

А.Т. Жетписбаева¹, М.Ө. Ерішова², А. Толегенова¹,
К. Жетписбаев¹, Ж.М. Молдахмет¹

¹С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

²Логистика және көлік академиясы, Алматы, Қазақстан

E-mail: merekeeo_90@mail.ru

ОПТИКАЛЫҚ ТАЛШЫҚТАРДАҒЫ БЕЙСЫЗЫҚ ЭФФЕКТИЛЕРДІ МОДЕЛЬДЕУ

Андатпа. Оптикалық талшықтарда пайда болатын бейсызықтық эффектілерге, атап айтқанда өздік және фазааралық модуляцияға, төрт толқынды араласуға, еріксіз комбинациялық шашырауға және Мандельштам-Бриллюэннің еріксіз шашырауының табалдырығын анықтауға арналған әдістер қарастырылады. Сонымен қатар, талшықты-оптикалық байланыс жүйелерінің өнімділігіне осы бейсызықтық эффектілермен салынатын негізгі шектеулер қарастырылады.

Түйінді сөздер. Еріксіз шашырау, талшықты оптикалық байланыс жолы, рефлектометр, табалдырық қуаты.

Кіріспе.

Қазіргі таңда талшық бойында болған барлық ақауларды МБЕШ сенсорлары және рефлектометрлері арқылы анықтайтын болғандықтан, қарастырылатын бейсызық эффектілердің арасынан Мандельштам-Бриллюэн еріксіз шашырауының табалдырық қуатының оптикалық талшықтың физикалық ұзындығына тәуелділігінің математикалық моделі болып табылады.

Қазіргі уақытта оптикалық байланыс жүйелерінде жаһандық желінің қарқынды дамуы және берілетін ақпарат санының артуы арқасында байланыс арналарының өткізу қабілетіне сұраныс өсуде. Оптикалық талшықтарда ақпарат беру жылдамдығын, байланыс желілерінің ұзындығын және бір талшық бойынша берілетін толқын ұзындығы санын арттыру үшін оптикалық қуат деңгейі өзгереді. Қуатты сигнал деңгейі және талшықтың шектеулі тиімді облысы оптикалық талшықта (ОТ) бейсызық эффектілер тудырады.

Оптикалық арналардың қуаты мен санының артуымен пайда болған оптикалық талшықтардағы бейсызық эффектілер тарату жүйелерінде проблемалық фактор болып табылады. Бейсызықтық жаңа жиіліктерді генерациялауға және әртүрлі спектрлік құрамдастар арасындағы энергия алмасуға әкеледі. Бейсызықтық және сызықтық режимдердің айтарлықтай айырмашылығы – бұл сызықтық режимде, резонансты сіңіру жиіліктерінен алыс световодтағы сигнал спектрі іс жүзінде өзгеріссіз қалады.

Бейсызықтық эффектілердің ішінен қоздырғыш Мандельштам-Бриллюэн еріксіз шашырауы (МБЕШ) ең төменгі табалдырықты қуатқа ие, сондықтан талшықтағы берілетін жарық қуатын шектейді. Раман шашырауы Бриллюэн шашырауына қарағанда жоғары табалдырықты қуатқа ие және жарық сәулесі төменгі жиілік аймағына кеңірек жолмен ауысады. Бұл жағдайда қуатты қысқа толқыннан ұзын толқындық арналарға қайта

бөлу жүреді. Бұл әсер оптикалық байланыс жүйелерінде жақсарту ретінде қолданылады. Бұл әсерді оптикалық толқындарды басқару, модуляция форматын, оптикалық фаза конфигурациясын, дисперсиялық ерітіндіні және электрондық жабдықты таңдау арқылы азайтуға немесе шектеуге болады. Айта кету керек, қателіктер коэффициенті ОТ сызықты болмауына байланысты ОТ-ға кіретін қуаттың ұлғаюымен артады [1].

Бейсызық эффектілерге бейсызықтық сыну (жеке жағдайда фазалық өздігінен модуляция және фазалық кросс-модуляция болып табылады), төрт толқынды араласу (жеке жағдайы үшінші гармоника генерациясы болып табылады), еріксіз комбинациялық шашыраулары (Раман шашырауы) және Мандельштама-Бриллюэн еріксіз шашырауы жатады [2].

Көптеген бейсызықтық процестер, мысалы: параметрлік күшейту, фазалық кросс - модуляция, еріксіз комбинациялық шашырау, фазалық өздік модуляция және т. б. талшықты лазерлер, оптикалық күшейткіштер, датчиктер мен түрлендіргіштерді құруда табысты қолданылады. Талшық жарық сәулелерінің сығылған күйлерін, олардың пайда болуы мен оптикалық солитондардың таралуын, сондай-ақ әйнектің фотосезімталдық құбылысын зерттейді. Телекоммуникация үшін байланыстың оптоалшықты желілерінде бейсызық эффектілер басты роль атқарады. Бір жағынан, ОТ-дағы бейсызық эффектілер ақпарат берудің мүмкін жылдамдығы мен ауқымын шектейді, бірақ екінші жағынан – белгілі бір жағдайларда олар жаңа пайдалы құбылыстар мен қасиеттердің пайда болуын қамтамасыз етеді [3].

Оптикалық талшықтардың қасиеттерін зерттеуге бағытталған ғылыми жұмыстардың барлығында ғылыми зертханалардың негізгі құрылымы ұқсас. Оптикалық талшықтарға енген сәуленің, шыққан сәуленің және кері шағылған сәулелердің спектрлік, энергиялық және басқа да сипаттамаларын тіркеу арқылы, оларды салыстыру жұмыстарымен ұқсас болып келеді.

Оптикалық талшықта пайда болатын бейсызықтық эффектілер уақыт бірлігіне байланысты жеке оптикалық талшық арқылы берілетін ақпараттың көлеміне сәйкес фундаменталды шектеулерді туғызады. Байланыс жолдарын жүйелі түрде жобалаушылар қажет емес бейсызықты эффектілердің шектеулері туралы білуі қажет және олардың алдын алу барысында іс-шаралар жүргізуі керек.

Зерттеуші ғалымдар Partha P. Mitra және Jason H. Stark 2002 жылы бірмодалы [4] оптикалық талшықтары сигналдарының жиілігіне жақын орналасқан оптикалық таратулардың қарапайым теориялық моделін жетілдіріп және қазіргі технологияның жетістіктеріне байланысты бірмодалы оптикалық талшық бойымен сандық ақпараттардың таралу жылдамдығының шектік мәні 100 Тбит/с болатынын теориялық түрде негіздеді. Алайда, шын мәнінде DWDM жүйесіндегі ең алдағы тәжірибелік үлгілердің жылдамдығы 16...20 Тбит/с аспайды және де бұл ең алдымен оптикалық талшықтарда бейсызықтық эффектілердің пайда болуымен түсіндіріледі. ТОВЖ-мен айналысатын көптеген мамандар экономикалық тұрғыдан қандай да бір жетістікке жеткен оптикалық талшықтар болмасын бейсызықтық эффектілерді есепке алған кездегі жылдамдықтың алатын шектік мәні 10 Тбит/с болады деген тұжырымға келген. Ақпараттық ағымдардың жылдамдығын арттыру үшін оптикалық талшықтардың санын арттыру ең дұрыс шешім болады деп есептелді.

МБЕШ-пен күресудің үш жолы бар:

- күнделікті қозғалыстағы амплитудалық модуляцияның орнына фазалық модуляцияны қолдану. Осы жағдайда оптикалық тасушы қуаттың неғұрлым төмендеуі байқалады. Бірақ бұны телекоммуникациялық байланыс жолдарына байланысты кейбір практикалық есептерде қолдану мүмкін емес;

- арналы оптикалық қуаттың шамасын МБЕШ табалдырығының деңгейінен төмен түсіру. Бұл жағдайда оптикалық магистралды жолдарға жақын орналасқан күшейткіштер орнату қажет болғандықтан, бұл есептің шешімі ең қымбат әдіс болып табылады. Сонымен қатар, шуыл мен тасушының қатынасы азаяды. Қымбаттылығына қарамастан осы әдіс осыған дейін де, қазір де қолданыста, әсіресе, ескірген модельдерді қолдану кезінде;

- сәуле көзінің спектрлік енінің шамасын өсіру. Дисперсиялық сипаттамалардың шамасын арттыру байқалғандықтан, тікелей модуляциясы бар сәуле көздерін пайдалану тиімсіз.

Оптикалық талшықтың оптикалық қуат деңгейін арттырған кезде МБЕШ әсерінен белгілі бір мөлшерде немесе МБЕШ табалдырық шамасында оптикалық талшық бойында n рефракциясының индекс шамасының әсерінен өзгеретін акустикалық толқын пайда болады. n -нің өзгерісі жарықтың шашырауын туғызады және ол өз барысында акустикалық толқындардың қосымша генерациясына әкеледі.

Берілген эффектінің нәтижесінде жарық көзіне қарай кері бағытта таралатын ығысқан жиілігі бар толқын пайда болады. Соның салдарынан таратылатын пайдалы оптикалық қуат әлсірейді, яғни байланыс жолында таратқыштан берілген қуаттың шектік мәні анықталады. Мөлшері төмен оптикалық қуаттарда шағылған жарықтық толқын келтірілген оптикалық қуат деңгейіне тура пропорционал өседі, яғни Мандельштам-Бриллюэн шағылу заңы бойынша анықталады. Оптикалық талшықтың типтік мәні бойынша 10 км-ге созылғын байланыс жолы үшін МБЕШ табалдырығының мәні 6...10 дБм.

МБЕШ пайда болуын жоғары жылдамдықты оптикалық жүйелерде бақылау үшін міндетті түрде сыртқы модуляциясы бар модуляторларды және үздіксіз тербелісі бар лазерлік сәуле көздерін пайдаланады. Қалыпты жағдайда толқын ұзындығы 1500 нм сигнал деңгейі үшін МБЕШ эффектінің пайда болуы 8-14 дБм аралығында жатады, яғни МБЕШ типтік мәнінен жоғары екені көрініп тұр.

Табиғаты бойынша пайда болатын акустикалық толқын 10...13 ТГц жиіліктік спектрде орналасқан гипердыбысты болып саналады. Акустикалық жиілік толқынымен

анықталатын ω_A Бриллюэндік жиілік ығысуы v_B келесі теңдікпен анықталады:

$$v_B = \frac{\omega_A}{2\pi} = \frac{2 \cdot n \cdot v_A}{\lambda_0} \quad (1)$$

$\lambda=1550$ варцтық оптикалық толқындағы акустикалық толқынның жылдамдығы $v \approx 5 \cdot 10^3$ м/с және $v_B \approx 10$ ГГц (0,1 нм). Көбінесе физикалық процесті жақсы түсіну үшін Бриллюэндік жиіліктік ығысуды акустикалық гипердыбысты толқынның жарықтық ағымының модуляциясымен немесе Доплер эффектісімен салыстырады.

МБЕШ табалдырығының қуатының $P_{МБЕШ}$ теңдеуі:

$$P_{МБЕШ} \approx \frac{21v_A}{g_B L} \frac{\varepsilon \phi \phi}{\varepsilon \phi \phi} \left(1 + \frac{\Delta v_{LS}}{\Delta v_B} \right), \quad (2)$$

мұндағы α – толқынның поляризациялық күйіне тәуелді 1 мен 2 аралығындағы сандық мән; $g_B \approx 4,6 \cdot 10^{-11}$ м/Вт – МБЕШ күшейткіш коэффициенті (оптикалық талшыққа тәуелді); $L_{эфф}$ – келесі теңдеумен анықталатын оптикалық талшықтың тиімді ұзындығы:

$$L_{эфф} = \alpha^{-1} [1 - \exp(-\alpha L)]. \quad (3)$$

мұндағы $\Delta \nu_{LS}$ – сәуле көзінің спектрлік ені; $\Delta \nu_B \approx 20$ МГц (1550 нм) МБЕШ әсерлесу жолағы.

(4) теңдікті ыңғайлы дәстүрлі логарифмдік түрде жазуға болады:

$$L_{эфф} = \frac{4,343}{\alpha} \left(1 - \frac{1}{e^{0,23\alpha L}} \right). \quad (4)$$

Шамасы 40 км-ден ұзын жолдар үшін $a = 0,22$ dB/км кезінде оптикалық талшықтың тиімді ұзындығы шамамен 20 км құрайды. (4) теңдіктен МБЕШ табалдырығы тербелістің сәулелену көзінің спектрлік еніне тәуелді екені байқалады (модуляциялайтын сигнал болмаған кезде). $L_{эфф} = 20$ км және оптикалық талшықтың модасының 9,2 мкм тиімді диаметрі кезінде (48) теңдікті келесі типтегі ыңғайлы логарифмдік түрде жазуға болады:

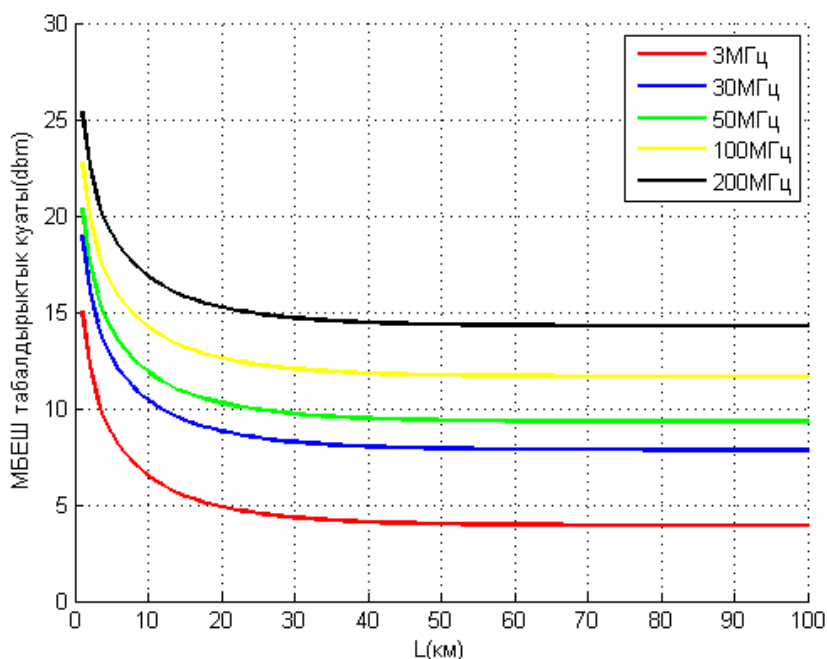
$$P_{МБЕШ} [dBm] = 14,8 - 10 \lg L_{эфф} + 10 \lg \left(1 + \frac{\Delta \nu_{LS}}{20} \right) + 20 \lg \left(\frac{D_{эфф}}{9,2} \right). \quad (5)$$

Толқын ұзындықтары 1310 нм және 1550 нм кезінде (4) және (5) өрнектерді пайдалана отырып, бірмодалы оптикалық талшықтың техникалық мәліметтерін қолданып және $\Delta \nu_{LS}$ – сәуле көзінің спектрлік енінің шамасын өзгерту арқылы МБЕШ табалдырық қуатының өзгерісі байқалды.

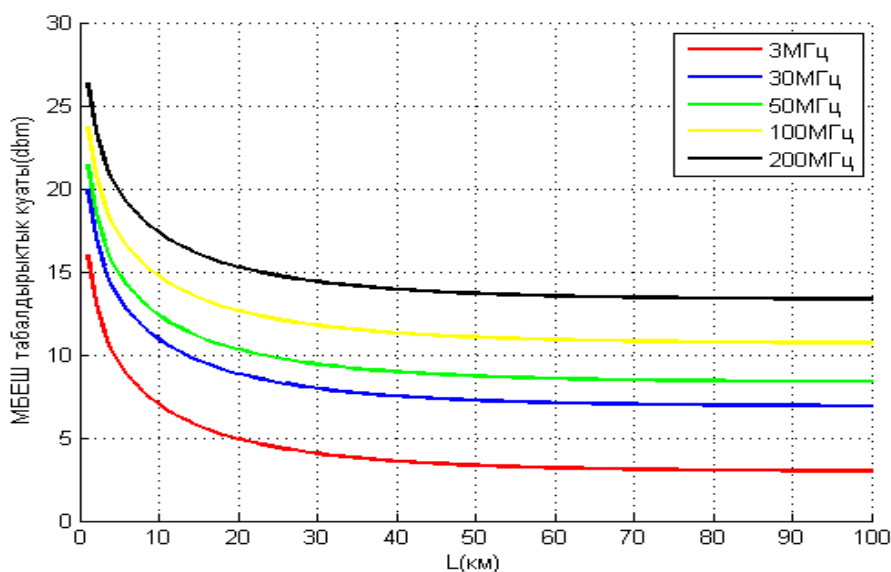
Толқын ұзындығы 1310 нм сәуле көзі үшін бірмодалы оптикалық талшықтың келесі техникалық сипаттамалары: өшу коэффициенті $\alpha = 0,35$ модальдық өрістің диаметрі $D_{эфф} = 9,2$ мкм, талшықтың ұзындығы $L = 20$ км және сәуле көзінің спектрлік енінің мәні $\Delta \nu_{LS} = 0,3; 30; 50; 100; 200$ МГц өзгерте отырып, МБЕШ табалдырық қуатының оптикалық талшық ұзындығы бойынша тәуелділігі алынды (сурет 1). Алынған график бойынша сәуле көзінің спектрлік енінің мәні $\Delta \nu_{LS} = 0,3$ МГц, оптикалық талшықтың МБЕШ табалдырық қуаты $P_{МБЕШ} = 5,81$ дБм, ал сәуле көзінің спектрлік шамасының мәні $\Delta \nu_{LS} = 200$ МГц болған кезде оптикалық талшықтың МБЕШ табалдырық қуатының $P_{МБЕШ} = 16,16$ дБм өзгеретіні көрсетілген. Сонымен сәуле көзінің спектрлік енінің мәні артқан сайын МБЕШ табалдырық қуатының артатынын байқауға болады.

Толқын ұзындығы 1550 нм сәуле көзі үшін бірмодалы оптикалық талшықтың техникалық сипаттамалары: өшу коэффициенті $\alpha = 0,22$ модальдық өрістің диаметрі $D_{эфф} = 10,4$ мкм; талшықтың ұзындығы $L = 100$ км болған кезде МБЕШ табалдырық қуатының оптикалық талшық ұзындығы бойынша тәуелділігін аламыз (сурет 2). Алынған график бойынша сәуле көзінің спектрлік енінің мәні $\Delta \nu_{LS} = 0,3$ МГц болған кезде

оптикалық талшықтың МБЕШ табалдырық қуатының $P_{\text{МБЕШ}}=6,13$ дБм өзгеретіні көрсетілген, ал сәуле көзінің спектрлік енінің мәні $\Delta\nu_{\text{LS}}=200\text{МГц}$ болған кезде оптикалық талшықтың МБЕШ табалдырық қуатының $P_{\text{МБЕШ}}=16,48$ дБм өзгеретіні көрсетілген. Сонымен, 1550 нм және 1310 нм толқын ұзындықтары үшін алынған тәуелділіктен сәуле көзінің спектрлік енінің мәні артқан сайн МБЕШ табалдырық қуаты шамасының артқанын байқауға болады.



1 сурет - Толқын ұзындығы 1310 нм үшін МБЕШ табалдырық қуатының оптикалық талшықтың физикалық ұзындығына тәуелділігі



2 сурет - Толқын ұзындығы 1550 нм үшін МБЕШ табалдырық қуатының оптикалық талшықтың физикалық ұзындығына тәуелділігі

МБЕШ табалдырық қуатының мәнін есептеу және графиктерді алу үшін Matlab бағдарламалау ортасы қолданылды.

Қорытынды.

МБЕШ табалдырығын анықтауға арналған әдістер қарастырылды. Магистралды желілердегі МБЕШ эффектісінің үлесін анықтауға қатысты мәселелер талданды. Оптикалық талшық бойындағы бейсызық құбылыстарды зерттеу бағытында МБЕШ табалдырығына сыртқы әсерлердің салдарынан температураның, қысымның өзгерулеріне тәуелділігін анықтайтын ғылыми еңбектерге шолу жасалды. Сыртқы деформацияның және температураның өсуіне МБЕШ эффектісінің өсу коэффициенті және сигналдың өшу коэффициенттері тура пропорционал артатындығы ғылыми еңбектерде көрсетілген. Сонымен қатар, МБЕШ табалдырығын анықтау және оның мәнін жоғарылату әдістерінде жіберілген сәуле спектрі енінің мәні өзгеруіне – фазалық модуляция жиілігіне тәуелділігі зерттелді.

ӘДЕБИЕТТЕР

- [1] Слепов Н. Н., Дмитриев С. А. Волоконно-оптическая техника: Современное состояние и перспективы: сб. ст. под ред. СА Дмитриева и НН Слепова. 2005.
- [2] Агравал Г. П., Мамышев П. В., Черников С. В. Нелинейная волоконная оптика. – М.: Мир, 1996.
- [3] Ачилова И. И. Нелинейные эффекты в оптическом волокне //Новые информационные технологии в науке. – 2017. – С. 49-54.
- [4] Mitra, P. P., Stark, J. B. Nonlinear limits to the information capacity of optical fibre communications. Nature, -2001. -Vol.411, № 6841. -P. 1027-1030.
- [5] Беспрозванных А.В. Проявление нелинейных эффектов в оптических волокнах. // Электротехника и электромеханика. 2005. № 1.
- [6] В.Ю. Голышев, Е.А. Жуков, И.Э. Самарцев, Д.Г. Слепов Влияние фазовой самомодуляции на вынужденное рассеяние Манделъштама–Бриллюэна в волоконно-оптических линиях связи. Журнал технической физики, 2004, том 74, вып. 7.
- [7] Басов Н. Г., Зубарев И.Г., Миронов А. Б., Михайлов С.И., Окулов А. Лазерный интерферометр с зеркалами разворота волнового фронта. Журнал экспериментальной и теоретической физики., Ноябрь. 1980, стр. 1678-1686. Россия.

Ainur Zhetpisbayeva, PhD, S. Seifullin Kazakh Agro Technical University, Nur-Sultan, Kazakhstan; aigulji@mail.ru

Mereke Eryshova, Senior lecturer, Academy of Logistics and Transport, Almaty, Kazakhstan, merekeo_90@mail.ru

Aray Tolegenova, PhD, S. Seifullin Kazakh Agro Technical University, Nur-Sultan, Kazakhstan, aigulji@mail.ru

Kairat Zhetpisbayev, PhD, S. Seifullin Kazakh Agro Technical University, Nur-Sultan, Kazakhstan, aigulji@mail.ru

Zhanna Moldakhmet, magister, S. Seifullin Kazakh Agro Technical University, Nur-Sultan, Kazakhstan, bakenovazhanna@bk.ru

MODELING OF NONLINEAR EFFECTS IN OPTICAL FIBERS

Abstract. Methods for nonlinear effects arising in optical fibers are considered, in particular for independent and interphase modulation, four-wave interference, involuntary raman scattering and determination of the threshold of involuntary Mandelstam-Brillouin scattering. In addition, the main limitations imposed by these nonlinear effects on the performance of fiber-optic communication systems were considered.

Keywords. Involuntary scattering, fiber-optic communication path, reflectometer, threshold power.

Айнур Жетписбаева, PhD, Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина, Нур-Султан, Казахстан; aigulji@mail.ru

Мереке Ершова, сениор-лектор, Академия логистики и транспорта, Алматы, Казахстан; merekeeo_90@mail.ru

Арай Толегенова, PhD, Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина, Нур-Султан, Казахстан; aigulji@mail.ru

Кайрат Жетписбаев, PhD, Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина, Нур-Султан, Казахстан; aigulji@mail.ru

Жанна Молдахмет, магистр, Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина, Нур-Султан, Казахстан; bakenovazhanna@bk.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

Аннотация. В данной работе представлен методы для нелинейных эффектов, возникающих в оптических волокнах, в частности для самостоятельной и межфазной модуляции, четырехволнового вмешательства, произвольного комбинационного рассеяния и определения порога произвольного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна. Кроме того, были рассмотрены основные ограничения, накладываемые этими нелинейными эффектами на производительность волоконно-оптических систем связи.

Ключевые слова. Произвольное рассеяние, волоконно-оптический путь связи, рефлектометр, мощность порога.
