың арасындағы диапазон - сигналдың өткізу қабілеті (-3dB өткізу қабілеті) болады [28].

Модельдеу жобасы FBG сенсорінің шағылысқан жарықтың толқын ұзындығына, өткізу қабілеттілігінің өзгерісі қандай әсері болатынын бақылау үшін әр түрлі толқын ұзындығы бар екі FBG сенсорының көмегімен модельденді. Бір FBG сенсорының толқын ұзындығы 1550nm және FBG сенсорының шағылысқан жарықты өткізу қабілеті 25GHz (шамамен 0.2nm), ал басқа FBG сенсорының толқын ұзындығы 1555nm FBG сенсорының шағылысқан жарықты өткізу қабілеті 125 GHz (шамамен 1 nm). Модельденген спектр 4.1-суретте келтірілген.

4.2-суретте FBG екі сенсорының шағылысқан жарықты өткізу қабілеті сәйкесінше 225 GHz (шамамен 1.8nm) және 325 GHz (шамамен 3.6nm) дейін ұлғайтылған кездегі шағылысу спектрі көрсетілген.



4.1-сурет. Екі турлі өткізу қабілеттілігі әсеріндегі FBG сенсорінің шағылысу спектрі (25GHz және 125GHz)



4.2-сурет. Екі турлі өткізу қабілеттілігі әсеріндегі FBG сенсорінің шағылысу спектрі (225GHz және 325GHz)

Сурет-4.1 дегі спектр сипаттамасынан байқауға болады өткізу қабілеті 25GHz болғандағы FBG сенсорының шағылысу спектры, өткізу қабілеті 125GHz болғандағы шағылысу спектрына қарағанда тегіс біркелкі, оданда анық көз жеткізу үшін, өткізу қабілетін 225GHz және 325GHz етіп ұлғайтып, шағылысу спектрының тегіс біркелкі болмайтындығы байқалды, демек өткізу қабілеттілігінің жоғарылауы өлшеу дәлдігін төмендетеді, керісінше кішкентай спектрлік өткізу қабілеттілігі анағұрлым сапалы нәтиже шығарады.

4.2 Шағылыстыру коэффициентінің FBG сенсорына әсерін модельдеу және талдау

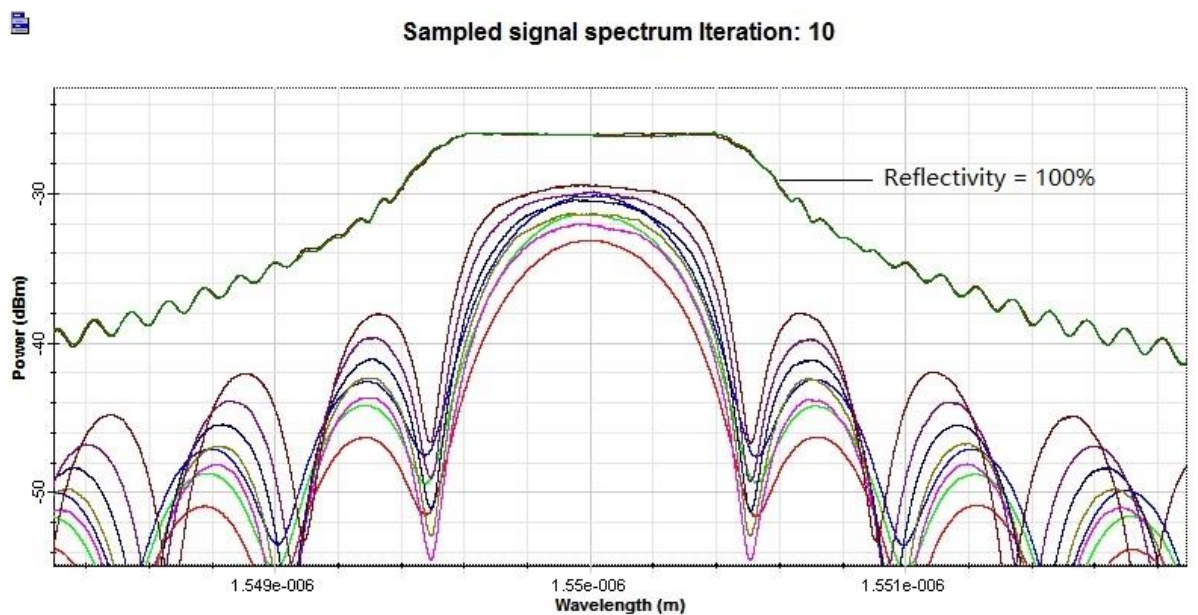
Шағылыстыру коэффициентінің FBG сенсорына әсерін модельдеу нәтижелерін интуитивті көру үшін 2 түрлі дизайында модельденді.

Бірінші дизайында FBG сенсорына 10 түрлі шағылысу коэффициенті берілді.

OptiSystem бағдарламасымен модельдеу барысында барлық FBG сенсорына берілген барлық параметрлер кесте-4 де толығымен көрсетілген. Ал модельдеу нәтижесі 4.3-суретте көрсетілген.

4-Кесте. Модельдеуге берілген параметрлер

Параметрлері	Мәні	бірлігі
Тордыңұзындығы	10	mm
Алғашқы толқын ұзындығы	1550	nm
шағылысу коэффициентінің өзгеру аумағы	0.1 – 1	
RBW	0.1	nm
Тиімді сыну коэффициенті	1.45	



4.3-сурет. Модельдеудегі шағылысу спектрі

4.4-суретте сенсордың әртүрлі 10 шағылыстыру спектрі көрсетілген (10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%), FBG сенсорының өнімділігі шағылыстың өзгеруімен өзгертінін көруге болады. Біріншіден, жоғары шағылысу жоғары қуатқа әкеледі. Басқаша айтқанда, FBG-нің шағылысу қабілеті неғұрлым жоғары болса, өлшеу жүйесіне оптикалық қуат соғұрлым көп түседі,

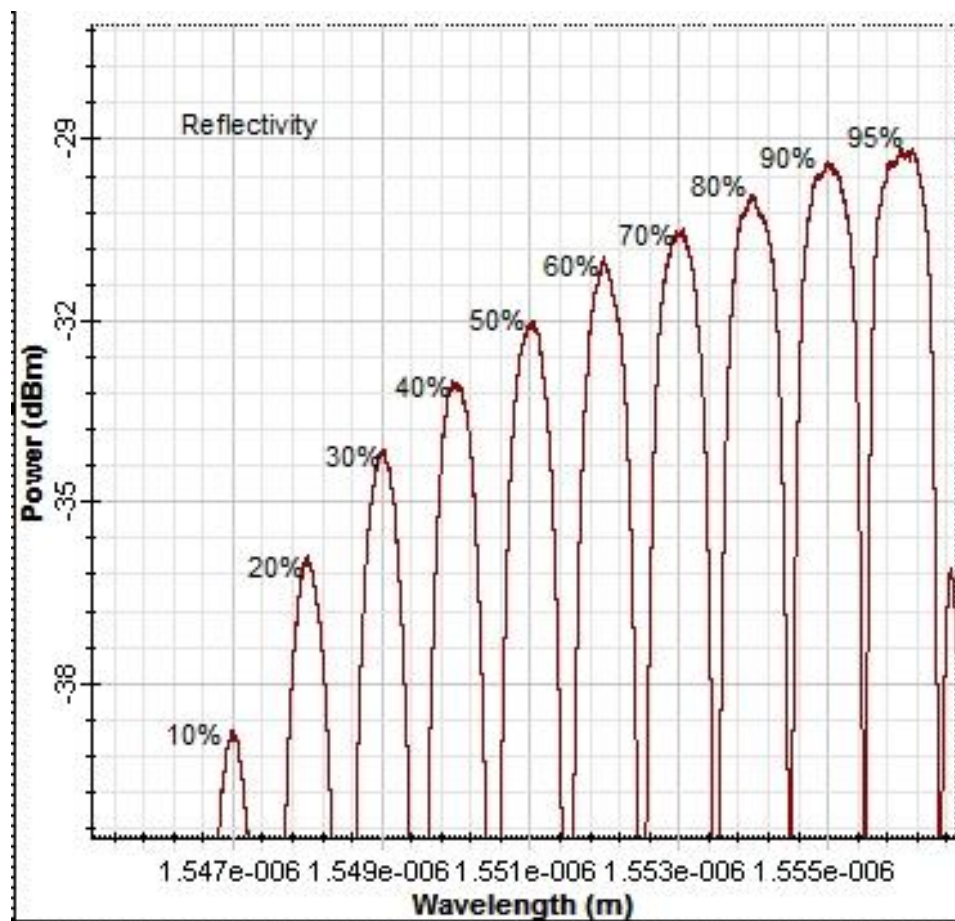
4.4-суретте FBG сенсорының 10 түрлі шығылысу коэффициентінің мәнінен (10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%) алынған шағылысу спектрі көрсетілген, көрініп тұрғандай, FBG сенсорының шағылысу спектрі шағылысу коэффициентінің өзгеруімен өзгереді. жоғары шағылыстыру жоғары оптикалық қуатын тудырады. Яғни, FBG-нің шағылысу қабілеті неғұрлым жоғары болса, өлшеу жүйесіне түсетін оптикалық қуат солғұрлым үлкен болады, осылайша өлшеу қашықтығы анағұрлым ұзағырақ , сонымен қатар оптикалық тордың жұмыс істеу қабілеті тұрақты болады.

Екінші дизайнда әр түрлі толқын ұзындығы мен шағылысу қабілеті бар 10 FBG сенсоры болды. модельдеуде қолданылған параметрлер 5-кестеде келтірілген, ал FBG сенсорының сипаттамалары 4.4- суретте көрсетілген.

5-кесте. Модельдеуге қолданылған параметрлері

FBG сенсорлары	Тор ұзындығы	тиімді сыну	шағылысу коэффициенті	Алғашқы толқын	RBW (nm)
----------------	--------------	-------------	-----------------------	----------------	----------

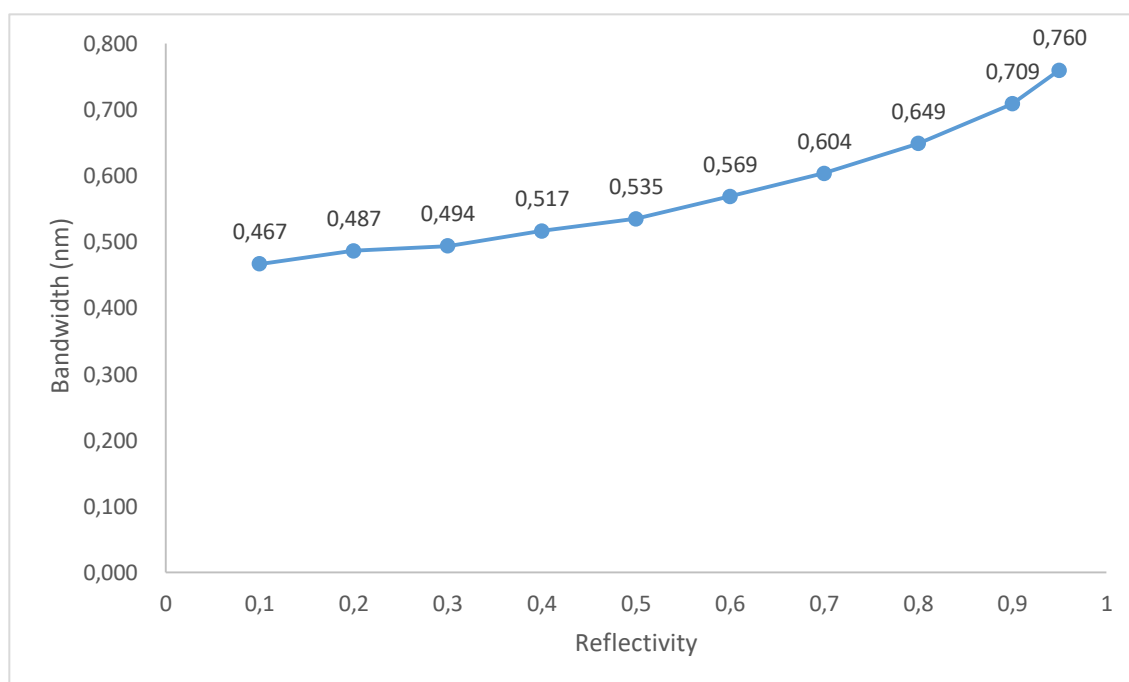
	(mm)	көрсеткіші	(%)	ұзындығы (nm)	
Сенсор 1	10	1.45	10	1547	0.1
Сенсор 2	10	1.45	20	1548	0.1
Сенсор 3	10	1.45	30	1549	0.1
Сенсор 4	10	1.45	40	1550	0.1
Сенсор 5	10	1.45	50	1551	0.1
Сенсор 6	10	1.45	60	1552	0.1
Сенсор 7	10	1.45	70	1553	0.1
Сенсор 8	10	1.45	80	1554	0.1
Сенсор 9	10	1.45	90	1555	0.1
Сенсор 10	10	1.45	95	1556	0.1



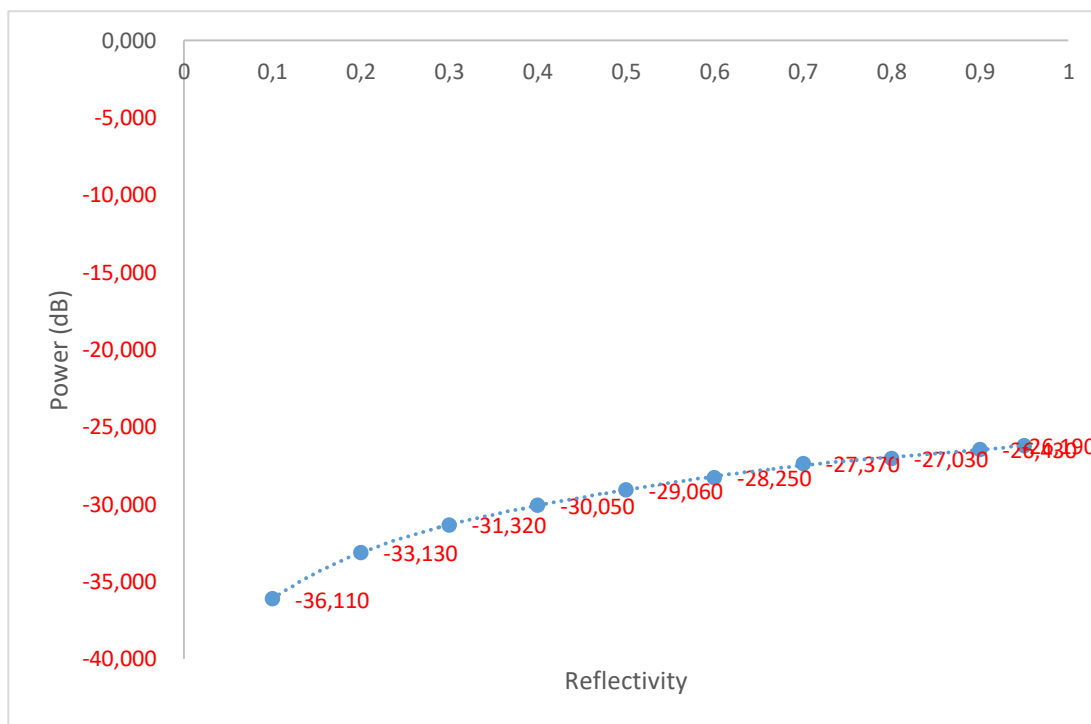
4.4-сурет. 10 түрлі шағылысу коэффициентіндегі FBG сенсорының
характеристикасы (шағылысу спектры)

4.4-суретте алғашқы толқын ұзындығы 10 түрлі болатын 10 FBG

сенсорының әр қайсысына ұқсамайтын шағылысу коэффициенті берілгендегі FBG сенсоорының шағылысу спектр сипаттамасы көрсетілген, көрініп тұрғанындай шағылысу коэффициентінің өзгеруінен FBG сенсоры характеристикасының өзгерісі айқын көрініп тұр. FBG сенсорының өткізу қабілеттілігі тордың шағылысу коэффициентінің өзгеруіне қалай әсер ететінін бақылау үшін -3dB өткізу қабілетінің өзгерісін пайдаланатын болғандықтан, модельдеудегі әр-түрлі шағылысу коэффициентінің мәні бойынша алынған -3dB өткізу қабілеттілігі сәйкесінше есептелінген, сонымен қатар сол есептелген -3dB өткізу қабілетінің мәні мен шағылысу коэффициентінің қандай байланыста екені 4.5-суретте көрсетілген, одан кейін модельдеудегі әр-түрлі шағылысу коэффициентінің мәні бойынша алынған оптикалық қуат сәйкесінше өлшенген, сосын өлшенген оптикалық қуат мәні мен шағылысу коэффициентінің қандай байланыста екені 4.6-суретте көрсетілген.



4.5-сурет. шағылысу коэффициенті мен өткізу қабілетінің байланысы



4.6-сурет. шағылысу коэффициенті мен оптикалық қуат Байланысы

4.5-суреттен анық көрінеді, 0.1 шағылысу коэффициенті жағдайында -3 dB өткізу қабілеті - 0,76 nm, шағылысу коэффициенті 0.2 кезінде өткізу қабілеті 0,709 nm дейін төмендейді. Осыдан кейін, өткізу қабілеті тағы да 0,649 nm дейін төмендеді, өйткені шағылысу коэффициенті 0.3 -ға артты. Шағылысу коэффициенті 0.4 болғанда, -3dB өткізу қабілеті 0,604 nm болды, содан кейін шағылысу коэффициенті 0,5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 және 0.95 болғанда, өткізу қабілеті сәйкесінше 0569nm, 0.535nm, 0.517nm, 0.494nm, 0.487nm және 0.467nm болды. FBG сенсорының өткізу қабілеттілігі FBG сенсорының шағылысу коэффициенті жоғарлаған сайын ұлғайды.

4.6-суретте көрініп тұрғандай, FBG сенсорының оптикалық қуаты FBG сенсорының шағылысу коэффициентінің жоғарылауымен артады. Шағылысу коэффициенті 0.1 болғанда, FBG сенсорының оптикалық қуаты -36.11dB, ал шағылысу коэффициенті 0.2 болғанда, оптикалық қуат өзгеріп 2,98dB ға дейін артады. Шағылысу коэффициенті 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 және 0.95 дейін жоғарылағанда, оптикалық қуаттың мәні сәйкесінше 1,81, 1.27, 0.99, 0.81, 0.88, 0.34, 0.6 және 0,24dB болды. Ал FBG сенсорының оптикалық қуаты, шағылысу коэффициенті 0.8 ден артқаннан кейін оптикалық қуат өзгерісі 0,24dB-ден 0,6dB аралығында сақталды, демек айтарлықтай өзгеріс

болмады.

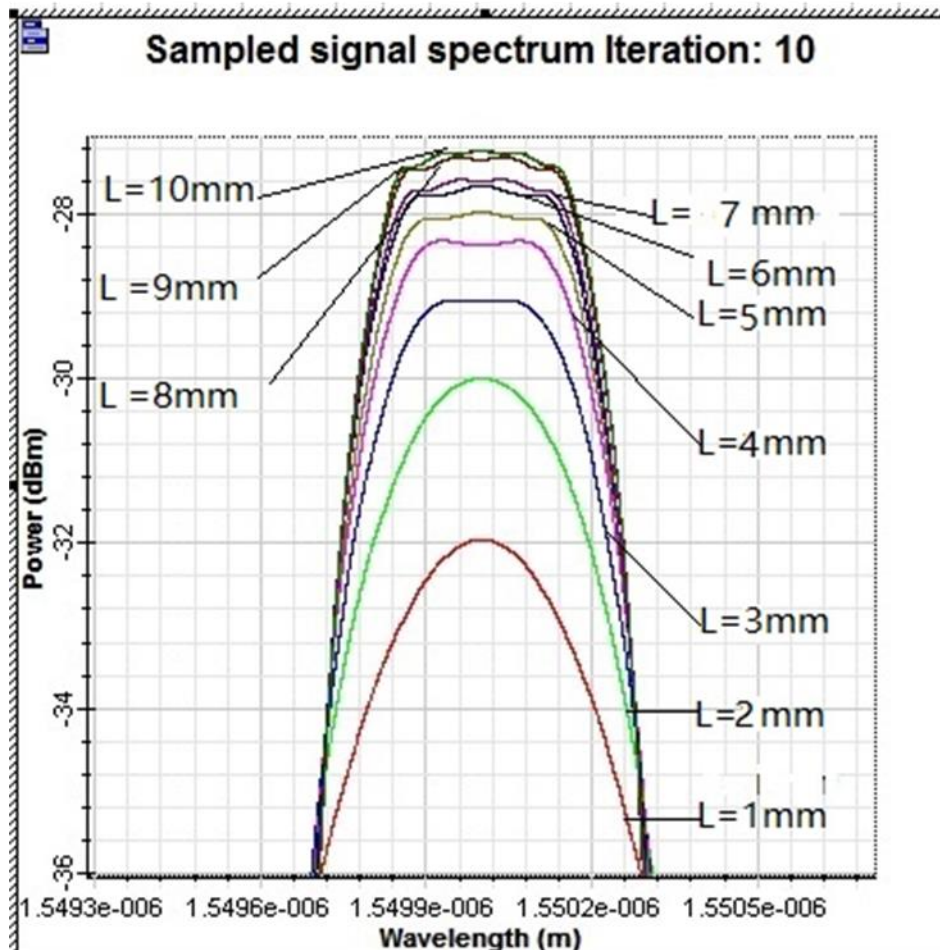
4.3 Тордың ұзындығының FBG сенсорына әсерін модельдеу және талдау

FBG-дің керемет қасиеттеріне, атап айтқанда өткір спектрлік реакциясына байланысты, FBG ді толқын ұзындығын асқан дәлдікпен басқаруды қажет ететін құрылғыларда пайдаланады, мысалы WDM де, оптикалық телекоммуникацияда, талшықты лазерлердің резонаторлары және оптикалық сенсорлардың көптеген түрлерінде қолданады. Сенсорды қолдану барысында, оның бақылау параметрлерінің кеңістік ажыратымдылығы FBG құрылғысында қалай орнатылуына байланысты болады, FBG элементі бар құрылғының жалпы ұзындығы бойынша анықталған параметрлердің орташа мәнін алатын болғандықтан, параметрлердің кеңістіктік ажыратымдылығын жақсарту үшін элементтің ұзындығы мүмкіндігінше қысқа болуы керек. Осыдан туындайтын сұрақ – FBG ді қаншалықты қысқартуға болатындығы. Бастапқыда оптикалық байланыс қосымшалары үшін жасалған FBG сенсоры 10-30mm аралығында шығарылған[29]. Ал бұл зерттеуде FBG сенсор ұзындығы 1-10mm болғанда, сенсор характеристикасының FBG ұзындығына тәуелділігін анықтау болады.

Осы бөлімде модельдеу жобасы FBG ға 10 түрлі толқын ұзындығын беру және толқын ұзындығы тұрақты түрде артып отырады, басқа барлық параметрлері кесте-6 да көрсетілген. Алынған нәтиже 4.7-суретте көрсетіледі.

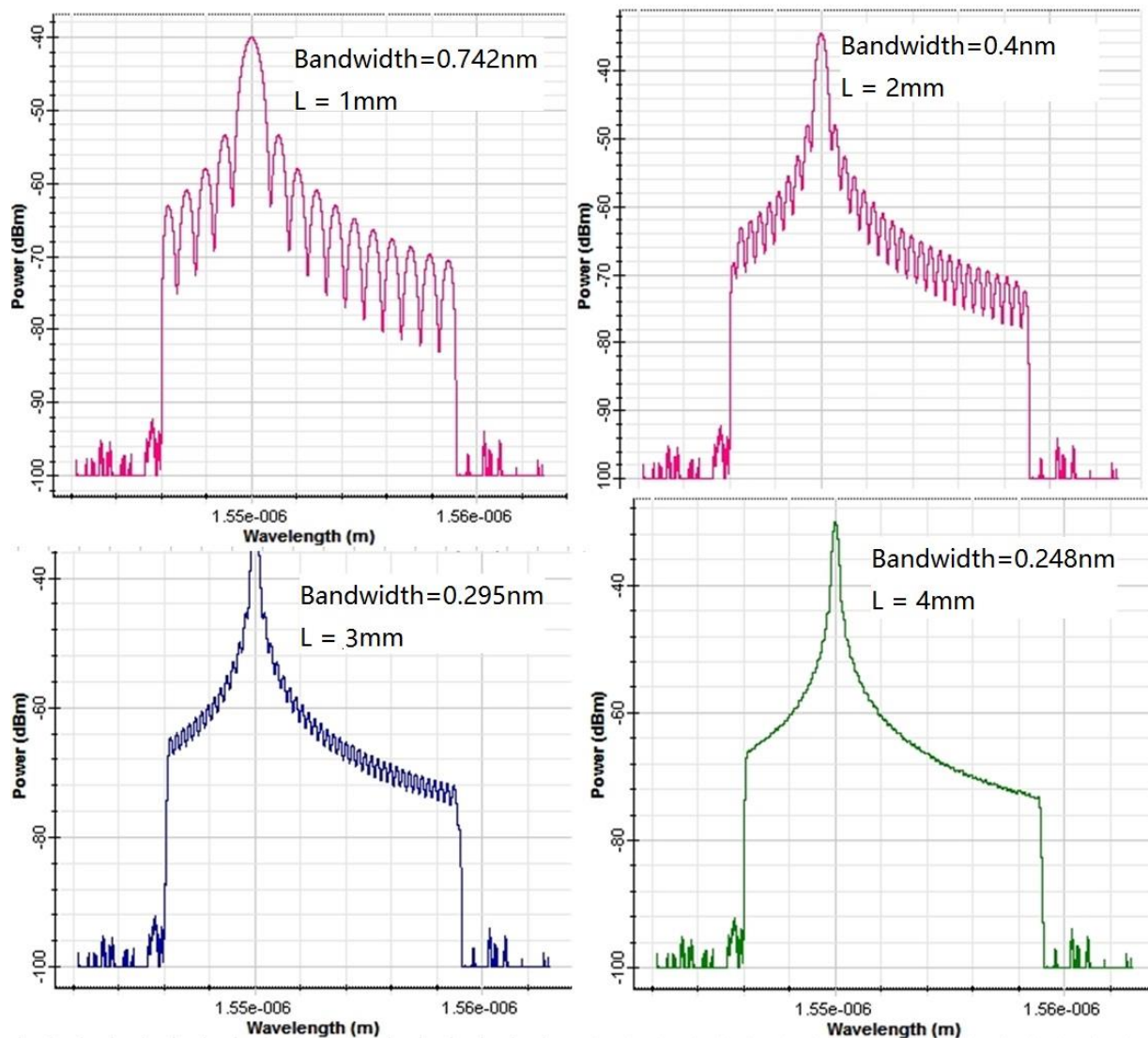
6-Кесте. Модельдеуге қолданылған Параметрлері

Параметрлер	Мәні	Бірлігі
тор ұзындығының өзгеріс аумағы	1 - 10	mm
Алғашқы толқын ұзындығы	1550	nm
шағылысу коэффициенті	0.99	
RBW	0.1	nm
тиімді сыну коэффициенті	1.45	

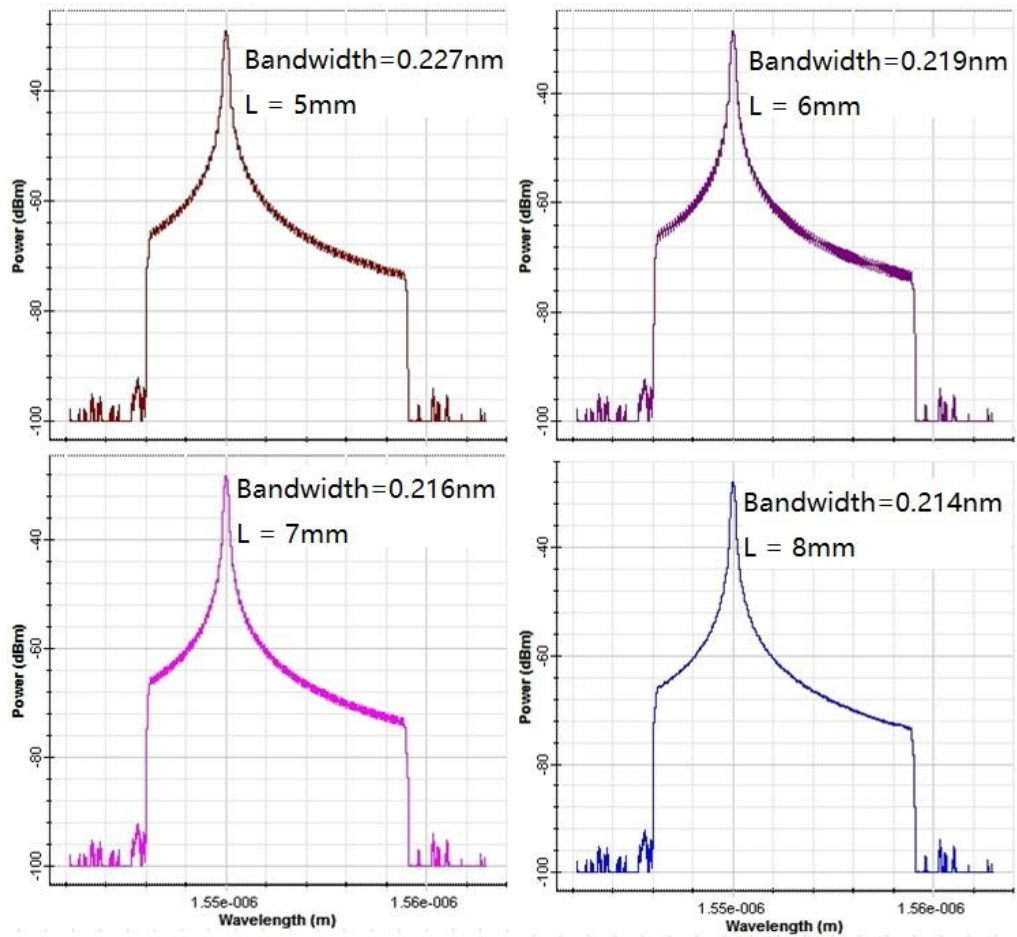


4.7-сурет. 10 түрлі тор ұзындығындағы FBG сенсорының шағылысу спектры

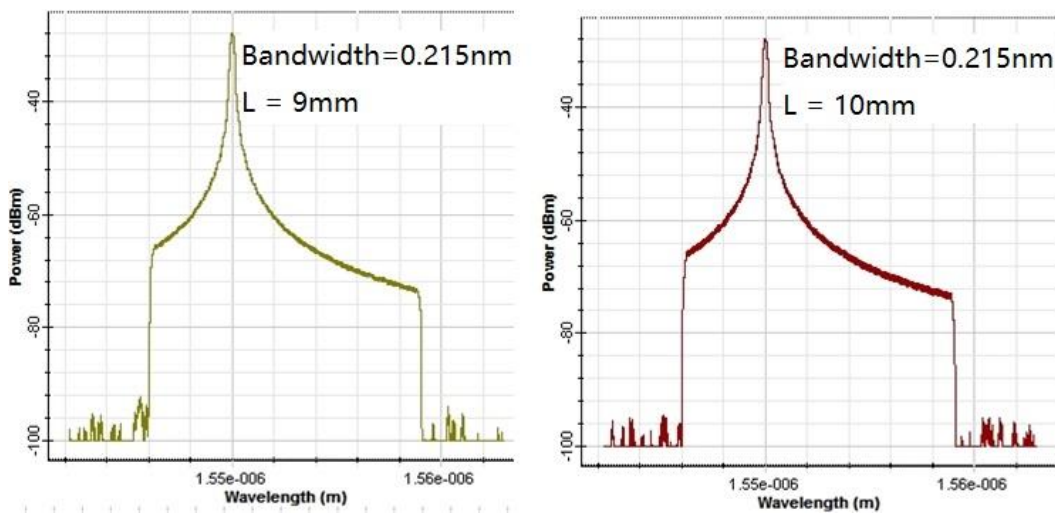
4.7-суретте , тордың ұзындығы 1mm, 2mm, 3mm, 4mm, 5mm, 6mm, 7mm, 8mm, 9mm және 10mm болғандағы FBG сенсорының шығылысу спектры көрсетілген, көрініп тұрғанындай тор ұзындығы артқан сайын шағылысқан жарық қуаты артты, бірақ жарық қуатының арту мөлшері азаюда. Сенсордың өткізу қабілетін тордың ұзындығының өзгерісіне қандай реакция олатынын анағұрлым анық көру үшін тағыда әр-түрлі тор ұзындығындағы кезіндегі модельді жеке-жеке 4.8, 4.9 және 4.10-суретте көрсетілген,



4.8-сурет. 1-4mm тор ұзындығындағы кезіндегі FBG сенсорының шағылысу спектры



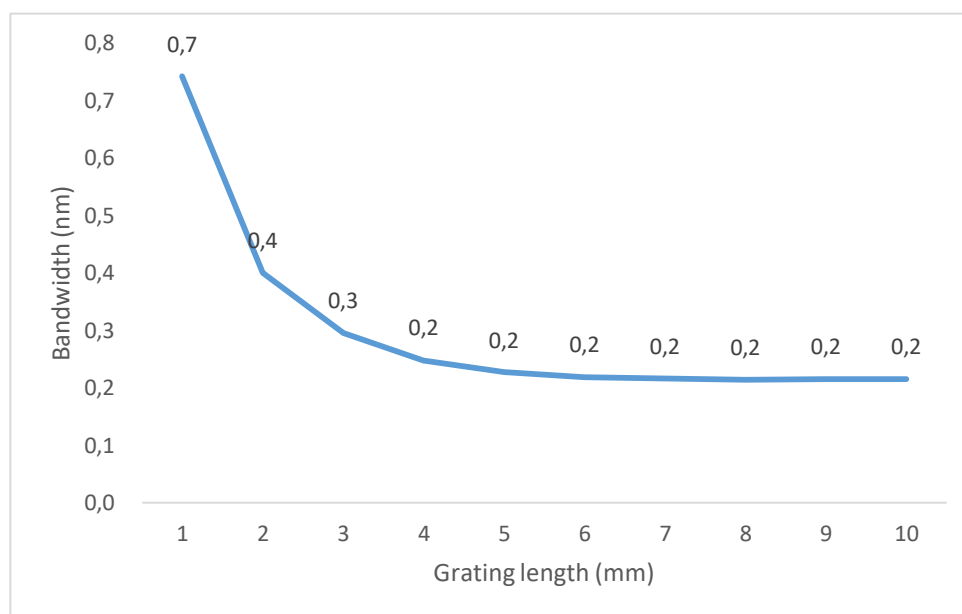
4.9-сурет. 5-8mm тор ұзындығындағы кезіндегі FBG сенсорының шағылысу спектры



4.10-сурет. 9mm және 10mm тор ұзындығындағы кезіндегі FBG сенсорының шағылысу спектры

Жоғарғы 3 суретте, әр-түрлі тор ұзындығы бойынша модельдеуден алынған FBG сенсорының өткізу қабілетінің мәні көрсетілген. Тордың ұзындығы 1 nm болған кезде, өткізу қабілеті 0,742 nm, содан кейін тордың ұзындығы 2 nm болғанда өткізу қабілеті 0,4nm дейін төмендейтіні байқалды, бұл өткізу қабілетінің өте үлкен төмендеуін көрсетеді, сенсордың оптикалық тор ұзындығы 3 nm болғанда өткізу қабілеті айтарлықтай төмендейтінін көруге болады. Сонымен қатар, тордың ұзындығы 4 nm-ге дейін ұлғайтылған кезде өткізу қабілеті біршама төмендейді, ал тордың ұзындығы 5 nm-ден 6 nm-ге дейін жоғарылағанда, өткізу қабілеті аздап төмендейді, тордың ұзындығы 7 nm-ге жеткеннен кейін өткізу қабілеті негізіен тұрақты болып қалды. Осылайша FBG сенсорының оптикалық тор ұзындығы мен өткізгіш қабілетінің байланыс диаграммасы 4.11-суретте көрсетілген.

Сонымен қатар, оптикалық тордың ұзындығы 3 nm-ден аз болған кезде, модельдеу сынағының нәтижелері нақтылықты едәуір жоғалтатындығын көруге болады: тордың ұзындығы ұлғайған сайын сынақтың дәлдігі артады, бірақ тордың ұзындығы 7 nm-ден 10 nm-ге дейін болған кезде модельдеу нәтижесінің дәлдігі көп өзгерген жоқ.



4.11-сурет. FBG сенсорының оптикалық тор ұзындығы мен өткізгіш қабілетінің байланысы

Осылайша модельдеу нәтижелері мен талдаудан келесідей қорытынды алуға болады:

Тордың ұзындығы қысқарған сайын сенсордың шағылған жарық қуаты кішірейіп, өлшеу дәлдігі төмендейді бірақ өткізу қабілеті үлкейеді. Сонымен қатар, тордың ұзындығы 7 nm-ден 10 nm-ге дейін өзгерген кезде, шағылысқан жарық қуаты, сынақ дәлдігі және өткізу қабілеттілігі барлығы аз ғана өзгерістерді көрсетеді, яғни FBG сенсорының характеристикасы тұрақты болады.

4.4 Сыну коэффициентінің FBG сенсорына әсерін модельдеу және талдау

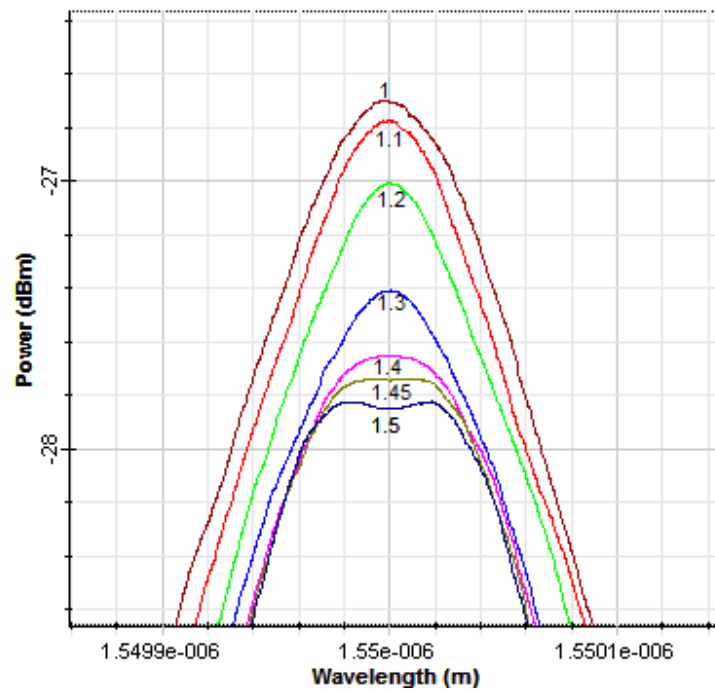
Оптикалық тор коэффициентінің оптикалық тордың жұмысына әсерін зерттеу үшін, 7 түрлі мәндегі(1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.45 және 1.5) сыну коэффициентіне ие сенсорды модельдеу арқылы жүргізіледі. Модельдеуге арналған параметрлер кесте-7 де көрсетілген. OptiSystem дегі әр-түрлі сыну коэффициентінен алынған сенсор шағылысу спектры 4.12-суретте, трансмиссия спектры 4.13-суретте, ал жарық қуаты мен сыну коэффициентінің байланысы 4.14 де көрсетілген.

7-Кесте. Модельдеуге қолданылған Параметрлері

Параметрлер	Мәні	Бірлігі
тор ұзындығы	10	nm
Алғашқы толқын ұзындығы	1550	nm
шағылысу коэффициенті	0.99	
RBW	0.1	nm
сыну коэффициентінің өзгеріс аумағы	1-1.5	



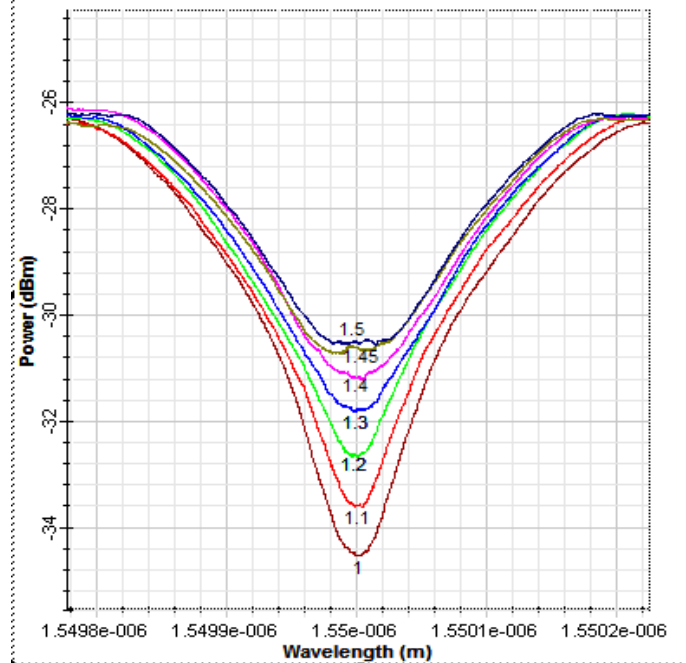
Sampled signal spectrum Iteration: 7



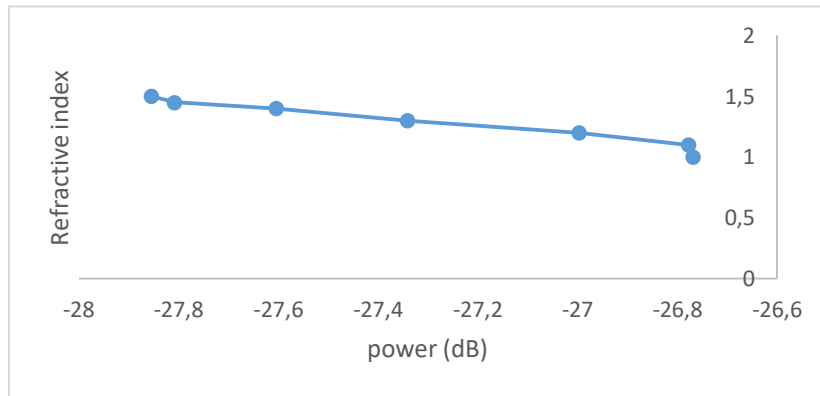
4.12- сурет. шағылысу спектры



Sampled signal spectrum Iteration: 7



4.13- сурет. трансмиссия спектры



4.14-сурет. жарық қуаты мен сыну коэффициентінің байланыс диаграммасы

Модельдеу нәтижесіне қарағанда оптикалық тордың сыну коэффициентіне өзгеріс болған, FBG сенсорының спектрлық характеристикасында өзгерістер пайда болады, сыну коэффициентінің үлкеюіне байланысты жарықтың қуаты азаяды, тордың өткізу қуаты да азаяды.

4.5 FBG сенсорының толқын ұзындығының интервалы есептеу

FBG толқын ұзындығының интервалы дегеніміз – 2 FBG толқын ұзындығын аламыз, 1-толқын ұзындығы – λ_1 , 2-толқын ұзындығы λ_2 . Толқын ұзындығының интервалы d болады:

$$d = \lambda_2 - \lambda_1 \quad (24)$$

FBG сенсорының массиві көптеген оптикалық торды қамтитын болғандықтан, әр-бір торға берілген толқын ұзындығы өзара пайда болған толқын ұзындықтары бір-бірімен қабаттасбауы тиіс, сол үшін практикада қолдануда толқын ұзындығы интервалын анықтап алу керек. Ал қатарлас тұрған 2 оптикалық торда, бірінің ең үлкен толқын ұзындығы мен екіншісінің ең кіші толқын ұзындығы өзара айқасбауы үшін арасына буфер(Buffer) аралық болуы керек. Әдетте FBG сенсор өндірушілерінің көрсететін толқын ұзындығының мәнінде +/- 0.1nm айырмашылық болады, бұл сенсор интервалын есептеуде міндетті түрде қарастырылуы керек, одан бөлек FBG сенсорын механикалық кернеу өлшеуі кезінде, әр сенсор қойылған ортаның температурасының өзгерісін де ойластыру керек. Мысалы Нұр-Сұлтан қаласында FBG сенсорын пайдалануға сенсорлар интервалының мәнін алу үшін келесі 8- кестедегі факторлар ескеріледі.

8-Кесте. Ескеруге қажетті факторлар және мәні

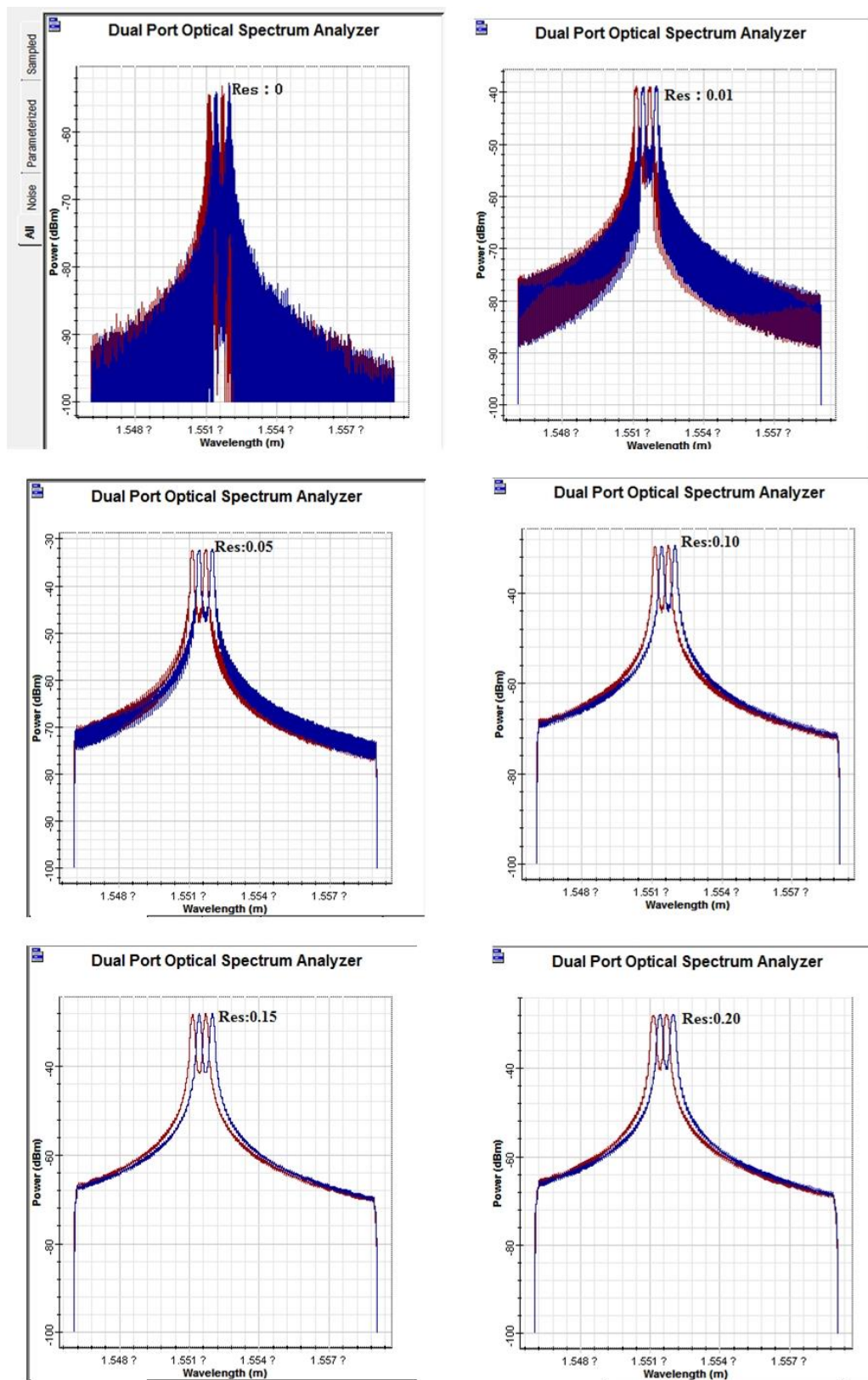
параметр	Өлшеу аумағы	Сезімталдығы	Толқын ұзындығы өзгеру аумағы
Механикалық кернеу	2000μξ	1.226pm/μξ	2.452nm
температура	110 °C	14.2pm/°C	1.54nm
Сенсор буфері			0.5nm
Сенсор абсолют қате (+/-0.1)			0.2nm
ең кіші толқын ұзындық интервалы			4.692nm.

Кестедегі температура Нұр-Сұлтан қаласының тарихтағы ең төмен -52 °C (бұл жерде 60 °C деп аламыз) және ең жоғары температура 50 °C, 3.3.3-бөлімде келтірілген жобадағы толқын ұзындығының ығысуы механикалық кернеуге сезімталдығы 1.226pm/μξ, ал 2.2 бөлімде келтірілген жоба бойынша температура сезімталдығы 14.2pm/°C, сонымен Нұр-Сұлтан қаласында FBG сенсорын пайдалануға сенсорлар интервалының мәні шамамен 4.7nm болды.

4.6 Өлшеу инструментінің FBG сенсорының өлшеу нәтижесіне келтіретін әсерін модельдеу және талқылау

FBG сенсорын практикада пайдалану кезіндегі өлшеу дәлдігіне өлшеу құралы және оны қолданушы операторлардың кәсібилігін ескеру қажет болады[30]. Осы бөлімде өлшеу инструментінің RBW(Resolution bandwidth, Разрешение полосы пропускания) FBG сенсорының өлшеу нәтижесіне әсері модельденді және талдау жасалады. Модельдеуде OptiSystem бағдарламасындағы қос портты оптикалық спектр анализаторы(dual port optical spectrum analyzer) қолданылады.

Модельдеу конструкциясы бірдей параметрлері бар екі FBG сенсорын қолданады. Модельдеу нәтижелерін бақылау кезінде оптикалық спектр анализаторына әртүрлі RBW мәні беріледі, нәтижелері 4.15-суретте көрсетілген.



4.15-сурет. Спектр анализаторының әр-түрлі RBW мәніндегі FBG сенсордің шағылысу спектры

Суреттен көруге болады, спектр анализаторына әр-түрлі RBW мәнін

бергенде, FBG сенсорының шағылысу спектрына өлшеу дәлдігі біршама өзгеріске ұшырады, осы модельдеуде FBG сенсорына берілген өткізу қабілетінің мәні 125GHz(0.2nm) болғандықтан, спектр анализатордың RBW мәні 0.1nm ден жоғары болғанда ғана ойдағыдай сенімді нәтиже алуға болатыны көрдік, демек FBG сенсорын әр-түрлі салада қолданғанда күтілген нәтижеге жету үшін өлшеу инструментіде дұрыс қолдана білу маңызды рол атқарады.

4.7 Бөлім бойынша қортынды

Бұл тараудағы FBG сенсорының өзіндік параметрі FBG сенсорының характеристикасына келтіретін әсерін модельдеу нәтижесіне қарағанда, мұндай тұжырымдар алуға болады, олар:

1. FBG сенсорының өткізу қабілеттілігінің жоғарылауы өлшеу дәлдігін төмендетеді, керісінше кішкентай спектрлік өткізу қабілеттілігі анағұрлым сапалы нәтиже шығарады;

2. FBG сенсорының шағылыстыру қабілеті неғұрлым жоғары болса, одан шағылысқан жарықтың қуаты солғұрлым үлкен болады, осылайша өлшеу қашықтығы анағұрлым ұзағырақ, сонымен қатар оптикалық тордың жұмыс тұрақтылығы жақсы болады;

3. FBG сенсорының өткізу қабілеттілігі FBG сенсорының шағылысу коэффициенті жоғарлаған сайын төмендейді;

4. Тордың ұзындығы қысқарған сайын сенсордың шағылған жарық қуаты кішірейіп, өлшеу дәлдігі төмендейді, бірақ өткізу қабілеті үлкейеді, Сонымен қатар, тордың ұзындығы 7 nm-ден 10 nm-ге дейін өзгерген кезде, шағылысқан жарық қуаты, сынақ дәлдігі және өткізу қабілеттілігі барлығы аз ғана өзгерістерді көрсетеді, яғни FBG сенсорының характеристикасы тұрақты болады;

5. Оптикалық тордың сыну коэффициентінің үлкеюіне байланысты жарықтың қуаты азаяды, тордың өткізу қабілеті де азаяды;

6. FBG сенсорын құрылыста температура мен деформацияны бақылауға қолдануда, Нұр-Сұлтан қаласы ауа-райы факторлары ескеріле отырып, FBG сенсор массивінің толқын ұзындығының интервалы нақты модельдеу арқылы 4.7nm болатыны анықталды.

Соңында өлшеу инструментінің FBG сенсорының өлшеу нәтижесінің дәлдігіне қандай әсері болатынын қысқаша модельдеу және талдау жасау арқылы FBG сенсорымен жоғары сапада нәтиже алу үшін тек FBG сенсорының дизайндалуы ғана емес өлшеу аппараты мен қолданушының кәсіби

біліктілігі маңызды рол атқаратындығын қортындыладық.

ҚОРТЫНДЫ

Диссертациялық жұмыста FBG технологиясың теориялық негіздері мен ол туралы формулалар қаралды, FBG технологияның қазіргі даму жадайлары мен болашағы, даму бағыты мен әлемде болып жатқан жетістіктер және оның құрылымын көптеген ғылыми еңбектерді қарау арқылы шолулар жасалды. FBG сенсорының температурмен байланысы және механикалық кернеумен байланысын модельдеу арқылы нақты байланыс диаграммасы алынды, FBG сенсорын практикада яғни құрылыс немесе басқада орындарда қолдануда дәлдігін арттыру үшін әсер ететін факторлар нақты көрсетілді, қолдануда кездесетін кросс-сезімталдық мәселесін шешуге арналған температураны компенсациялау теориясы негізінде нақты жоба ұсынылып және жобаның дұрыстығы мен жарамдылығы модельдеу арқылы дәлелденді. FBG сенсор параметрінің өзгерісі талдау және модельдеу арқылы сенсордың өткізу қабілеті, оптикалық тордың ұзындығы, сыну коэффициенті мен шағылысу коэффициенті, шағылысу спектрының жарық қуаты, өлшеу дәлдігі, өлшеу көлемі және сенсордың өлшеу қашықтығына беретін ықпалы көрсетілді, сонымен қоса модельдеу арқылы өзара әсерлерінің диаграммасы берілді. осылайша кіріспеде алға қойған мақсаттар толығымен орындалды.

Қортынды бойынша келесідей ғылыми тұжырымдар мыналар:

- 1) Температураның өзгерісімен толқын ұзындығының ығысуы сызықты байланыста болады және температураға сезімталдығы $14.2 \text{ pm}/^\circ\text{C}$;
- 2) Механикалық кернеу толқын ұзындығының ығысуымен сызықтық байланыста болады және механикалық кернеуге сезімталдығы $1.226 \text{ pm}/\mu\text{g}$;
- 3) FBG сенсорының кросс-сезімталдық мәселесін шешуге арналған температура компенсациялау әдісі негізіндегі шешу жобасы ұсынылды және дәлелденді;
- 4) FBG сенсорының өлшеу қашықтығы ұзақ болуы үшін жоғары шағылысу коэффициентін талап етеді;
- 5) Жоғары дәлдікте FBG сенсорын дизайндауға аз өткізу қабілеті, қысқа оптикалық тор ұзындығы және төмен сыну коэффициенті талап етіледі.
- 6) Шағылысу коэффициенті жоғарлаған сайын өткізу қабілеті кішірейеді, демек тор тұрақты жұмыс істейді;
- 7) Тордың ұзындығы қысқарған сайын сенсордың шағылған жарық қуаты кішірейіп, өлшеу дәлдігі төмендейді, бірақ өткізу қабілеті үлкейеді, Сонымен қатар, тордың ұзындығы 7 nm-ден 10 nm-ге дейін өзгерген кезде, шағылысқан жарық қуаты, сынақ дәлдігі және өткізу қабілеттілігі барлығы аз

ғана өзгерістерді көрсетеді, яғни FBG сенсорының характеристикасы тұрақты болады;

8) Қолданыста FBG сенсор массивінің толқын ұзындығының интервалы нақты модельдеу арқылы 4.7nm болатыны анықталды.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] Yariv, A. (1973) A Coupled-Mode Theory for Guided-Wave Optics. IEEE Journal of Quantum Electronics, 9, 919-993.
- [2] Kogelnik, H. (1976) Filter Response of Nonuniform Almost-Periodic Structures. Applied Optics, 55, 109-126.
- [3] Чжан Донгшен. Талшықты тордың спектрлік формасы және оны зерттеу, кандидаттық диссертация, Тяньцзинь: Нанкай университеті, 2001.
- [4] Du Ge, Liu Weiping, Liao Changjun, et al. Research on the measurement of the spectral characteristics of fiber gratings [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2001, 44 (8): 253-255.
- [5] Moery, W.W., Meltz, G. and Glenn, W.H. (1989) Fiber Optical Bragg Grating Sensors. SPIE, 1169, 98-107.
- [6] Fuhr, P. L. and Spammer, S., “Fiber optic sensors in the Waterbury bridge,” Proceedings of SPIE 3489, 124– 129 (1998). Proc. of SPIE Vol. 6932 69320D-8
- [7] Li, H. N., Li, D. S. and Song, G. B., “Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering,” Engineering Structures 26, 1647–1657 (2004).
- [8] Hu, Y. H. and Yang, Y. W., “Wave propagation modeling of PZT sensing region for structural health monitoring,” Smart Materials and Structures 16(3), 706-716 (2007).
- [9] Yang, Y. W., Xu, J. F. and Soh, C. K., “Generic impedance-based model for structure-piezoceramic interacting system,” Journal of Aerospace Engineering 18(2), 93-101 (2005).
- [10] Teral, S. R., “Fiber optic weigh-in-motion: looking back and ahead,” Proceedings of SPIE 3326, 129–137 (1998).
- [11] T. Erdogan and J. Light wave, “Fiber Grating Spectra,” Journal of Light wave Technology, Vol. 15, No. 8, 1997, pg. 1277
- [12] <https://www.hotbak.net/key/BD%91.html>
- [13] C. Y. Lin, L. A. Wang, and G. W. Chern. Corrugated long-period fiber grating as strain, torsion, and bending sensors, Journal of Lightwave Technology. 2001, pg. 27-28.
- [14] Кусамбаева Н.Ш., Касимов А.О., Влияние аподизации сменно периодической брэгговской решетки на поляризационно-модовую дисперсию* Новости науки Казахстана. № 1 (135). 2018
- [15] Morris, Alan S.; Langari, Reza (2012). Measurement and Instrumentation. London, UK: Elsevier Inc. p. 325.

[16].Ағатаева Б.Б., Елизарова Е.Ю., Шахматова Г.А. Телекоммуникациядағы оптикалық байланыс жүйелері. 050719- Радиотехника, электроника және телекоммуникация мамандығының барлық оқу түрінің студенттеріне арналған дәрістер жинағы. - Алматы: АЭЖБИ, 2009.- 55б, 1-б.

[17] <https://optiwave.com/OptiSystem-overview/>

[18] <https://www.mathworks.com/products/connections>

[19] <https://www.researchgate.net/figure/>

[20] LIN Jia-wen , XIE Xiao-gang , TAO Ying-xue , CAI Jun, Expansion of Adaptive Optics Simulation Modeling on SciSimu, Computer Engineering, vol.35, No.7, pg 239-241, 2009.

[21] M. Bidarvatan and M. Shahbakhti, "Integrated HCCI engine control based on a performance index", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 136, pp. 10:101601, 2014.

[22] K. Jiang, E. Cao and L. Wei, "NO_x sensor ammonia crosssensitivity estimation with adaptive unscented Kalman filter for Diesel-engine selective catalytic reduction systems ", Fuel, vol. 165, pp. 185-192, 2016.

[23] Zhang H and J. Wang, "NO_x sensor ammonia-crosssensitivity factor estimation in diesel engine selective catalytic reduction systems", Trans ASME J Dyn Syst Meas Contr, vol. 137, pp. 6: 061015, 2015.

[24] G. Woyessa, A. Fasano, C. Markos, A. Stefani, H. K. Rasmussen and O. Bang, "Zeonex microstructured polymer optical fiber: Fabrication friendly fibers for high temperature and humidity insensitive Bragg grating sensing", Opt. Mater. Express, vol. 7, no. 1, pp. 286-395, 2017.

[25] Y. Luo et al., "Analysis of multimode POF gratings in stress and strain sensing applications", Opt. Fiber Technol., vol. 17, no. 3, pp. 201-209, 2011.

[26] Ibrahim, S.K., Van Roosbroeck, J., O'Dowd, J., Van Hoe, B., Lindner, E., Vlekken, J., Farnan, M., Karabacak, D.M., Singer, J.M., "Interrogation and mitigation of polarization effects for standard and birefringent FBGs," SPIE Commercial+Scientific Sensing and Imaging, Fiber Optic Sensors and Applications XIII, 98520H, (2016).

[27] Karabacak, D.M., Ibrahim, S.K., Koumans, Y., Farnan, M., Knoppers, R., Singer, J.M., "High-speed system for FBG-based measurements of vibrations and sound," SPIE Commercial + Scientific Sensing and Imaging, Fiber Optic Sensors and Applications XIII, 98520I, (2016)

-3dbdaikuan

[28] <https://www.everythingrf.com/community/what-is-3-db-bandwidth-in-a-filter>

[29] Kersey, A. D., "Optical fiber sensors for permanent down well monitoring

applications in the oil and gas industry,” IEICE Transactions on Electron E83-C (3), 400–404, 2000.

[30] http://www.tricombj.com/chinese/jsyfw/choose_fbg.pdf

[31] Jaw Luen Tang, Jian Neng Wang, Error Analysis and Measurement Uncertainty for a Fiber Grating Strain-Temperature Sensor, *Sensors* 2010, 10, Pg 6582-6593.

[32] Hill, K.O.; Fujii, Y.; Johnson, D. C.; Kawasaki, B. S. (1978). "Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection fiber fabrication". *Appl. Phys. Lett.* 32 (10): 647.

[33] Jin W, Ho H L, Liao Y B, et al. Development of a wavelength detection system for fiber grating sensors. *Advanced sensor systems and application [C]. proc of SPIE*, 2004:68-76

[34] SW James, ML Dockney, RP Tatam, Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fiber Bragg grating sensors [J]. *Electron. Lett.*, 1996.

[35] M. Werneck, R. Allil, B. Ribeiro and F. de Nazaré, “A Guide to Fiber Bragg Grating Sensors”, *Intec open science*: <http://dx.doi.org/10.5772/54682>, 2013.

[36] Shun Lien Chuang, “Physics of Photonic Devices”, Section 8.5, 2nd ed., Wiley, 2009.

[37] Moery, W.W., Meltz, G. and Glenn, W.H. *Fiber Optical Bragg Grating Sensors*. SPIE, 1169, 98-107,1989.

[38] Gafsi, R. and El-Sherif, M.A. Analysis of Induced Birefringence Effects on FBG. *Optical Fiber Technology*, 6, 229-322,2000.

[39] Bosia, F., Botsisa, J., Facchinia, M., et al. Deformation Characteristics of Composite Laminates Part I: Speckle Interferometry and Embedded Bragg Grating Sensor Measurement. *Composite science and Technology*, 62, 41-54, 2002.

[40] Zhao, J. X., Zhang, X., Huang, Y. Q., et al. Experimental Analysis of Birefringence Effects on Fiber Bragg Gratings Induced by Lateral Compression. *Optical Communacations*, 229, 203-207,2002.

[41] Davis, M.A., Bellemore, D.G. and Kersey, A.D. Distributed Fiber Bragg Grating Strain Sensing in Reinforced Concrete Structure Components. *Cenment and Concrete Components*, 19, 45-57,2001.

[42] Moyo, P., Brown, J.M.W., Suresh, R., et al. Development of Fiber Bragg Grating Sensors for Monitoring Civil Infrastructure. *Engineering Structure*, 27, 1828-1834,2005.

[43] Jiang, S., Wang, J., Sui, Q., et al. Same Origin Three-Dimensional Strain Detection FBG Sensor Based on El-iptical Ring and Its Optimization. *Photonic Sensors*, 5, 146-151,2015.

[44] Chang, L.-W., Lee, C.-T. and Chen, P.-Y. (1998) Displacement Measurement by

- Synthesized Light Source Based on Fiber Bragg Grating. *Optical Communication*, 154, 261-267,1998.
- [45] Ho, Y.T., Huang, A.B. and Lee, J.T. Development of a Fiber Bragg Grating Sensor Ground Movement Monitoring System. *Measurement Science and Technology*, 17, 1733-1740,2006.
- [46] Bao, H., Dong, X., Shao, L., et al. Temperature-Insensitive 2-D Tilt Sensor by Incorporating Fiber Bragg Gratings with a Hybrid Pendulum. *Optics Communications*, 283, 2021-5024,2001.
- [47] Bao, H., Dong, X., Zhao, C., et al. (2010) Temperature-Insensitive FBG Tilt Sensor with a Large Measurement Range. *Optics Communications*, 283, 968-970.,2010.
- [48] Guo, C., Chen, D., Shen, C., et al. Optical Inclinometer Based on a Tilted Fiber Bragg Grating with a Fused Taper. *Optical Fiber Technology*, 24, 30-33,2015.
- [49] Enriquezn, D.A.C., da Cruz, A.R., et al. Hybrid FBG-LPG Sensor for Surrounding Refractive Index and Temperature Simultaneous Discrimination. *Optics and Lasers Technology*, 44, 981-986,2012
- [50] Rajan, G., Noor, Y.M., Liu, B., et al. A Fast Response Intrinsic Humidity Sensor Based on an Etched Single Mode Polymer Fiber Bragg Grating. *Sensors and Actuators A*, 203, 107-111,2013.
- [51] Liu, H., Or, S.W. and Tam, H.Y. Magneto tractive Composite-Fiber Bragg Grating (MC-FBG) Magnetic Field Sensor. *Sensors and Actuators A*, 173, 122-126,2012.
- [51] Kersey, A.D. and Dandridge, A. Low Crosstalk Code Division Multiplexing Interferometric Array. *Electronic Letters*, 28, 351-352,1992.
- [52] Davis, M.A., Bellemore, D.G. and Kersey, A.D. Structure Strain Mapping Using a Wavelength/Time Division Addressed Fiber Bragg Grating Array. 2nd European Conference on Smart Structures and Materials, Glasgow, 12-14 October 1994, 342-345,1994.
- [53] Weis, R.S. and Kersey, A.D. A Four-Element Fiber Grating Sensor Array with Phase-Sensitive Detection. *Photonics Technology Letters*, 6, 1469-147,2001.
- [54] Chan, C.C., Jin, W., Ho, H.L., et al. Performance Analysis of a Time-Division-Multiplexed Fiber Bragg Grating Array by Use of a Tunable Laser Source. *Quantum Electronics*, 6, 741-749,2000.
- [55] Dong, B., He, S., Hu, S.Y., et al. Time-Division Multiplexing Fiber Grating Sensor with a Tunable Laser. *Photonics Technology Letters*, 18, 2620-2624,206.
- [56] Velente, L.C.G., Braga, A.M.B., Ribeiro, A.S., et al. Time and Wavelength Multiplexing of Fiber Bragg Grating Sensors Using a Commercial OTDR. 15th

Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 151-154. Portland, 10 May 2002.

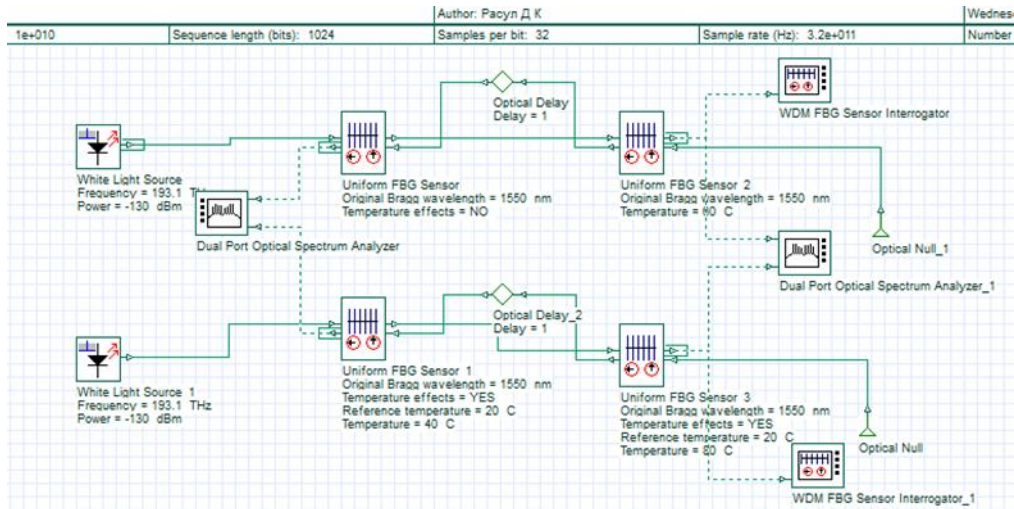
[57] Wang, Y.M., Gong, J.M., Wang, D.Y., et al. A Quasi-Distributed Sensing Network with Time-Division-Multiplexing Fiber Bragg Gratings. *Photonics Technology Letters*, 23, 70-72,2011.

[58] Yao, Y.J., Kalli, K. and Brady, G. Spatially Multiplexed Fiber-Optic Bragg Grating Strain and Temperature Sensor System Based on Interferometric Wavelength-Shift Detection. *Electronics Letters*, 31, 1099-1100.,1995.

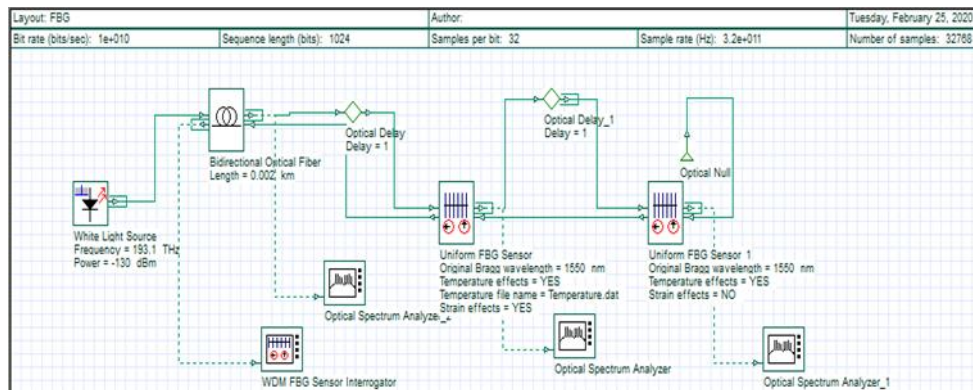
[59] Yao, R.J., Ribeiro, A.B.L., Jackson, D.A., et al. Simultaneous Spatial, Time and Wavelength Division Multiplexed In-Fiber Grating Sensing Network. *Optical Communications*, 125, 53-58,1996.

[60] Gao, H., Li, H., Liu, B., et al. A Novel Fiber Bragg Grating Sensors Multiplexing Technique. *Optics Communications*, 251, 361-366,2005.

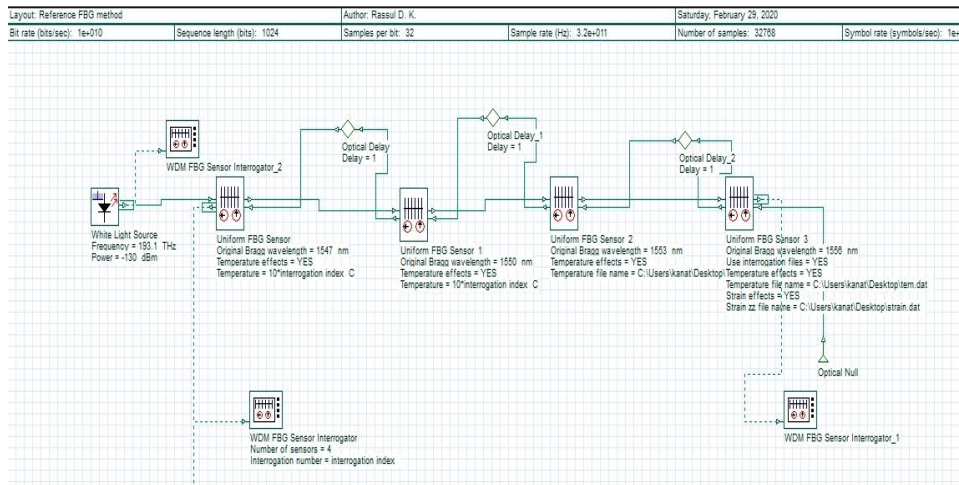
ҚОСЫМША



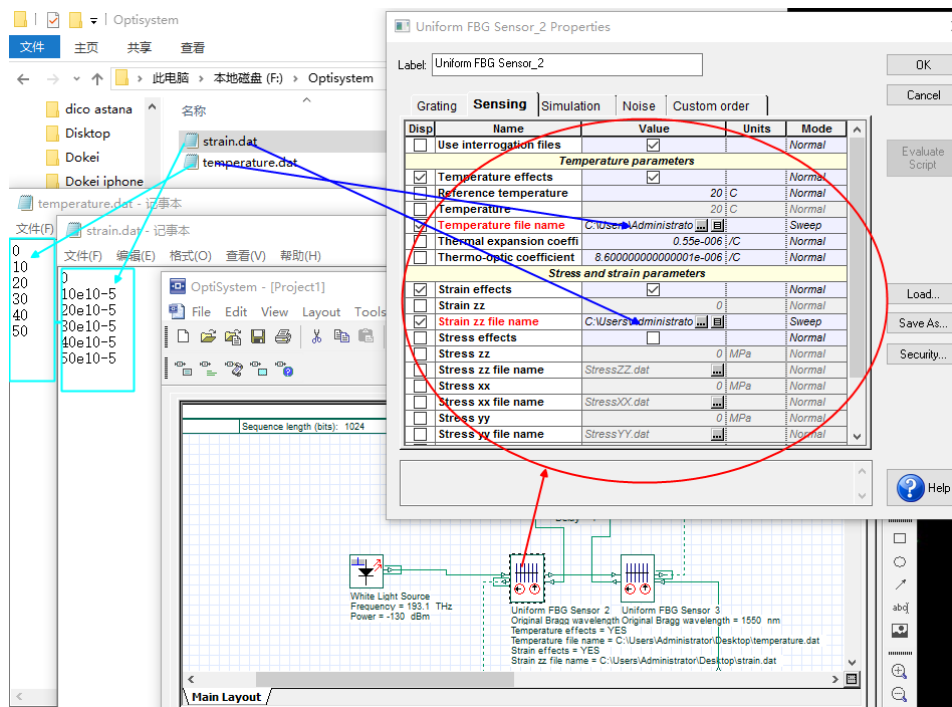
Қ1-сурет. Optisystem дизайны (температура)



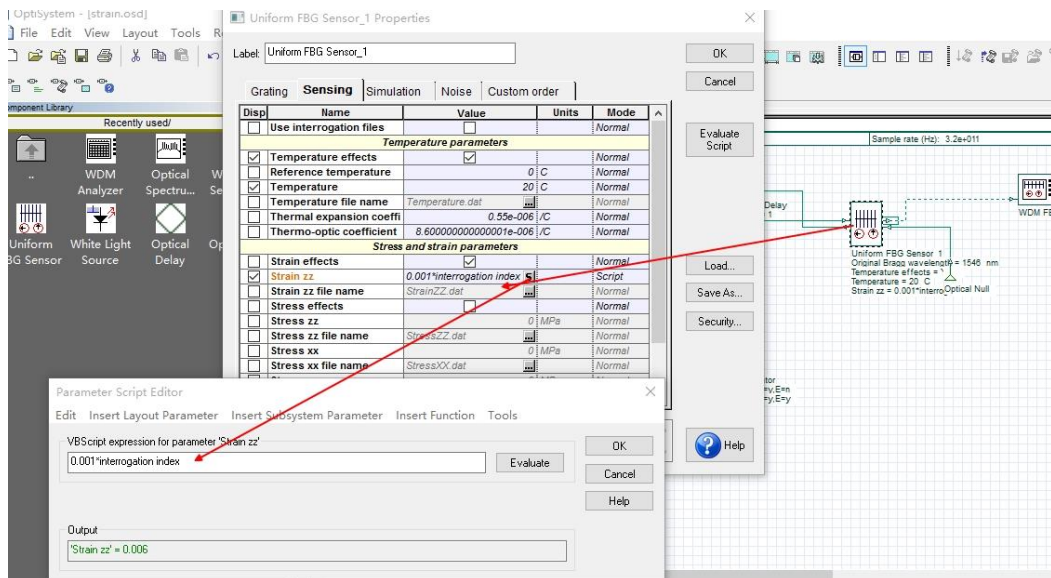
Қ2-сурет. Optisystem дизайны (механикалық кернеу)



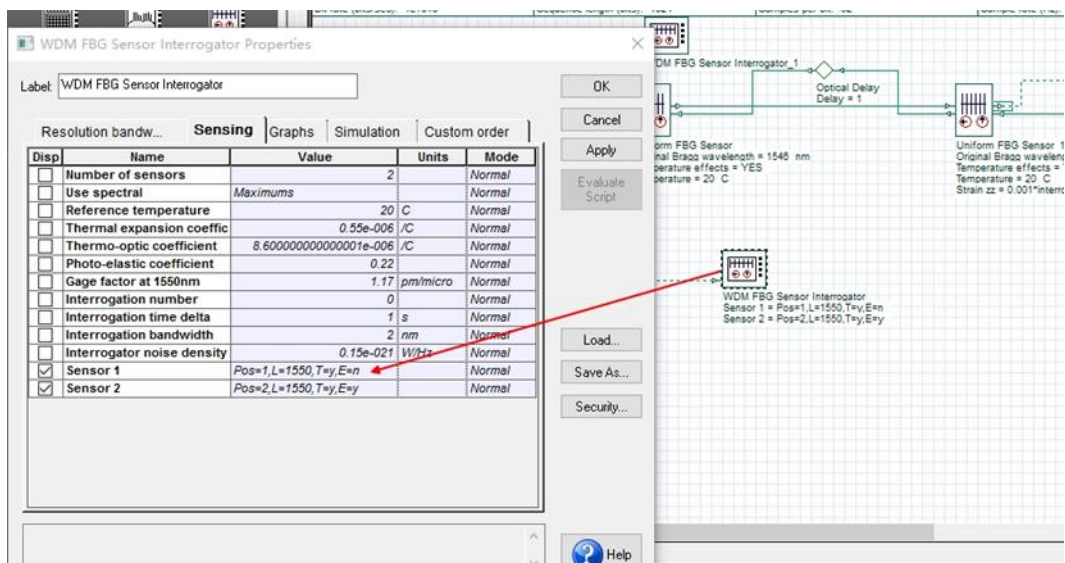
Қ3-сурет. Optisystem дизайны (кросс-сезімталдық)



Қ4-сурет. Optisystem-дегі параметрлер мәнін ".dat" файл арқылы жүктеу



Қ5-сурет. Optisystem дегі script және sweep функция арқылы модельдеу



ҚБ-сурет. Интеррогаторға настройка жасау