

**NAVIGATSION VA OPTIK UZATUVCHI TIZIMLAR: ZAMONAVIY
TEXNOLOGIYALAR, INTEGRATSIYA VA KELAJAK ISTIQBOLLARI**

Nazirov A'zamjon Azizjon o'g'li

Farg'ona davlat universiteti 4-kurs talabasi

Umarov Bekzod Azizovich

Farg'ona davlat universiteti

Pedagogika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

MAQOLA MALUMOTI

MAQOLA TARIXI:

Received: 23.12.2025

Revised: 24.12.2025

Accepted: 25.12.2025

KALIT SO'ZLAR:

*GNSS, optik uzatish, FSOC,
FOG, integrallashgan fotonika,
kvant navigatsiyasi, Galileo
HAS, LEO, PNT, MEMS,
inertial navigatsiya, aniqlik*

ANNOTATSIYA:

Ushbu maqolada navigatsiya va optik uzatuvchi tizimlarning zamonaviy holati, o'zaro integratsiyasi va rivojlanish istiqbollari chuqur tahlil qilingan. Global Navigatsiya Sun'iy Yo'ldosh Tizimlarining GNSS (Global Navigation Satellite Systems) mavjud cheklovlari, xususan, signallarning zaifligi va tashqi xalaqitlarga moyilligi ko'rib chiqilgan. Ushbu muammolarni hal qilishda optik texnologiyalarning, jumladan, optik tolali aloqa, erkin fazo optik aloqa FSOC (Free-Space Optical Communication), optik tolali giroskoplari FOG (Fiber-Optic Gyroscope) va integrallashgan fotonikaning o'rni yoritilgan. Maqolada GNSS tizimlarining (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) modernizatsiyasi, Galileo High Accuracy Service HAS (High Accuracy Service) kabi yuqori aniqlikdagi xizmatlarning paydo bo'lishi va ularning imkoniyatlari qiyosiy jadvallar orqali ko'rsatilgan. Shuningdek, FOG va mikroelektromexanik tizimlar MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) kabi inertial navigatsiya texnologiyalari taqqoslangan. Kelajakdagi yutuqlar sifatida kvant navigatsiyasi va past Yer orbitasi LEO (Low Earth Orbit) PNT tizimlari PNT (Positioning,

Navigation, and Timing) kabi ilg'or texnologiyalarning potentsiali muhokama qilingan. Tadqiqot GNSS va optik tizimlar bozorining o'sish tendensiyalarini grafiklar yordamida vizualizatsiya qiladi va ushbu sohalarning sinergiyasi kelajakdagi avtonom va yuqori aniqlikdagi navigatsiya tizimlarini yaratish uchun poydevor bo'lishini ta'kidlaydi.

Kirish

XXI asr texnologik inqiloblar davri bo'lib, unda joylashuvni aniqlash, navigatsiya va vaqtni sinxronlash (Positioning, Navigation, and Timing - PNT) xizmatlari kundalik hayotimiz va sanoatning deyarli barcha sohalariga chuqur singib ketdi. Global Navigatsiya Sun'iy Yo'ldosh Tizimlari (GNSS), xususan, Amerika Qo'shma Shtatlarining Global Pozitsiyalash Tizimi (GPS), transport, logistika, qishloq xo'jaligi, qurilish va hatto moliyaviy operatsiyalarda ajralmas vositaga aylandi. 2025-yilda global GNSS (Global Navigation Satellite System) bozori hajmi 335.04 milliard va 2032-yilga kelib 703.21 milliard dollarga yetishi prognoz qilinmoqda, bu esa yillik o'rtacha 11.17% o'sishni ko'rsatadi. Ushbu o'sish avtonom transport vositalari, uchuvchisiz uchish apparatlari (dronlar) va "buyumlar interneti" (IoT) kabi yangi paydo bo'layotgan texnologiyalarga bo'lgan talabning ortib borishi bilan bog'liq. Biroq, GNSS tizimlarining keng tarqalishiga qaramay, ular bir qator jiddiy cheklovlarga va zaifliklarga ega. Sun'iy yo'ldoshlardan kelayotgan signallar o'ta zaif bo'lib, ular zich shahar sharoitida, binolar ichida, tunnellar yoki qalin o'rmonlarda osongina to'silib qolishi mumkin. Bundan tashqari, bu signallar ataylab yaratilgan radiochastota xalaqitlari (jamming) yoki yolg'on signallar bilan almashtirish (spoofing) kabi hujumlarga juda moyil. Bunday zaifliklar, ayniqsa, harbiy, aviatsiya va boshqa strategik ahamiyatga ega sohalarda jiddiy xavf tug'diradi. Masalan, 2025-yilda GPS signallarining buzilishi aviatsiya xavfsizligiga tahdid solayotgani va bu muammoni hal qilish uchun yangi yechimlar izlanayotgani haqida xabarlar paydo bo'ldi.

Ushbu muammolarga javoban, ilmiy hamjamiyat va sanoat vakillari navigatsiya tizimlarining ishonchliligi, aniqligi va mustahkamligini oshirish uchun muqobil va qo'shimcha texnologiyalarni faol ravishda o'rganmoqdalar. Shu nuqtai nazardan, optik uzatuvchi tizimlar va texnologiyalar ulkan salohiyatga ega ekanligini namoyon etmoqda. Optik texnologiyalar, jumladan, optik tolali aloqa, erkin fazo optik aloqa (FSOC), optik tolali giroskoplar (FOG) va integrallashgan fotonika, ma'lumotlarni yuqori tezlikda, keng polosada va elektromagnit xalaqitlardan himoyalangan holda uzatish imkonini beradi.

Optik texnologiyalarning navigatsiyaga integratsiyasi bir necha asosiy yo'nalishlarda amalga oshirilmoqda. Birinchidan, optik tolali giroskoplarga (FOG) asoslangan inertial navigatsiya tizimlari (INS) GNSS signallari mavjud bo'lmagan sharoitlarda (GPS-denied environments) harakatni yuqori aniqlikda kuzatib borish imkonini beradi. Ikkinchidan, sun'iy yo'ldoshlararo optik aloqa (intersatellite optical links) GNSS tizimlarining yer usti stansiyalariga bog'liqligini kamaytirib, ularning avtonomligini va aniqligini oshirishi mumkin. Uchinchidan, NASA kabi tashkilotlar tomonidan ishlab chiqilayotgan optik navigatsiya (OpNav) texnologiyalari sayyoralararo missiyalarda kosmik kemalarning o'z joylashuvini kameralar va sensorlar yordamida mustaqil ravishda aniqlashiga yordam beradi.

Ushbu ilmiy maqolaning asosiy maqsadi – zamonaviy navigatsiya tizimlari, xususan GNSS, va optik uzatuvchi tizimlar o'rtasidagi sinergiyani chuqur o'rganishdir. Maqolada GNSS tizimlarining so'nggi yutuqlari, optik texnologiyalarning asosiy turlari va ularning navigatsiyadagi qo'llanilishi, shuningdek, kvant navigatsiyasi kabi kelajakdagi istiqbolli yo'nalishlar tahlil qilinadi. Tadqiqot natijalari navigatsiya tizimlarining aniqligini, ishonchliligini va xavfsizligini oshirishga qaratilgan yangi yondashuvlarni ishlab chiqish uchun ilmiy va amaliy asos bo'lib xizmat qiladi.

1. Global Navigatsiya Sun'iy Yo'ldosh Tizimlarining (GNSS) Zamonaviy Holati va Rivojlanish Tendensiyalari: Global Navigatsiya Sun'iy Yo'ldosh Tizimlari (GNSS) butun dunyo bo'ylab foydalanuvchilarga PNT xizmatlarini taqdim etuvchi sun'iy yo'ldoshlar turkumidan iborat. Bugungi kunda bir nechta global va regional tizimlar faoliyat yuritmoqda, ular doimiy ravishda modernizatsiya qilinib, aniqlik va ishonchlilik darajasi oshirib borilmoqda. Asosiy global tizimlarga AQShning GPS, Rossiyaning GLONASS, Yevropa Ittifoqining Galileo va Xitoyning BeiDou tizimlari kiradi.

GPS (Global Positioning System) tizimi eng birinchi va eng keng tarqalgan GNSS hisoblanadi. Tizim doimiy ravishda yangilanmoqda. 2024-yilda amalga oshirilgan "aniqlikni yaxshilash tashabbusi" natijasida Signal-in-Space Range Error (SISRE) ko'rsatkichi taxminan 30% ga kamaytirildi, bu esa GPSning BeiDou kabi raqobatchilar bilan raqobatbardoshligini saqlab qolishga yordam berdi. GPS III seriyasidagi yangi sun'iy yo'ldoshlar kuchliroq signallar, yangi fuqarolik chastotasi (L1C) va xalaqitlarga qarshi yaxshilangan himoyani ta'minlaydi.

GLONASS (Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) tizimi o'zining noyob orbital konfiguratsiyasi tufayli yuqori kengliklarda (shimoliy va janubiy qutblarga yaqin hududlarda) GPSga qaraganda yuqori aniqlikni ta'minlaydi. Hozirda GLONASS-K2 kabi yangi avlod sun'iy yo'ldoshlari uchirilmoqda. Ular an'anaviy FDMA signallari bilan bir qatorda qo'shimcha CDMA signallarini ham uzatadi, bu esa tizimning moslashuvchanligi va aniqligini oshiradi.

Galileo – Yevropa Ittifoqi tomonidan ishlab chiqilgan fuqarolik nazorati ostidagi tizim bo'lib, boshqa tizimlarga nisbatan yuqori aniqlikni va'da qiladi. Uning eng muhim yutuqlaridan biri bu High Accuracy Service (HAS) – yuqori aniqlikdagi xizmatdir. 2023-yil yanvar oyida ishga tushirilgan HAS, Precise Point Positioning (PPP) algoritmidan foydalanib, real vaqt rejimida gorizontal o'lchamda 20 sm va vertikal o'lchamda 40 sm gacha aniqlikni bepul ta'minlaydi. Bu xizmat Galileo E6-B signali va internet orqali uzatiladigan tuzatishlar (orbit, soat va signallar xatoliklari) yordamida ishlaydi va nafaqat Galileo, balki GPS signallarini ham qo'llab-quvvatlaydi.

BeiDou (BDS) – Xitoyning global navigatsiya tizimi bo'lib, so'nggi yillarda jadal rivojlandi. BDS-3 global xizmat ko'rsatishni boshlaganidan so'ng, uning aniqligi sezilarli darajada oshdi. 2024-yilgi ma'lumotlarga ko'ra, BDS sun'iy yo'ldoshlarining orbitasini aniqlash xatoligi 5 sm dan, soat xatoligi esa 0.15 nanosekunddan kamroqni tashkil etadi. BeiDou shuningdek, desimetr darajasidagi aniqlikni ta'minlaydigan yangi xizmatlarni joriy etishni rejalashtirmoqda.

Ushbu tizimlarning modernizatsiyasi va yangi xizmatlarning joriy etilishi ko'p tizimli (multi-constellation) qabul qilgichlarning ahamiyatini oshirmoqda. Bir vaqtning o'zida bir nechta tizimdan signallarni qabul qilish orqali foydalanuvchilar ko'proq sun'iy yo'ldoshlarni "ko'rish" imkoniyatiga ega bo'ladi, bu esa, ayniqsa, shahar kanyonlari kabi qiyin sharoitlarda pozitsiyani aniqlashning ishonchliligi va aniqligini keskin oshiradi. Quyidagi jadvalda asosiy GNSS tizimlarining asosiy xususiyatlari qiyosiy tahlil qilingan.

Jadval 1. Asosiy GNSS tizimlarining qiyosiy tahlili (2024-2025 yillar ma'lumotlari asosida)

Xususiyat	GPS (AQSh)	GLONASS (Rossiya)	Galileo (Yevropa Ittifoqi)	BeiDou (Xitoy)
Operator	AQSh Kosmik Kuchlari	Roskosmos	Yevropa Ittifoqi Kosmik Dasturlar Agentligi (EUSPA)	Xitoy Milliy Kosmik Boshqarmasi (CNSA)
Sun'iy yo'ldoshlar soni (orbitada)	~31	~24	~28 kengaymoqda	~45 (global va regional)
Standart aniqlik (ochiq xizmat)	3-5 metr	3-7 metr	1-5 metr	Gorizontal < 2 m, Vertikal < 4 m

Yuqori aniqlikdagi xizmatlar/ Xususiyatlar	GPS III/IIIF modernizatsiyasi, L1C/L2C/L5 signallari, GDGPS	GLONASS- K/K2 modernizatsiyasi , CDMA signallari, yuqori kengliklarda yaxshi qamrov	High Accuracy Service (HAS) - 20 sm gacha aniqlik (bepul), Open Service Navigation Message Authenticatio n (OSNMA)	Precise Point Positioning (PPP) xizmati (desimetr darajasida), qisqa xabar almashinuvi (SMS)
---	---	---	---	---

2. Optik Uzatuvchi Tizimlar: Asosiy Texnologiyalar va Ko'rsatkichlar

Optik uzatuvchi tizimlar ma'lumotlarni yorug'lik signallari ko'rinishida uzatishga asoslangan bo'lib, ular an'anaviy radiochastotali (RF) tizimlarga nisbatan bir qator afzalliklarga ega: juda yuqori o'tkazuvchanlik qobiliyati, keng polosa, past kechikish va elektromagnit xalaqitlarga (EMI) yuqori chidamlilik. Bu xususiyatlar ularni navigatsiya tizimlarining imkoniyatlarini kengaytirish uchun ideal nomzodga aylantiradi. Asosiy optik texnologiyalarga optik tolali aloqa va erkin fazo optik aloqasi kiradi.

2.1. Optik Tolali Aloqa (Fiber-Optic Communication)

Optik tolali aloqa ma'lumotlarni shisha yoki plastmassadan yasalgan ingichka tolalar orqali yorug'lik impulsleri sifatida uzatadi. Bu texnologiyaning asosida "to'liq ichki qaytish" hodisasi yotadi, bunda yorug'lik tolasi yadrosining sindirish ko'rsatkichi uni o'rab turgan qobiqlikdan yuqori bo'lgani uchun yorug'lik tolasi ichida "qamalib" qoladi. Optik tolaning ishlash samaradorligini belgilovchi asosiy ko'rsatkichlar quyidagilardir:

O'tkazuvchanlik Polosasi (Bandwidth): Tolaning ma'lumot uzatish tezligini belgilaydi. U odatda MHz-km bilan o'lchanadi. Polosani cheklovchi asosiy omil dispersiyadir.

So'nish (Attenuation): Signalning tolada tarqalishi davomida quvvatining kamayishi. So'nishga tolaning materiali, egilishlar va ulanishlar sabab bo'ladi. U dB/km bilan o'lchanadi.

Dispersiya (Dispersion): Yorug'lik impulslerinin vaqt o'tishi bilan yoyilib ketishi. Xromatik va modal dispersiya turlari mavjud bo'lib, ular uzatish tezligi va masofasini cheklaydi.

Aerokosmik va mudofaa sohalarida optik tolali aloqa an'anaviy mis kabellarga ajoyib muqobil bo'lmoqda. Uning yengilligi, yuqori ma'lumot uzatish tezligi va EMI ga chidamliligi samolyotlar, sun'iy yo'ldoshlar va harbiy texnikalardagi ma'lumotlar almashinuvi tizimlarining samaradorligi va ishonchliligini oshiradi.

2.2. Erkin Fazo Optik Aloqasi (Free-Space Optical Communication - FSOC):

FSOC texnologiyasi ma'lumotlarni havo yoki vakuum orqali modulyatsiyalangan lazer nurlari yordamida uzatadi. Tizim uzatgich (lazer) va qabul qilgichdan (fotodetektor) iborat bo'lib, ular o'rtasida to'g'ridan-to'g'ri ko'rish chizig'i bo'lishi talab etiladi. FSOC ning asosiy afzalliklari:

1. **Juda yuqori ma'lumot uzatish tezligi:** FSOC tizimlari Gbps dan Tbps gacha bo'lgan tezliklarga erisha oladi. Masalan, 2025-yilda 1 km masofada 100 Gbps tezlikdagi barqaror lazer aloqasi namoyish etildi.

2. **Litsenziyasiz spektr:** Ko'pgina FSOC tizimlari radiochastota spektridan farqli o'laroq, litsenziyalashni talab qilmaydigan infraqizil diapazonda (masalan, 1550 nm) ishlaydi.

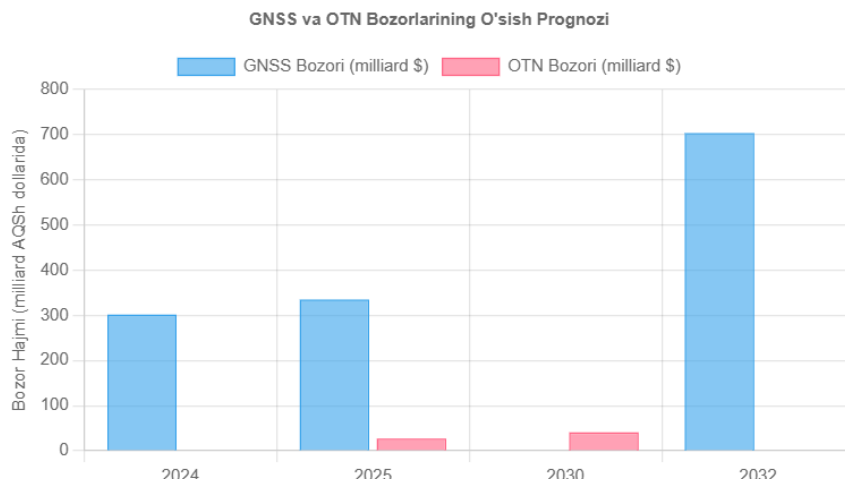
3. **Yuqori xavfsizlik:** Lazer nurining tor yo'naltirilganligi tufayli signalni tutib olish va eshitish juda qiyin, bu esa uni harbiy aloqa uchun jozibador qiladi.

Biroq, FSOC ning yer yuzasidagi qo'llanilishi bir qator qiyinchiliklarga duch keladi. Atmosfera sharoitlari, masalan, tuman (10-100 dB/km gacha so'nishga olib kelishi mumkin), yomg'ir, qor va havo turbulenti (stsintillyatsiya) signal sifatiga salbiy ta'sir ko'rsatadi. Shunga qaramay, FSOC kosmosda, xususan, sun'iy yo'ldoshlararo aloqa (satellite-to-satellite) uchun juda samarali. Atmosfera yo'qligi sababli, kosmosda ma'lumot uzatish tezligi terabit/sekund (Tbps) darajasiga yetishi mumkin. Bu texnologiya kelajakda avtonom va yerga bog'lanmagan GNSS tizimlarini yaratishda hal qiluvchi rol o'ynashi kutilmoqda.

Bozor Tahlili: GNSS va Optik Aloqa Sanoatining O'sishi

GNSS va optik aloqa bozorlari texnologik innovatsiyalar va ortib borayotgan talab tufayli barqaror o'sishni namoyish etmoqda. Fortune Business Insights ma'lumotlariga ko'ra, global GNSS bozori 2025-yildagi 335.04 milliard dollardan 2032-yilga kelib 703.21 milliard dollarga yetishi kutilmoqda. Bu o'sishning asosiy drayverlari avtonom transport vositalari, aqlli shaharlar, aniq dehqonchilik va 5G infratuzilmasining rivojlanishidir. Shimoliy Amerika mintaqasi 2025-yilda bozorning 40.56% ulushi bilan yetakchilik qilmoqda, bu mintaqadagi ilg'or aerokosmik infratuzilma va mudofaa sohasidagi katta sarmoyalar bilan izohlanadi. O'z navbatida, optik aloqa va tarmoq uskunalari bozori ham jadal kengaymoqda. Mordor Intelligence tahliliga ko'ra, optik transport tarmog'i (OTN) bozori 2025-yildagi 27 milliard dollardan 2030-yilga kelib 40.44 milliard dollarga o'sishi prognoz qilinmoqda, bu yillik 8.42% o'sishni anglatadi. Bu o'sish ma'lumotlar markazlari o'rtasidagi aloqa (DCI) uchun o'tkazuvchanlikka bo'lgan talabning keskin ortishi, sun'iy intellekt (AI) klasterlari va bulutli hisoblashlarning kengayishi bilan bog'liq. Ayniqsa, 400–800 Gbit/s tezlikdagi kanallar segmenti 2030-yilgacha yillik 22% o'sish sur'ati bilan eng tez rivojlanayotgan segment bo'lishi kutilmoqda.

Quyidagi grafikda ushbu ikki bozorning prognoz qilingan o'sish dinamikasi vizual tarzda taqqoslangan.



Grafik 1. Global GNSS va Optik Transport Tarmog'i (OTN) bozorlarining prognoz qilinayotgan o'sishi (milliard AQSh dollarida).

Grafikdan ko'rinib turibdiki, ikkala bozor ham kelgusi yillarda sezilarli o'sish potentsialiga ega. GNSS bozorining kattaroq hajmi uning iste'molchi elektronikasi, avtomobilsozlik va boshqa ko'plab ommaviy bozorlarga chuqur integratsiyalashgani bilan bog'liq. Optik aloqa bozori esa asosan telekommunikatsiya operatorlari, ma'lumotlar markazlari va yirik korxonalar kabi infratuzilma darajasidagi talabga asoslanadi. Ushbu ikki sohaning birgalikda rivojlanishi kelajakda yuqori tezlikdagi va yuqori aniqlikdagi ma'lumotlarga asoslangan yangi xizmatlar va ilovalarning paydo bo'lishiga zamin yaratadi.

3. Navigatsiyada Optik Texnologiyalarning Integratsiyasi

GNSS tizimlarining zaifliklarini bartaraf etish va ularning imkoniyatlarini kengaytirish uchun optik texnologiyalarni navigatsiyaga integratsiya qilish tobora dolzarb bo'lib bormoqda. Bu integratsiya bir necha muhim yo'nalishlarda amalga oshirilmoqda, jumladan: inertial navigatsiya tizimlarini takomillashtirish, sun'iy yo'ldoshlararo aloqani yo'lga qo'yish va yangi turdagi optik sensorlarni yaratish.

3.1. Optik Tolali Giroskoplar (Fiber Optic Gyroscopes - FOG)

Optik tolali giroskoplar (FOG) harakatlanuvchi qismlarga ega bo'lmagan, yuqori aniqlikdagi burchak tezligini o'lchash qurilmalaridir. Ularning ishlash prinsipi Sanyak (Sagnac) effektiga asoslangan: yorug'lik nuri yopiq kontur (optik tola g'altagi) bo'ylab bir-biriga qarama-qarshi yo'nalishda harakatlanganda, konturning aylanishi natijasida nurlar bosib o'tadigan yo'llar orasida faza farqi yuzaga keladi. Bu faza farqi aylanish tezligiga to'g'ridan-to'g'ri proporsionaldir.

FOGlar **inertial navigatsiya tizimlarining (INS)** muhim tarkibiy qismidir. INS akselerometrlar va giroskoplar yordamida ob'ektning boshlang'ich holatiga nisbatan uning o'rnini, yo'nalishini va tezligini tashqi signallarsiz (masalan, GNSS) hisoblab boradi. FOGlar yuqori aniqlik, past drift (nol nuqtasining siljishi) va uzoq muddatli barqarorlik kabi

xususiyatlari tufayli, ayniqsa aviatsiya, kosmonavtika, suv osti kemalari va strategik raketa tizimlari kabi yuqori talablar qo'yiladigan sohalarda keng qo'llaniladi.

FOG texnologiyasi ko'pincha arzonroq va ixchamroq bo'lgan Mikro-elektromexanik tizimlar (MEMS) giroskoplari bilan taqqoslanadi. MEMS giroskoplari tebranish massasining Koriolis effekti asoslangan bo'lib, ular iste'molchi elektronika, avtomobillar va dronlar kabi ko'plab ilovalarda ustunlik qiladi. Biroq, yuqori aniqlik talab etiladigan vazifalarda FOGlar o'z afzalliklarini namoyon etadi.

Jadval 2. Giroskop Texnologiyalarining Qiyosiy Tahlili: FOG va MEMS

Parametr	FOG (Optik Tolali Giroskop)	MEMS (Mikro-elektromexanik Tizim)
Ishlash prinsipi	Sanyak effekti (yorug'lik fazasi siljishi)	Koriolis effekti (tebranuvchi massa)
Aniqlik (Nol nuqtasi barqarorligi)	Juda yuqori (0.001 - 1 °/soat)	O'rtacha dan yuqorigacha (0.5 - 100 °/soat)
Burchakli tasodifiy yurish (ARW)	Juda past (°/√soat)	Pastdan o'rtachagacha
Hajmi va og'irligi	Kattaroq va og'irroq	Juda ixcham va yengil
Narxi	Yuqori	Past
Tashqi ta'sirlarga chidamlilik	Tebranish va harorat o'zgarishlariga yuqori chidamlilik	Tebranish va zarbalarga chidamli, lekin yuqori aniqlikdagi modellar sezgir bo'lishi mumkin
Asosiy qo'llanilish sohalari	Aerokosmik, mudofaa, suv osti navigatsiyasi, strategik darajadagi INS	Iste'molchi elektronikasi (smartfonlar), avtomobilsozlik, dronlar, taktik darajadagi INS

3.2. Integrallashgan Fotonika (Integrated Photonics)

Integrallashgan fotonika (yoki fotonli integral sxemalar - PIC) optik komponentlarni (lazerlar, modulatorlar, fotodetektorlar va boshqalar) yagona kremniy chipiga joylashtirish texnologiyasidir. Bu elektron mikrosxemalarga o'xshash bo'lib, optik tizimlarning hajmini, og'irligini, quvvat sarfini va narxini (Size, Weight, Power, and Cost - SWaP-C) keskin kamaytirish imkonini beradi.

Navigatsiya sohasida integrallashgan fotonika inqilobiy o'zgarishlarga olib kelishi mumkin. Masalan, Anello Photonics kompaniyasi kremniy fotonikasi asosidagi optik giroskop (Silicon Photonics Optical Gyroscope - SiPhOG™) texnologiyasini ishlab chiqmoqda. Bu texnologiya FOGning yuqori aniqligini MEMSning ixchamligi va arzonligi bilan birlashtirishni maqsad qilgan. EMCORE kabi boshqa kompaniyalar ham FOG

texnologiyasini planar optik chipga integratsiya qilib, an'anaviy alohida komponentlardan voz kechishmoqda. Bunday yondashuvlar yuqori aniqlikdagi inertial navigatsiya tizimlarini avtonom avtomobillar, robotlar va shaxsiy qurilmalar kabi kengroq bozorlar uchun ochiq qiladi.

Bundan tashqari, integrallashgan fotonika kosmik aloqa va zondlash uchun ham muhim ahamiyatga ega. PIC'lar sun'iy yo'ldoshlararo lazerli aloqa tizimlarini, LiDAR (Light Detection and Ranging) qurilmalarini va boshqa optik sensorlarni miniatyuralashtirish imkonini beradi. Bu esa sun'iy yo'ldoshlarning massasini kamaytiradi va ularning funktsionalligini oshiradi.

3.3. Optik Navigatsiya (Optical Navigation - OpNav)

Optik navigatsiya – ob'ektning joylashuvini va harakatini aniqlash uchun kameralar va boshqa optik sensorlardan olingan tasvirlardan foydalanish usulidir. Ushbu usul, ayniqsa, GNSS signallari mavjud bo'lmagan yoki ishonchsiz bo'lgan muhitlarda, masalan kosmosda yoki suv ostida juda foydalidir.

NASA o'zining sayyoralararo missiyalarida optik navigatsiyadan faol foydalanadi. Masalan, Artemis I missiyasida OpNav tizimi Oy va Yerning minglab tasvirlarini muvaffaqiyatli qayta ishlash orqali kosmik kemaning traektoriyasini yuqori aniqlikda tasdiqladi. Bu texnologiya kelajakdagi astronavtlar va robotlarga Oy yoki Mars yuzasida mustaqil ravishda harakatlanish imkonini beradi.

Yer yuzida esa, optik oqim sensorlari (optical flow sensors) kabi texnologiyalar dronlar va robotlarning yerga nisbatan harakatini o'lchash uchun ishlatiladi. Ular odatda INS va boshqa sensorlar bilan birgalikda ishlatilib, navigatsiya tizimining umumiy aniqligi va ishonchliligini oshiradi. INS/GPS tizimining azimuth burchagi aniqligi past bo'lgan hollarda, noma'lum yerdagi ob'ektni optik kuzatish orqali bu aniqlik sezilarli darajada yaxshilanishi mumkin.

4. Kelajak Istiqbollari: Kvant Navigatsiyasi va LEO PNT

Navigatsiya texnologiyalari sohasidagi tadqiqotlar faqat mavjud tizimlarni takomillashtirish bilan cheklanib qolmayapti. Fizikaning fundamental qonunlariga asoslangan mutlaqo yangi yondashuvlar paydo bo'lmoqda, ular kelajakda joylashuvni aniqlashda inqilob yasashi mumkin.

4.1. Kvant Navigatsiyasi (Quantum Navigation)

Kvant navigatsiyasi kvant mexanikasi prinsiplaridan, xususan, kvant sensorlari va atom soatlaridan foydalanib, tashqi signallarga tayanmagan holda o'ta yuqori aniqlikdagi navigatsiyani ta'minlashga qaratilgan. Bu texnologiya, ayniqsa, GPS signallari bostiriladigan yoki mavjud bo'lmagan harbiy va strategik ilovalar uchun juda muhimdir.

Kvant navigatsiyasining asosini quyidagi texnologiyalar tashkil etadi:

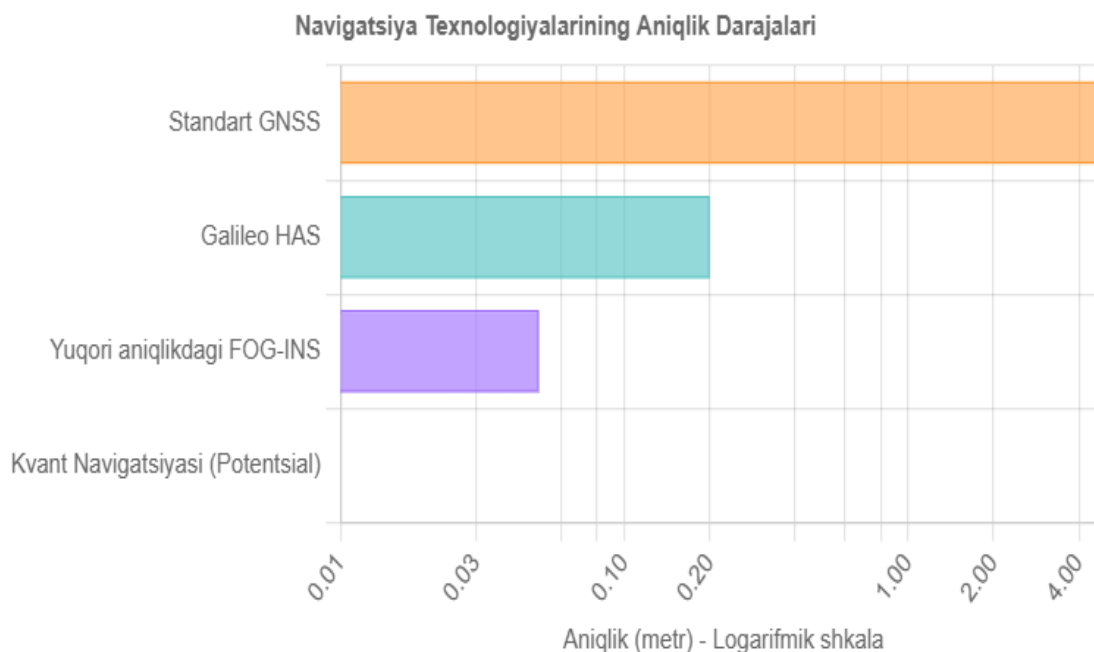
Optik Atom Soatlari: An'anaviy atom soatlarga qaraganda minglab marta aniqroq bo'lgan optik atom soatlari vaqtni o'lchashda misli ko'rilmagan aniqlikni ta'minlaydi. Bu esa pozitsiyani aniqlashda santimetr darajasidagi aniqlikka erishish imkonini beradi.

Kvant Sensorlari (Akselerometrlar va Giroskoplar): Sovuq atom interferometriyasiga asoslangan kvant sensorlari gravitatsiya va aylanishni klassik sensorlarga qaraganda ancha yuqori sezgirlik bilan o'lchay oladi. Bu inertial navigatsiya tizimlarining vaqt o'tishi bilan to'planadigan xatoliklarini keskin kamaytiradi.

Magnit Navigatsiya: Kvant sensorlari Yerning magnit maydonidagi juda kichik o'zgarishlarni ham aniqlay oladi. Ushbu ma'lumotlardan magnit maydon xaritalari bilan birgalikda foydalanib, GPSsiz navigatsiya amalga oshirilishi mumkin.

2025-yilda o'tkazilgan sinovlar shuni ko'rsatdiki, kvant navigatsiya tizimlari an'anaviy GPS zaxira tizimlariga qaraganda 50-100 baravar yuqori aniqlikka erisha oladi. Inflection kabi kompaniyalar kvant optik atom soatlarini suv osti avtonom apparatlariga muvaffaqiyatli o'rnatib, GPSsiz navigatsiya yo'lida muhim qadam tashladilar.

Quyidagi grafikda turli navigatsiya texnologiyalarining erishish mumkin bo'lgan aniqlik darajalari taqqoslangan.



Grafik 2. Turli navigatsiya texnologiyalarining taxminiy aniqlik darajalarini taqqoslash.

4.2. Past Yer Orbitasi PNT (Low Earth Orbit PNT - LEO PNT)

An'anaviy GNSS sun'iy yo'ldoshlari O'rta Yer Orbitasida (MEO), taxminan 20,000 km balandlikda joylashgan. So'nggi yillarda PNT xizmatlarini Past Yer Orbitasida (LEO), ya'ni 2000 km gacha bo'lgan balandlikda joylashgan sun'iy yo'ldoshlar turkumi orqali taqdim etish g'oyasi faol rivojlanmoqda [57]. LEO PNT bir qator potentsial afzalliklarga ega:

1. **Kuchliroq signallar:** Sun'iy yo'ldoshlar Yerga yaqinroq bo'lgani uchun ularning signallari MEO sun'iy yo'ldoshlarinikiga qaraganda ancha kuchliroq bo'ladi. Bu esa signallarning binolar ichiga va shahar kanyonlariga kirib borishini yaxshilaydi va xalaqitlarga chidamliligini oshiradi.

2. **Tezroq konvergentsiya:** LEO sun'iy yo'ldoshlarining tez harakati tufayli geometriya tez o'zgaradi, bu esa yuqori aniqlikdagi pozitsiyani hisoblash uchun zarur bo'lgan vaqtni (konvergentsiya vaqti) qisqartirishi mumkin.

3. **Arzonroq infratuzilma:** LEO sun'iy yo'ldoshlari odatda kichikroq va arzonroq bo'lib, ularni uchirish ham kamroq xarajat talab qiladi. Bu esa tijorat kompaniyalariga o'zlarining PNT tizimlarini yaratish imkonini beradi.

LEO PNT tizimlari mavjud GNSS tizimlariga raqobatchi emas, balki ularni to'ldiruvchi va mustahkamlovchi qatlam sifatida ko'rilmogda. Ular PNT xizmatlarining umumiy ishonchliligi va barqarorligini oshirish uchun muhim zaxira manbai bo'lib xizmat qilishi mumkin.

Xulosa

Ushbu tadqiqot navigatsiya va optik uzatuvchi tizimlar sohasidagi so'nggi yutuqlar, ularning o'zaro integratsiyasi va kelajakdagi istiqbollarini tahlil qildi. GNSS tizimlari doimiy ravishda takomillashmogda; GPS, GLONASS, Galileo va BeiDou kabi tizimlarning modernizatsiyasi PNT xizmatlarining aniqligi va imkoniyatlarini sezilarli darajada kengaytirdi. Biroq, signallarning zaifligi va tashqi xalaqitlarga nisbatan sezgirliigi muammolarni to'liq hal qilmagan, shuning uchun muqobil va yordamchi texnologiyalar talab qilinadi.

Optik texnologiyalar navigatsiya tizimlarining aniqligi, ishonchliligi va avtonomligini oshirishda muhim rol o'ynaydi. Optik tolali giroskoplar (FOG) GNSS signallari mavjud bo'lmagan sharoitlarda yuqori aniqlikdagi inertial navigatsiyani ta'minlaydi, erkin fazo optik aloqasi (FSOC) esa sun'iy yo'ldoshlararo ma'lumot uzatishni amalga oshirib, GNSS tizimlarining yerga bog'liqligini kamaytiradi. Integrallashgan fotonika esa ushbu optik tizimlarni miniatyuralashtirib, ularni kengroq bozor va ilovalarga tatbiq etish imkonini yaratadi.

Kelajak navigatsiyasi gibril va ko'p qatlamli bo'lib, GNSS, inertial sensorlar (FOG, MEMS), optik navigatsiya, LEO PNT va kvant sensorlari kabi turli texnologiyalarni birlashtirgan kompleks yondashuvga asoslanadi. Sensor ma'lumotlarini aqlli tarzda birlashtiruvchi algoritmlar eng aniq va ishonchli PNT yechimlarini taqdim etadi. Kvant texnologiyalari va LEO PNT esa navigatsiya tizimlarining aniqligi, barqarorligi va qamrovini yangi darajaga ko'tarib, mavjud texnologiyalarni to'ldiruvchi va mustahkamlovchi rol o'ynaydi.

Shunday qilib, navigatsiya tizimlarining kelajagi optik texnologiyalar bilan chambarchas bog'liq bo'lib, ularning sinergiyasi nafaqat mavjud cheklavlarni bartaraf etadi, balki yangi

ilovalar va xizmatlar — avtonom transport vositalaridan tortib sayyoralararo tadqiqotlarga — uchun poydevor yaratadi. Aniq va ishonchli navigatsiya texnologik taraqqiyotning asosiy harakatlantiruvchi kuchi sifatida yanada muhim ahamiyat kasb etadi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Fortune Business Insights. (2025, November 24). GNSS Market Size, Share, Growth | Industry Report [2025-2032].
2. Chicago Quantum. (2025, July 15). How quantum technology can help pilots cope with GPS disruptions.
3. RDWire. (2025, September 12). Quantum navigation moves from lab to flight deck as GPS spoofing hits industrial scale.
4. SPIE. (2024, May 1). The transformative technology of laser/free-space optical comms.
5. IEEE Xplore. (2023). Optical Technologies for Future Global Navigation Satellite Systems.
6. Exail. What is fiber-optic gyroscope technology?
7. ESA. ESA to develop optical technology for navigation.
8. NASA. (2024, August 7). NASA Optical Navigation Tech Could Streamline Planetary Exploration.
9. Taoglas. (2024, June 28). GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, NavIC, QZSS.
10. Montenbruck, O. et al. (2025). The 2024 GPS accuracy improvement initiative. Springer.
11. ResearchGate. (2024, December 5). (PDF) The 2024 GPS accuracy improvement initiative.
12. Organic Navigation. (2024, June 12). GPS is Changing: Four Trends Tech Teams Should Know.
13. Symmetry Electronics. GPS vs GLONASS.
14. Navipedia. GLONASS Future and Evolutions.
15. GSC Europa. Galileo High Accuracy Service (HAS).
16. Cucchi, L. et al. (2024). Galileo High Accuracy Service: Tests in Different Operational Environments. ION.
17. EUSPA. What is the Galileo High Accuracy Service?
18. GPS World. (2024, November 15). BeiDou Navigation Satellite System in 2024.
19. TechXplore. (2024, July 5). BeiDou satellite navigation system to undergo significant...
20. SITECH SW. (2022, June 29). Full Constellation GNSS Benefits.
21. Emlid Blog. (2024, September 10). GNSS vs GPS: what is the difference?

- =====
22. AutoPi.io. (2025, August 14). Galileo GNSS: Signals, Services & Accuracy Explained.
 23. UNOOSA. (2024, June 17). Development of BeiDou Navigation Satellite System.
 24. Naciri, N. et al. (2025). Analysis of a High Accuracy Service based on JPL's Global.... ION.
 25. The FOA. The FOA Reference For Fiber Optics - Optical Fiber.
 26. Newport. Fiber Optic Basics.
 27. Juniper Networks. Fiber-Optic Cable Signal Loss, Attenuation, and Dispersion.
 28. MeetOptics. Optical Fiber Loss and Attenuation.
 29. Gem Cable. (2024, April 3). How Fiber Optics are Changing the Aerospace Industry.
 30. ERSa Electronics. (2024, May 8). Exploring Fiber Optics in Aerospace.
 31. Phlux Technology. (2025, July 22). Free-Space Optical Communication: High Data Rate....
 32. Guan, M. et al. (2025). High-performance 100 Gbps free-space optical.... Nature.
 33. Axiom Optics. Free-Space Optical Communications (FSO).
 34. Wikipedia. Free-space optical communication.
 35. Mordor Intelligence. (2025, June 19). Optical Transport Network Market Size & Share Analysis.
 36. Advanced Navigation. Fibre Optic Gyroscope GNSS/INS.
 37. Xu, H. et al. (2023). Application and Development of Fiber Optic Gyroscope.... MDPI.
 38. Silicon Sensing. (2024, June 12). MEMS vs FOG: Which one should you choose?
 39. Ericco International. (2024, April 29). Analysis of Main Performance Parameters of Fiber Optic Gyroscope.
 40. Geneo. (2025, September 9). Fiber Optic vs MEMS Gyroscope: Complete Comparison Guide.