

AEROPORT ANGARLARIDA YONG'INNI ERTA ANIQLASH UCHUN OPTIK DETEKSIYA USULIGA ASOSLANGAN FAZOVIIY HARORAT MONITORING VA ILMIY TAHLILI

Abdullayev Abdulaziz Husanboy o'g'li

Muallif:

Saydumarov Ilxomjan Miralimovich

Ilmiy rahbar: (Toshkent Davlat Universiteti)

Annotatsiya: *Ushbu maqolada optik tolaga asoslangan chiziqli issiqlik aniqlash tizimlarining ishlash prinsipi va ularning aviatsiya infratuzilmasida qo'llanilishi tahlil qilinadi. Raman sochilishi hodisasiga asoslangan yordamida optik kabel bo'ylab harorat taqsimotini aniqlash imkoniyati ko'rib chiqiladi. Aeroport angarlari misolida yong'in manbasini aniqlash uchun fazoviy harorat modeli taklif etiladi. Tadqiqot natijalari optik deteksiya monitoring tizimlari yong'inni erta aniqlash va sanoat xavfsizligini oshirishda samarali vosita ekanligini ko'rsatadi.*

Kalit so'zlar: *optik tola, issiqlikni aniqlash, roman sochilishi, optik kabel, detektor, stokes, anti-stokes, angar.*

Abstract: *This article analyzes the operating principles of fiber-optic linear heat detection systems and their application in aviation infrastructure. The possibility of determining temperature distribution along an optical cable based on the Raman scattering phenomenon is considered. Using airport hangars as an example, a spatial temperature model for identifying the source of fire is proposed. The research results show that optical detection monitoring systems are an effective tool for early fire detection and improving industrial safety.*

Keywords: *optical fiber, heat detection, Raman scattering, optical cable, detector, Stokes, anti-Stokes, hangar.*

Аннотация: *В данной статье анализируются принцип работы линейных систем обнаружения температуры на основе оптического волокна и их применение в авиационной инфраструктуре. Рассматривается возможность определения распределения температуры вдоль оптического кабеля на основе явления комбинационного (Рамановского) рассеяния. На примере авиационных ангаров предложена пространственная температурная модель для выявления источника возгорания. Результаты исследования показывают, что системы мониторинга с оптической детекцией являются эффективным средством раннего обнаружения пожара и повышения промышленной безопасности.*

Ключевые слова: *оптическое волокно, обнаружение температуры, комбинационное рассеяние, оптический кабель, детектор, Стокс, антистокс, ангар.*

Zamonaviy aeroport infratuzilmasida yong'in xavfsizligi muhim masalalardan biri hisoblanadi.

Samolyotlar saqlanadigan angarlar, yonilg'i tizimlari hamda elektr kommunikatsiyalari mavjudligi sababli bunday obyektlarda yong'in xavfi yuqori bo'ladi.

An'anaviy nuqtaviy datchiklar ko'pincha katta hududlarda harorat o'zgarishini tez aniqlay olmaydi. Shu sababli uzluksiz monitoring imkoniyatiga ega bo'lgan yangi texnologiyalardan foydalanish zarur.

Optik tolaga asoslangan chiziqli issiqlik aniqlash tizimlari so'nggi yillarda sanoat obyektlarida keng qo'llanila boshladi. Bunday tizimlar kabelning butun uzunligi bo'ylab haroratni o'lchash imkonini beradi va yong'in manbasining aniq joylashuvini aniqlashga yordam beradi.

Bu qurilma bitta nuqtani emas, balki butun optik kabel bo'ylab haroratni uzluksiz o'lchaydi.

Ya'ni, $T = T(z)$

Optik tolada lazer nurlanishining tarqalishi jarayonida muhit molekulalari bilan o'zaro ta'sir natijasida Raman sochilishi yuzaga keladi. Ushbu jarayon Stokes va Anti-Stokes komponentlari bilan tavsiflanadi. Anti-Stokes signalining intensivligi haroratga sezgir bo'lgani sababli undan muhit haroratini aniqlash mumkin.

Fiber-optik Linear Heat Detection tizimining ishlash prinsipi

Tizim impulsli lazer manbai, optik tolali sensor liniyasi, spektral filtrlar, fotodetektorlar va signalni qayta ishlash modulidan tashkil topadi. Lazer impulsi tolaga yuborilganda har bir nuqtada Raman signali hosil bo'ladi. Ushbu signal qabul qilinib, masofa va harorat qiymatlari hisoblanadi.

Shu tariqa real vaqt rejimida monitoring amalga oshiriladi. Hisoblangan ma'lumotlar grafik ko'rinishda aks ettiriladi. Agar ma'lum nuqtada harorat kritik qiymatdan oshsa, tizim avtomatik ravishda ogohlantirish signalini beradi

Aeroport hangari uchun fazoviy harorat modeli

Angar uzunligi bo'ylab joylashtirilgan optik kabel orqali harorat taqsimotini aniqlash mumkin. Agar ma'lum nuqtada yong'in yuzaga kelsa, harorat manbadan uzoqlashgan sari kamayadi. Ushbu jarayonni quyidagi model bilan ifodalash mumkin:

$$T(z) = T_0 + \Delta T e^{-a|z-z_0|}$$

bu yerda

T_0 — boshlang'ich harorat,

ΔT — maksimal harorat ortishi,

a — issiqlik so'nish koeffitsienti,

z_0 — yong'in joylashuvi.

Mazkur model yordamida o'lchangan harorat profilidan yong'in manbasini aniqlash mumkin.

Natijalar va tahlil

Fiber-optik tizimlar katta maydonlarni uzluksiz nazorat qilish imkonini beradi. Ular elektromagnit shovqinlarga chidamli bo'lib, portlash xavfi mavjud muhitlarda ham xavfsiz ishlaydi. Shuningdek, bunday tizimlar yong'inni an'anaviy nuqtaviy datchiklarga nisbatan tezroq aniqlash imkonini beradi.

Optik tolaga asoslangan harorat monitoring tizimlari aviatsiya infratuzilmasida yong'in xavfsizligini oshirishda samarali vosita hisoblanadi. Raman sochilishiga asoslangan Distributed Temperature Sensing texnologiyasi yordamida keng hududlarni real vaqt rejimida kuzatish mumkin. Kelgusida bunday tizimlarni aeroportlarning turli muhandislik infratuzilmalarida qo'llash istiqbolli hisoblanadi.

Fiber-optik Linear Heat Detection tizimlarida haroratni aniqlash jarayoni optik tolada yuz beradigan noelastik yorug'lik sochilish hodisalariga asoslanadi. Bunday tizimlar amalda optik kabelning butun uzunligi bo'ylab harorat taqsimotini aniqlash imkonini beradi. Mazkur texnologiya sanoat xavfsizligi, energetika va aviatsiya infratuzilmasida yong'inni erta aniqlash maqsadida keng qo'llanilmoqda.

Optik tolaga yuborilgan lazer impulsi shisha muhitdagi molekulyar tebranishlar bilan o'zaro ta'sirlashganda Raman sochilishi yuzaga keladi. Ushbu jarayonda sochilgan yorug'lik chastotasi boshlang'ich nurlanish chastotasidan farq qiladi. Raman spektri odatda ikki asosiy komponentdan iborat bo'ladi: Stokes va Anti-Stokes signallari.

Stokes komponentida foton energiyasining bir qismi muhit molekulalariga uzatiladi va natijada sochilgan nurning chastotasi kamayadi. Anti-Stokes jarayonida esa aksincha, molekula o'z energiyasining bir qismini fotonga beradi va sochilgan nurning chastotasi ortadi. Mazkur komponentning intensivligi muhit haroratiga bevosita bog'liq bo'lib, aynan shu xususiyat fiber-optik harorat o'lchash tizimlarining asosini tashkil etadi.

Molekulalarning yuqori energiyali tebranish holatida bo'lish ehtimoli Boltsman taqsimoti bilan aniqlanadi. Harorat ortishi bilan yuqori energiyali holatda bo'lgan molekulalar soni ko'payadi, bu esa Anti-Stokes signalining kuchayishiga olib keladi.

Mazkur nisbat haroratga sezgir bo'lgani sababli optik tolada o'lchangan signal orqali kabel bo'ylab harorat taqsimotini aniqlash mumkin.

Optik tolada sochilgan signalning qaytish vaqti ham o'lchanadi. Shu asosda signal qaysi nuqtadan qaytganligi aniqlanadi va natijada masofa bo'yicha harorat profili hosil qilinadi. Bunday yondashuv uzun sanoat obyektlarida, jumladan aeroport angarlarida yong'in manbasini tez aniqlash imkonini beradi.

Amaliy qurilmalarda tizim bir nechta asosiy funksional bloklardan tashkil topadi. Ushbu bloklar o'zaro ishlashi natijasida optik signal harorat ma'lumotiga aylantiriladi.

Lazer manbai - tizimning boshlang'ich qismi impulsi lazer hisoblanadi. Lazer ma'lum vaqt oralig'ida optik tolaga qisqa yorug'lik impulslari yuboradi. Ushbu impulslar kabel bo'ylab tarqaladi.

Optik tolali sensor liniyasi - optik kabel tizimning sezgir elementi hisoblanadi. Tolada yorug'lik harakatlanayotganda muhit molekulalari bilan o'zaro ta'sirlashadi va Raman sochilishi hosil bo'ladi. Har bir nuqtada juda kichik miqdorda sochilgan signal paydo bo'ladi.

Optik ajratgich va filtrlar - qaytgan signal lazer nuridan ajratiladi va spektr bo'yicha stokes va antistokesga bo'linadi. Spektral filtrlar kerakli signalni ajratib olish uchun xizmat qiladi. Ajratilgan optik signallar fotodetektorlar yordamida elektr signallariga aylantiriladi. Har bir kanal uchun alohida detektor ishlatiladi.

Elektr signallar raqamli protsessor orqali qayta ishlanadi.

Bu bosqichda signal qaytish vaqti, intensivlik nisbati, harorat qiymati aniqlanadi. Natijada kabel bo'ylab har bir nuqtaning harorati aniqlanadi.

Raman sochilishining fizik mohiyati

Optik tolaga yuborilgan lazer fotonlari shisha (SiO_2) panjarasidagi molekulyar tebranishlar (fononlar) bilan o'zaro ta'sirlashadi. Natijada energiya almashinuvi sodir bo'ladi va chastotasi o'zgargan sochilgan yorug'lik paydo bo'ladi.

Bu hodisa — noelastik sochilish deyiladi

Ya'ni:

$$E_{\text{chiqish}} \neq E_{\text{kirish}}$$

Foton energiyasi:

$$E = h\nu$$

bu yerda:

h — Plank doimiysi

ν — yorug'lik chastotasi

Molekula (yoki kristall panjara) energiya sathlariga ega. Raman jarayoni 2 xil bo'ladi:

1. Stokes Raman sochilishi - foton molekulaga energiya beradi natijada molekula yuqori tebranish holatiga o'tadi bu esa foton energiyasini kamaytiradi.

$$\nu_s = \nu_0 - \nu_v$$

ν_0 — lazer chastotasi

ν_v — molekulyar tebranish chastotasi

Anti-Stokes Raman sochilishi - bu jarayon faqat molekulalar oldindan uyg'ongan bo'lsa yuz beradi.

Molekula fotonga energiya beradi bunda foton energiyasi oshadi:

$$\nu_{as} = \nu_0 + \nu_v$$

Nega Anti-Stokes haroratga bog'liq? Buni quyidagicha o'rgaib chiqsak: Molekulalarning yuqori tebranish holatida bo'lish ehtimoli (P) Boltsman taqsimoti bilan aniqlanadi:

$$P \propto e^{-E_v/kT}$$

bu yerda:

E_v — tebranish energiyasi

k — Boltsman doimiysi

T — harorat

Molekulalar soni esa: $N_1 = N_0 \cdot e^{-\Delta E/kT}$

bu yerda:

N_1 — qo'zg'algan holatdagi molekulalar soni

N_0 — asosiy holatdagi molekulalar soni

ΔE — energetik farq

k — Boltsman doimiysi

T — mutloq harorat

Harorat oshsa yuqori energiyali molekulalar soni ortadi natijada Anti-Stokes signali kuchayadi.

$$\text{Demak: } N_1 / N_0 = e^{-\Delta E/kT}$$

Roman sochilish intensivligi molekularlar soniga proporsional:

$$I_{as} \sim N_1, I_s \sim N_0.$$

Shuning uchun quyidagi nisbatni olamiz:

$$\frac{I_{as}}{I_s} \sim \frac{N_1}{N_0}$$

Natijada,

$$\frac{I_{as}}{I_s} \sim e^{-\Delta E/kT}$$

Boltsman formulasi ideal gaz uchun hisoblanib amalda detektor sezgirligi, optik yo'qotishlar va tolaning spektral hususiyatlari hisobiga yuqoridagi formula

$$\frac{I_{as}}{I_s} = C \cdot e^{-\Delta E/kT}$$

ko'rinishiga keladi. C – kalibrlash koeffitsienti

Kalibrlash koeffitsiyenti — bu nazariy model bilan real o'lchov tizimi orasidagi farqni tuzatadigan doimiy koeffitsiyent.

$$\frac{I_{as}}{I_s} \sim e^{-\Delta E/kT}$$

Lekin amalda ideal sharoit bo'lmaydi. Shuning uchun tenglama quyidagiga aylanadi:

U quyidagilarni o'z ichiga oladi:

1. Detektor sezgirligi farqi - Anti-Stokes va Stokes to'lqin uzunliklari turlicha. Fotodetektor ularni bir xil sezmaydi.

2. Optik yo'qotishlar - so'rilish, tarqalish, mikroegilish yo'qotishlari (Stokes va Anti-Stokes signallari bir xil so'nmaydi).

3. Spektral filtrlarning o'tkazuvchanligi - Optik filtrlardan o'tishda intensivliklar turlicha kamayadi.

4. Lazer quvvati va elektron kuchaytirgichlar

Kalibrlash jarayoni quyidagicha, tizim ma'lum temperaturaga qo'yiladi (masalan 25°C), T ma'lum bo'lgani uchun C hisoblab chiqiladi.

$$C = \frac{I_{as}}{I_s} \cdot e^{\Delta E/kT}$$

Shundan keyin tizim boshqa temperaturalarni shu C bilan hisoblaydi.

C temperaturaga bog'liq emas (agar tizim barqaror bo'lsa). U qurilmaga xos, bir martalik kalibrlashdan keyin doimiy. Lekin vaqt o'tishi bilan tolada degradatsiya bo'lsalazer quvvati o'zgarsa C qayta aniqlanishi kerak. Agar C noto'g'ri aniqlansa,

temperatura hisoblashda xatolik paydo bo'ladi va ayniqsa yuqori temperaturada xato katta bo'ladi. Uzun masofada o'lchash aniqligi pasayadi. Shuning uchun sanoat DTS tizimlarida avtomatik kalibrlash zonalari va referens temperaturali uchastkalar ishlatiladi.

Qisqa qilib aytganda, kalibrlash koeffitsiyenti — bu nazariy Boltsman taqsimotini real optik-o'lchov tizimiga moslashtiruvchi ko'paytiruvchi doimiy.

Demak yakuniy formula:

$$\frac{I_{as}}{I_s} = C \cdot e^{-\Delta E/kT}$$

Logarifm olib:

$$T = \frac{\Delta E}{k \cdot \ln(C \frac{I_s}{I_{as}})}$$

Shu tenglama orqali optik signal harorat ga aylantiriladi. Bu — DTS tizimining fizik yuragi.

Optik tolada bu jarayon qanday sodir bo'ladi? Yorug'lik yo'qolmaydi, balki har nuqtada ozgina sochiladi. Har bir nuqta lokal "Raman" signali beradi. OTDR vaqt o'lchovi orqali qayerdan kelgani aniqlanadi. OTDR – Optical time domain reflectometer (optik vaqt domenli reflektometr) bu optik tolani masofa bo'yicha tahlil qiladigan o'lchov qurilmasi. OTDR prinsipi nafaqat haroratni, balki qayerda qizish borligini ham aniqlaydi:

$$z = \frac{c \cdot t}{2n}$$

bu yerda:

z — masofa (qizigan joy)

c — yorug'lik tezligi

n — tolada sinish ko'rsatkichi

t — qaytish vaqti

Natijada kabel bo'ylab harorat xaritasi namoyon bo'ladi.

Raman signali juda zaif ($\approx 10^{-6}$ kiruvchi signal), shuning uchun, kuchli lazer, past shovqinli fotodetektor, spektral filtrlar, signal yig'ish ishlatiladi.

Sinish ko'rsatkichi nima? Sinish ko'rsatkichi:

$$n = \frac{c}{v}$$

Bu yerda: c — vakuumdagi yorug'lik tezligi,

v — muhit ichidagi yorug'lik tezligi

Demak: n yorug'lik muhit ichida nechog'lik sekinlashganini ko'rsatadi. Kremniy dioksid (SiO_2) asosidagi standart optik tolada: $n \approx 1.44 - 1.47$.

Demak yorug'lik tezligi tolada:

$$v = \frac{3 \times 10^8}{1.45} \approx 2.07 \times 10^8$$

Ya'ni yorug'lik tolada vakuumdagiga nisbatan sekinroq harakat qiladi. Nima uchun OTDR formulasida n kerak? OTDR vaqtni o'lchaydi. Agar biz shunchaki:

$z = \frac{c \cdot t}{2}$ deb olsak, xato bo'ladi, chunki yorug'lik vakuumda emas, shishada harakat qilmoqda. Shuning uchun haqiqiy tezlik ishlatiladi: $v = \frac{c}{n}$

Natijada: $z = \frac{c \cdot t}{2n}$

Nega yorug'lik sekinlashadi? Yorug'lik tolada atom elektronlari bilan o'zaro ta'sirlashadi, elektr maydon molekulalarni qutblaydi va qayta nurlanish jarayoni yuz beradi.

Natijada faza tezligi kamayadi. Bu kvant elektrodinamika darajasida tushuntiriladi.

Agar n noto'g'ri tanlansa: masofa hisoblashda xato paydo bo'ladi 10 km da bir necha metr xato chiqishi mumkin Shuning uchun: ishlab chiqaruvchi aniq n beradi ba'zan guruh tezligi indeksi (group index) ishlatiladi.

To'liq o'lchash jarayoni (blok jarayon)

1-bosqich — Lazer yuborish

Pulsi lazer (odatda 1064 nm yoki 1550 nm) optik tolaga impuls yuboradi.

2-bosqich — Raman signal hosil bo'ladi

Tolada Stokes va Anti-Stokes signallar paydo bo'ladi.

3-bosqich — Qaytgan signal qabul qilinadi

Fotodetektorlar ikki kanalni o'lchaydi: $I_s(z)$ va $I_{as}(z)$

4-bosqich — Harorat hisoblanadi

Mikroprotessor:

$$T(z) = f\left(\ln \frac{I_{as}}{I_s}\right)$$

5-bosqich — Harorat profili quriladi

Tizim real vaqtda qayerda qizish bor, qanchalik kuchli, qanchalik tez o'smoqda

5. Yong'inni aniqlash mexanizmi

Tizim doimiy monitoring qiladi.

Agar:

$$T(z) > T_{kritik}, \quad \frac{dT}{dt} > \gamma$$

Amalda: 0.5 m – 2 m aniqlik va bir necha km uzunlik

Nega bu tizim aviatsiyada juda mos? Uning quyidagi foydali taraflari mavjud

-Uning o'zi yong'inga nisbatan passiv (uchqun chiqarmaydi)

-Portlash muhitida xavfsiz

-Elektromagnit shovqinga chidamli

- Uzoq masofani kuzatadi

- Kabelning o'zi sensor

Amaliy tizimlarda harorat quyidagi bog'lanish orqali aniqlanadi:

$$T(z) \sim \ln\left(\frac{I_{AS}(z)}{I_S(z)}\right)$$

bu yerda:

I_{AS} - Anti-Stokes signali,

I_S - Stokes signali.

Hangar uzunligi — 120 metr

Optik kabel — shift bo'ylab o'rnatilgan

Boshlang'ich harorat:

$$T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

Yong'in boshlanishi: Masalan, texnik xizmat vaqtida yonilg'i bug'i yonib ketdi.

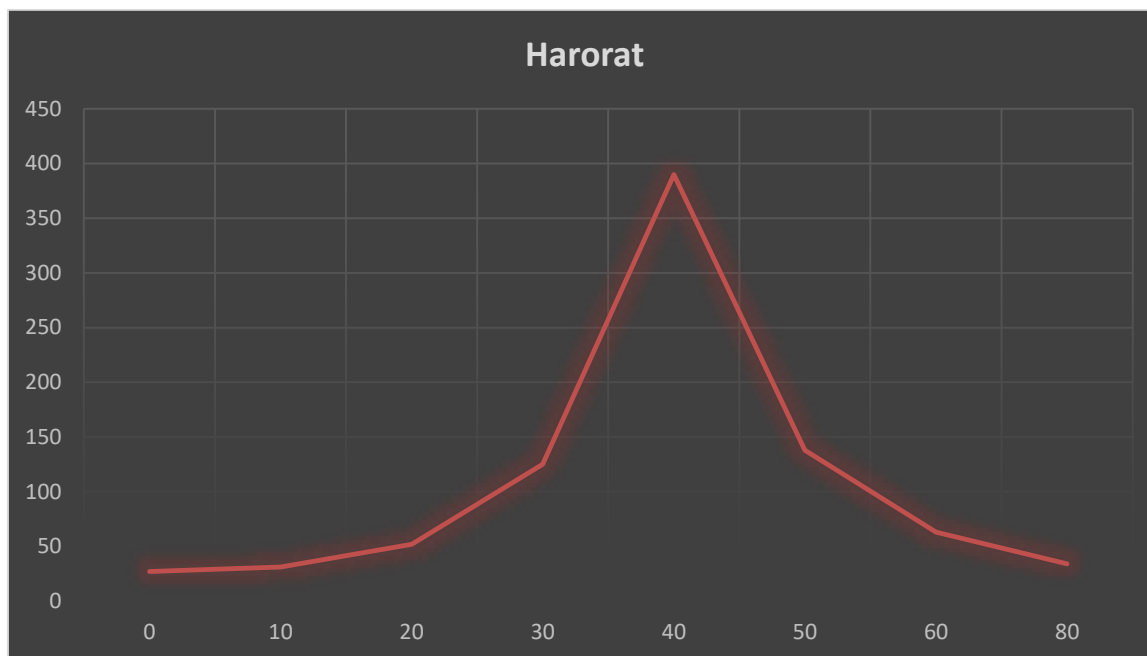
Joylashuvi: $z_0 = 40\text{m}$

Maksimal harorat: $\Delta T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$

Tizim o'lchovi

DTS quyidagi profilni ko'radi:

Masofa	Harorat
10 m	25°C
25 m	40°C
35 m	120°C
40 m	390°C
50 m	110°C
70 m	40°C



Grafikda aniq cho'qqi hosil bo'ladi.

Shu orqali tizim:

-Yong'in joyi

-Harorat

-Rivojlanish tezligini aniqlaydi.

Natijada kabel bo'ylab harorat taqsimoti hosil qilinadi.

Kamchiliklari:

-Yuqori narx: Kabel materialining faktura narxi(\$1 USD dan boshlanadi), o'rnatish xarajalari va ximoya qoplamasini hisobga olsak, standart Roman asosidagi DTS sistemasi -\$4 900 - \$5 000 (bitta set), Pro darajadagi tizimlar - \$30 000 + (ko'p kilometrli monitoring uchun). Bu narx tizimga o'z ichiga olishi mumkin – lazer Manbai, fotodetektorlar, signal qayta ishlash birligi, dasturiy ta'minot. Qo'shimcha komponentlar – optic ulagichlar, OTDR tester (sinov ulanmasi), qo'shimcha shisha himoyalangan kabel. O'rnatish va sozlash (montaj) ishlari – 15 000so'm/metr, Shuningdek O'zbekistonda import bojxona va logistika xarajatlari qo'shilishini unutmaslik kerak. Bizdagi yakuniy taxminiy diapason \$ 7.5 USD dan boshlanmoqda.

- Kalibrlash kamchiligi. Endi ikkinchi muhim masala. Asosiy formula

$$\frac{I_{as}}{I_s} = C \cdot e^{-\Delta E/kT}$$

Bu yerda C — kalibrlash koeffitsiyenti.

Agar C noto'g'ri bo'lsa butun temperatura hisob noto'g'ri bo'ladi. Kalibrlash nimaga sezgir? Lazer qarishi bilan chiqish quvvati kamayadi. Fotodiod sezgirligi vaqt o'tishi bilan o'zgaradi. Namlik, radiatsiya, mexanik stress sinish ko'rsatkichini ozgina o'zgartirishi mumkin. Stokes va Anti-Stokes turli to'lqin uzunlikda turli. Matematik jihatdan xatolik qanday o'sadi? Temperatura formulasi:

$$T = \frac{\Delta E}{k \cdot \ln\left(C \frac{I_s}{I_{as}}\right)}$$

Agar C da kichik xato bo'lsa, logarifm ichidagi nisbat o'zgaradi natijada yuqori temperaturada xatolik kuchayadi.

Amaliy oqibatlar 1–2% kalibrlash xatosi 3–5°C temperatura xatosiga olib kelishi mumkin. Uzoq masofada xato ortadi va issiq nuqta noto'g'ri baholanishi mumkin.

Aeroport yoqilg'i omborlarida bu xavfli. Angarda esa uzoq masofali harorat o'lchash aniqligini cheklovchi asosiy omillardir. Ayniqsa Anti-Stokes signalining past intensivligi tufayli shovqin ta'siri kuchayadi va temperatura hisoblashda nolinear xatolik yuzaga keladi.

To'g'ri bu jarayonni referens nuqtalari, dual tizimli o'lchash, avtomatik algoritmlar, signal quvvatini kuchaytirish va muntazam xizmat orqali bartaraf etish mumkin. Lekin buy ana xarajatlar va vaqtni oshiradi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI:

1. Z. Liu et al., "Multifunctional smart optical fibers: materials, fabrication, and sensing applications," *Photonics*, 6 48 <https://doi.org/10.3390/photonics6020048> (2019). Google Scholar

2. S. Pissadakis, "Lab-in-a-fiber sensors: a review," *Microelectron. Eng.*, 217 111105 <https://doi.org/10.1016/j.mee.2019.111105> MIENEF 0167-9317 (2019). Google Scholar

3. R. Min et al., "Optical fiber sensing for marine environment and marine structural health monitoring: a review," *Opt. Laser Technol.*, 140 107082 <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107082> OLT CAS 0030-3992 (2021). Google Scholar

4. M. F. Bado and J. R. Casas, "A review of recent distributed optical fiber sensors applications for civil engineering structural health monitoring," *Sensors*, 21 (5), 1818 <https://doi.org/10.3390/s21051818> SNSRES 0746-9462 (2021). Google Scholar

5. Y.-N. Zhang et al., "Optical fiber sensors for measurement of heavy metal ion concentration: a review," *Measurement*, 158 107742 <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107742> 0263-2241 (2020). Google Scholar

6. Y. Zheng et al., "Review of fiber optic sensors in geotechnical health monitoring," *Opt. Fiber Technol.*, 54 102127 <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2019.102127> 1068-5200 (2020). Google Scholar

7. T. He et al., "Review on optical fiber sensors for hazardous-gas monitoring in mines and tunnels," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 72 7003722 <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3273691> IEIMAO 0018-9456 (2023). Google Scholar
8. W. Zhu et al., "Enhanced sensitivity of heterocore structure surface plasmon resonance sensors based on local microstructures," *Opt. Eng.*, 57 (7), 076105 <https://doi.org/10.1117/1.OE.57.7.076105> (2018). Google Scholar
9. Z. Shi et al., "Applications of online UV-Vis spectrophotometer for drinking water quality monitoring and process control: a review," *Sensors*, 22 (8), 2987 <https://doi.org/10.3390/s22082987> SNSRES 0746-9462 (2022). Google Scholar
10. K. B. Beć, J. Grabska and C. W. Huck, "Near-infrared spectroscopy in bio-applications," *Molecules*, 25 (12), 2948 <https://doi.org/10.3390/molecules25122948> (2020). Google Scholar
11. T. Chen et al., "Rapid identification of soil cadmium pollution risk at regional scale based on visible and near-infrared spectroscopy," *Environ. Pollut.*, 206 217 –226 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.07.009> (2015). Google Scholar
12. L. M. Labine and M. J. Simpson, "The use of nuclear magnetic resonance (NMR) and mass spectrometry (MS)-based metabolomics in environmental exposure assessment," *Curr. Opin. Environ. Sci. Health*, 15 7 –15 <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2020.01.008> (2020). Google Scholar