

ANALYSIS OF MODERN FIBER-OPTIC SENSORS BASED ON PHASE MODULATION

Kholikova Parizoda Saidali qizi

2nd-year Master's Student, Tashkent State Technical University

Abstract: This article analyzes the operating principles and modern technological solutions of fiber-optic sensors based on phase modulation. The main novelty of the paper is the proposal of a hybrid sensor system based on the Mach–Zehnder interferometer and Fiber Bragg Grating (FBG) to eliminate the “cross-sensitivity” issue of interferometric sensors toward temperature and pressure.

Keywords: fiber-optic sensor, phase modulation, interferometry, Mach–Zehnder interferometer, Fiber Bragg Grating (FBG), hybrid system, cross-sensitivity, industrial monitoring, phase shift, sensor.

Annotatsiya

Ushbu maqolada fazaviy modulyatsiya asosidagi optik tolali sensorlarning ishlash tamoyillari va zamonaviy texnologik yechimlari tahlil qilingan. Maqolaning asosiy yangiligi — interferometrik datchiklarning harorat va bosimga nisbatan “o‘zaro sezgirlik” muammosini bartaraf etish uchun Mach–Zehnder va Optik tolali Bragg panjarasi (FBG) asosidagi gibrid sensorli tizimning taklif etilishidir.

Kalit so‘zlar

Optik tolali sensor, fazaviy modulyatsiya, interferometriya, Mach–Zehnder interferometri, Optik tolali Bragg panjarasi (FBG), gibrid tizim, o‘zaro sezgirlik, sanoat monitoringi, faza siljishi, datchik.

Hozirgi kunda yuqori aniqlik va ishonchlilikka ega o‘lchash tizimlariga bo‘lgan ehtiyoj sanoat, energetika, qurilish va ilmiy tadqiqot sohalarida ortib bormoqda. An’anaviy elektr sensorlar elektromagnit shovqinlar, yuqori harorat va agressiv

muhitlarda samaradorligini yo‘qotishi mumkin. Shu sababli optik tolali sensorlar muqobil va samarali yechim sifatida keng qo‘llanilmoqda.

Ayniqsa, fazaviy modulyatsiya asosidagi zamonaviy optik tolali sensorlar yuqori sezgirligi va aniqligi bilan ajralib turadi. Ushbu sensorlar haddan tashqari sezgirligi tufayli, barcha optik tolali sensorlarning eng ommabop turi hisoblanadi. Fazali modulyatsiyalangan optik tolali sensorlar odatda bitta yorug‘lik signalining fazasi o‘zgarishini yoki ko‘pincha ikki yorug‘lik to‘lqinlari orasidagi nisbiy faza o‘zgarishini o‘lchash uchun optik interferensiyadan foydalanishni o‘z ichiga oladi. Interferensiya haqida munozarani boshlash uchun, avvalo, to‘lqinning tarqalish jarayonini matematik tarzda tavsiflash muhimdir. Umumiy tavsif bo‘sh ya‘ni muhitning sindiruvchanligi inobatga olinmaydigan fazoda tarqaladigan elektromagnit tekislik to‘lqini.

$$E = E_0 e^{j(kr - \omega t)}, \quad (1.1)$$

Bu yerda E elektr maydon amplitudasini, k -to‘lqin vektorini, r -koordinata vektorini, ω – burchak chastotasini, t -vaqtni va $E_0 = E_x \hat{x} + E_y \hat{y} + E_z \hat{z}$ ni ifodalaydi.

Agar biz z o‘qi bo‘ylab tarqaladigan chiziqli x -polarizatsiyalangan tekis to‘lqinni va fazoda r tasvirining haqiqiy qismini ko‘rib chiqsak:

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} \text{ bo'lsa } (2\pi/\lambda) z, \text{ va}$$
$$E = E_x \cos \left[\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) z - \omega t \right] \quad (1.2)$$

Aslida detektorlar yorug‘likning o‘ta yuqori chastotasiga ($\sim 10^{14}$ Hz) javob bera olmagan uchun vaqt bo‘yicha o‘rtacha intensivlikni o‘lchaydi. (1.2) ni yanada soddalashtirib, ωt ning o‘zgarishini inobatga olmasdan foydalanish mumkin:

$$E = E_x \cos \left[\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) z \right] \quad (1.3)$$

Shuni ta’kidlash kerakki, bu ifoda muhitning sindirish ko‘rsatgichi inobatga olinmagan fazodagi tekis to‘lqinni tarqalishini tasvirlaydi, bu doimiy fazaning sirtlari tekislik ekanligini va ular hech qanday o‘zgarishsiz cheksizgacha cho‘zilishini

anglatadi, bu ayniqsa ideal holatdir. Optik tola orqali boshqariladigan muhitda tarqaladigan to‘lqin uchun elektr maydon komponentini hal qilishda yadro va qoplama chegaralari, shuningdek, maydonning cheksiz kengayishi hisobga olinishi kerak. Bir rejimli optik toladagi maydonlarning fazali jabhalari (to‘lqin uzunligini ideal muhitdan o‘tganda ishlash uchun) ushbu tenglama bilan juda aniq ifodalanishi mumkin. (1.3); bu tolalar arxitekturasida interferometrik xatti-harakatlar tahlilini sezilarli darajada osonlashtiradi. To‘lqinning muhitda tarqalishi uchun hisobga olinishi kerak bo‘lgan qo‘shimcha parametr odatda n bilan ifodalangan sinish indeksidir. Ushbu jarayon uchun biz n ni zaryadsiz, bir xil, dielektrik materialning mikroskopik parametri sifatida ko‘rib chiqamiz, u to‘lqinning guruh tezligini quyidagicha belgilaydi:

$$v = \frac{c}{n} \quad (1.4)$$

Bu tenglikni o‘zgartirishga E_q olib keladi. (1.3) to‘lqin tarqaladigan materialning xususiyatlarini hisobga olish uchun:

$$E = E_x \cos \left[\left(\frac{2\pi n}{\lambda} \right) z \right] \quad (1.5)$$

Agar toladagi z yo‘nalishini L uzunligi deb hisoblasak, tenglamaning argumentini E_q to‘plashimiz mumkin.

$$\phi = knL \quad (1.6)$$

$\phi = knL$ formula elektr maydon to‘lqini uchun oddiy ifodaga olib keladi:

$$E = E_x \cos (\phi) \quad (1.7)$$

Tenglamaning maqsadi E_q (1.5) bitta chiziqli polarizatsiya holatini tavsiflashdir. Shunga qaramay, teng qutblanish holatlaridagi to‘lqinlar qo‘shiladi, aniq ta’sir kontrastning pasayishi yoki natijada paydo bo‘lgan signal ko‘rinishida ko‘rsatiladi.

Odatda, fazali modulyatsiyalangan sensorlar kogerent lazer yorug‘lik manbai va ikkita alohida optik yo‘l yoki dastadan foydalanadi. Yorug‘lik bo‘linadi va har bir dastaga yuboriladi. Agar muhit bir dastani boshqasiga nisbatan o‘zgartirsa, aniq aniqlash

mumkin bo‘lgan faza siljishi sodir bo‘ladi. Ushbu tizimlar optik tolalar yordamida amalga oshirilganda, ikkita qo‘l odatda bitta rejimli toladan iborat. Umuman olganda, optik tolali sensorlar biron bir fizik parametrl bilan modulyatsiya qilinadi, bu esa o‘z navbatida bu modulyatsiyalangan yorug‘lik signalini aniqlash tizimiga uzatadi. Ushbu aniqlash tizimi odatda to‘lqin uzunligi, faza, polyarizatsiya yoki optik signalning boshqa xususiyatlariga sezgir bo‘lgan komponentlarni o‘z ichiga oladi. Ushbu dasta oxirida yorug‘lik intensivligiga javob beradigan detektor mavjud.

Ko‘rsatish mumkinki, tenglamaning vaqt bo‘yicha o‘rtacha intensivligi. E_q (1.7) hisoblanadi

$$I \propto E_x^2 \quad (1.8)$$

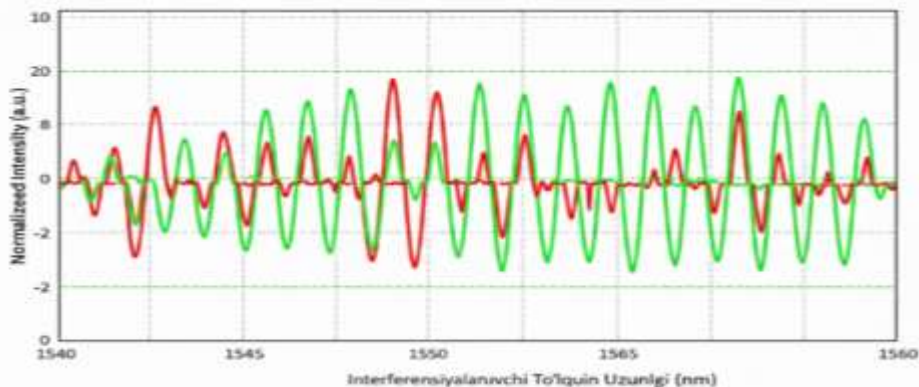
Ikki to‘lqinning qo‘shilishini tahlil qilish uchun shuni yodda tutish kerakki, natijada paydo bo‘lgan elektr maydoni fazoviy nuqta va vaqtinchalik misolda mavjud bo‘lgan barcha maydonlarning yig‘indisidir. Ikki tekislik to‘lqinidan kelib chiqadigan intensivlik [teng. (1.7)], teng chiziqli qutblanish holatlari va maydon amplitudalari bilan to‘lqinning fazo r belgilariga qaytish orqali topish mumkin:

$$E_1 = E e^{j\phi_1}$$

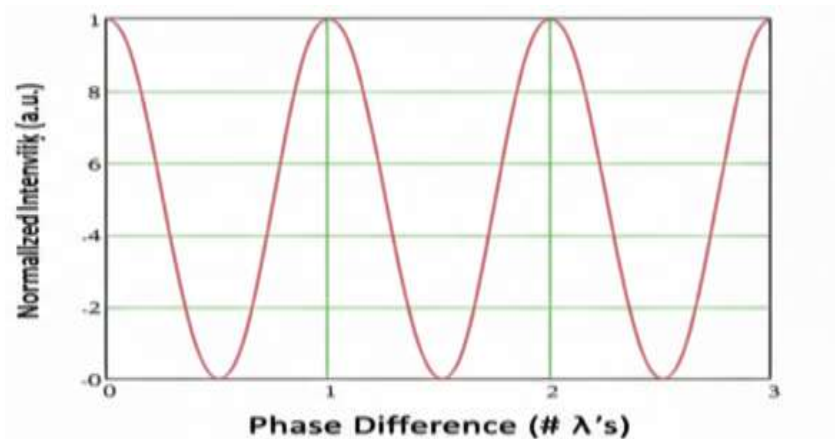
$$E_2 = E e^{j\phi_2}$$

$$I = E_1 E_1^* + E_2 E_2^* + E_1 E_2^* + E_2 E_1^* \quad (1.9)$$

$$I = 2E^2 [1 + \cos(\phi_2 - \phi_1)]$$



1.1-rasm. Ikki to‘lqin interferensiyasining natijaviy intensivligi to‘lqin uzunligiga bog‘liq holda.



1.2-rasm. Ikki to‘lqin interferensiyasining natijaviy intensivligi fazalar farqiga bog‘liq holda.

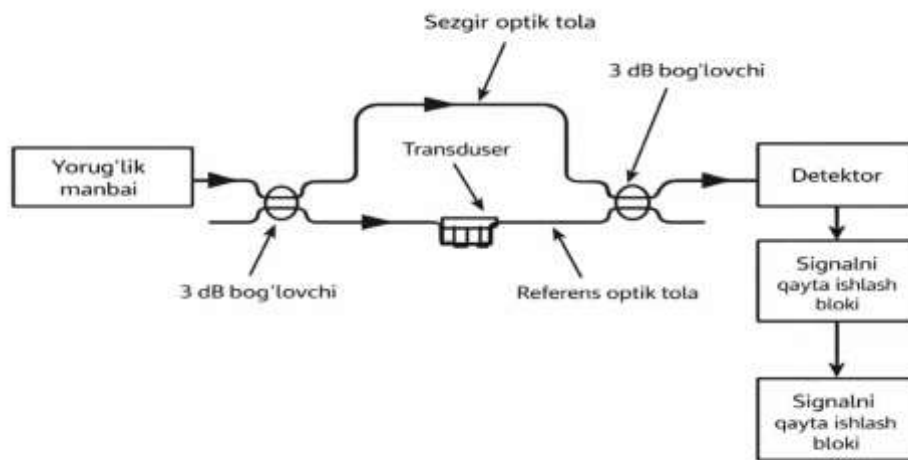
1.1 va 1.2-raslarda (1) uzunlik va sindirish ko‘rsatkichi o‘zgaras bo‘lganda va (2) to‘lqin uzunligi o‘zgarganda hosil bo‘lgan intensivlik ko‘rsatilgan

To‘rtta asosiy fazaviy interferometrik konfiguratsiyalar mavjud⁴: Xususan, Mach–Zehnder, Michelson, Fabry–Pérot va Sagnac interferometrlari optik sensorlarda keng qo‘llaniladigan asosiy tuzilmalar sifatida ko‘rsatilgan.

Mach–Zehnder interferometri mustaqil optik yo‘llarga ega bo‘lgani sababli bosim, tebranish va akustik signallarga yuqori sezgirlik ko‘rsatadi hamda gidrofon ilovalarida keng qo‘llaniladi. Michelson interferometri klassik tuzilishga ega bo‘lib, fazaviy o‘zgarishlarni aniqlashda samarali hisoblanadi, biroq tashqi shovqinlarga nisbatan sezgirligi uning ayrim zamonaviy sensor tizimlarida cheklangan qo‘llanishiga sabab bo‘ladi. Fabry–Pérot interferometri rezonans xususiyatlari tufayli kichik deformatsiya va bosimlarni yuqori aniqlikda o‘lchash imkonini beradi. Sagnac interferometri esa aylanishga sezgirligi bilan ajralib turib, optik tolali giroskoplar va navigatsiya tizimlarining asosiy elementi hisoblanadi.

Umuman olganda, Mach–Zehnder, Michelson, Fabry–Pérot va Sagnac interferometrlari fazaviy modulyatsiya sensorlarining funksional asosini tashkil etadi. Har bir interferometr turining o‘ziga xos xususiyatlari va afzalliklari mavjud bo‘lib, ularni tanlash o‘lchanayotgan fizik kattalik va qo‘llanilish sohasiga bog‘liq. Shu sababli fazaviy modulyatsiya asosidagi optik tolali sensorlar zamonaviy monitoring va yuqori aniqlikdagi o‘lchash tizimlarida muhim ahamiyat kasb etadi.

Bugungi kunda eng ko‘p foydalaniladigan optik tolali fazoviy o‘zgarish sensorlarning komponentlaridan biri bu Mach–Zehnder sensori hisoblanadi, sababi ushbu sensor eng mayda o‘zgarishlarni ham qayt eta oladi. Biroq, uning bitta kamchiligi — harorat va bosimni bir-biridan ajrata olmasligidir.



1.3-rasm. Mach-Zehnder (M-Z) konfiguratsiyasining ko‘rinishi.

Lazer chiqish nuri 3 dB toladan tolagacha ulagich yordamida bo‘linadi, ya’ni yorug‘likning 50% bitta rejimli sensorli tolaga va 50% tayanch tolasiga yuboriladi. Yorug‘lik nurlari ikkinchi 3 dB tolali tolali biriktirgich yordamida qayta birlashtiriladi. Birlashtirilgan nur aniqlanadi va faza siljishi o‘lchanadi. Faza siljishi sezuvchi tolaning uzunligi va sinishi ko‘rsatkichining o‘zgarishi natijasida yuzaga keladi. Agar sezuvchi va mos yozuvlar tolalarining yo‘l uzunligi aynan bir xil uzunlikda bo‘lsa yoki to‘lqin

uzunliklarining integral soni bilan farq qilsa, rekombinatsiyalangan nurlar to‘liq fazada bo‘ladi va nurning intensivligi maksimal darajada bo‘ladi. Biroq, agar ikkita nur fazadan $\lambda/2$ to‘lqin uzunligi bo‘lsa, rekombinatsiyalangan nur minimal qiymatida bo‘ladi. 100% modulyatsiya tola uzunligidagi yorug‘lik o‘zgarishining $\lambda/2$ to‘lqin uzunligida sodir bo‘ladi. Bu sezgirlik 10^{-13} m gacha kichik o‘zgarishlarni aniqlash imkonini bersada, ularning amaliy qo‘llanilishida “o‘zaro sezgirlik” muammosi mavjud. Ya’ni, interferometr bir vaqtning o‘zida ham mexanik bosimga, ham harorat o‘zgarishiga javob beradi, bu esa o‘lchov aniqligiga salbiy ta’sir ko‘rsatadi.

Ushbu muammoni bartaraf etish uchun maqolada Mach–Zehnder va Optik tolali Bragg panjarasi (FBG) asosidagi gibrid sensorli tizim taklif etiladi. Bunda M-Z interferometrining sezgir optik tolali yelkasiga FBG panjarasi ketma-ket ulanadi. FBG harorat o‘zgarishini alohida to‘lqin uzunligi siljishi orqali qayd etadi, M-Z esa umumiy faza modulyatsiyasini o‘lchashda davom etadi.

Gibrid sensorning ishlashini quyidagi matritsa ko‘rinishida ifodalash mumkin:

$$\begin{bmatrix} \Delta\phi \\ \Delta\lambda_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\phi P} & K_{\phi T} \\ 0 & K_{\lambda P} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

Bu yerda $\Delta\phi$ — interferometrda faza o‘zgarishi, $\Delta\lambda_B$ — FBG to‘lqin uzunligi siljishi, K koeffitsientlari esa mos ravishda tizimning bosim (P) va haroratga (T) sezgirlikni belgilaydi.

Taklif etilayotgan ushbu yechim harorat shovqinlarini interferometrik signaldan ajratib olishga (kompensatsiya qilishga) imkon beradi. Natijada, sensor nafaqat yuqori sezgirlikni saqlab qoladi, balki dinamik bosimni o‘lchashda tashqi muhit haroratidan mustaqil bo‘lgan yuqori selektivlikka erishadi.

Mach-Zehnder sensorlarining amaliyotdagi o‘rni va ishlab chiqaruvchilar.

Mach–Zehnder (Max-Zender) interferometrik sensorlari yagona bir xil mahsulot emas, balki **telekommunikatsiya, tibbiyot va sanoat monitoringi** kabi turli sohalarda

ishlatiladigan texnologiyadir. Shu sababli, ularni ishlab chiqaruvchi kompaniyalar sohasiga qarab bir-biridan keskin farq qiladi.

Ushbu sensorlarni ishlab chiqaruvchi dunyodagi eng yirik kompaniyalar, ularning yillik ko‘lami va qaysi soha uchun ishlashi batafsil tahlili:

1. Sanoat va Infratuzilma Monitoringi (Eng yirik sensor ishlab chiqaruvchilar). Bu sohadagi sensorlar ko‘priklar, to‘g‘onlar, neft quvurlari va samolyot qanotlaridagi kuchlanishni o‘lchash uchun ishlatiladi. Luna Innovations kompaniyasi sanoat monitoringi sohasida yetakchi bo‘lib, 2023-yilda 117 million dollar aylanmaga ega bo‘lgan.

2. Telekommunikatsiya (Eng katta hajmdagi ishlab chiqarish). Lumentum (AQSh) va Coherent (sobiq Finisar) kompaniyasi optik aloqa va fotonika sohasida yetakchi bo‘lib, yillik aylanmasi \$1.5 - \$3 milliard atrofida. Ushbu sensorlar asosan, Data markazlar (Google, Amazon serverlari), 5G tarmoqlari va optik internet magistralari qo‘llaniladi.

3. Biotexnologiya va Tibbiyot (Eng tez o‘sayotgan soha). Bu yerda sensorlar juda kichik (mikrochip) ko‘rinishida bo‘lib, qon tahlili yoki viruslarni aniqlash uchun ishlatiladi. LioniX International (Niderlandiya) kompaniyasi Integrallashgan fotonika (Photonic Integrated Circuits) sohasida yetakchi bo‘lib, COVID-19 testi, saraton kasalligini erta aniqlash, DNK tahlili qilishda keng qo‘llaniladi.

4. Ilmiy Tadqiqot va Laboratoriya (O‘quv va fan uchun). Ushbu sohada eng yetakchi kompaniyalardan biri bu Thorlabs va Newport (MKS Instruments) Optik laboratoriya uskunalari ishlab chiqarish sohasida qo‘llaniladi.

Hozirgi kunda global bozor hajmi: Mach-Zehnder interferometrlariga asoslangan asboblardan bozori 2023-yilda taxminan **\$320 million** deb baholangan va 2032-yilga kelib **\$540 millionga** yetishi kutilmoqda.

Xulosa

Xulosa qilib aytganda, Mach-Zehnder interferometrlari yuqori sezgirliги tufayli nafaqat laboratoriya sharoitida, balki yirik sanoat va tibbiyot sohalarida ham ajralmas vositaga aylanib bormoqda. Lumentum va LioniX kabi kompaniyalarning yutuqlari ushbu texnologiyaning kelajagi porloq ekanligini ko‘rsatadi.

Maqolada taklif etilgan gibrid Mach–Zehnder va FBG (Optik tolali Bragg panjarasi) tizimi ushbu texnologiyaning amaliy samaradorligini yangi bosqichga olib chiqadi. Ushbu integratsiya interferometrik datchiklarning eng katta kamchiligi bo‘lgan “o‘zaro sezgirlik” muammosini hal etib, harorat va bosim parametrlarini bir-biridan mustaqil ravishda, yuqori aniqlikda o‘lchash imkonini beradi. Natijada, ushbu gibrid sensorlar nafaqat laboratoriya sharoitida, balki o‘zgaruvchan muhitli yirik sanoat, tibbiyot va navigatsiya tizimlarida ham eng ishonchli va ajralmas monitoring vositasiga aylanadi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati.

1. Krohn, D. A. *Fiber Optic Sensors: Fundamentals and Applications*. — Research Triangle Park, NC: Instrument Society of America, 1988.
2. Yu, F. T. S., Yin, S. *Fiber Optic Sensors*. — New York: Marcel Dekker, 2002.
3. Méndez, A. *Overview of Fiber Optic Sensors for NDT Applications // IV Pan-American Conference for NDT*. — 2007. — P. 1–11.
4. Casas, J. R., Cruz, P. J. S. *Fiber Optic Sensors for Bridge Monitoring // Journal of Bridge Engineering*. — ASCE, 2003.
5. Berthold, J. W. *Historical Review of Microbend Fiber Optic Sensors // Journal of Lightwave Technology*. — 1995. — Vol. 13. — P. 1193–1199.