

Kvantni senzorji v pomorstvu in prometu

Tomi Mlinar¹, Boštjan Batagelj¹

¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Katedra za IKT, Laboratorij za sevanje in optiko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana

E-pošta: tomi.mlinar@fe.uni-lj.si

Quantum Sensors in Maritime and Transport Applications

Abstract. This paper examines the role of quantum sensors as key enabling technology for future maritime and transport systems. Quantum sensors rely on phenomena such as superposition, entanglement, and interference, enabling significantly improved measurement accuracy compared to classical approaches. Emphasis is placed on quantum inertial navigation systems which, when combined with atomic clocks, enable fully autonomous navigation without reliance on Global Navigation Satellite System (GNSS), thus increasing robustness in maritime environments, underwater operations, and transport scenarios with degraded or denied signals. The paper also addresses the use of quantum magnetometers and radio-frequency sensors for passive detection of magnetic anomalies and electromagnetic signals, supporting advanced monitoring, tracking, and protection of critical infrastructure in transport systems. Furthermore, emerging developments in quantum radar are presented, highlighting its potential for improved detection of low-observable objects in challenging environments, although these technologies are still in the early stages of development. In conclusion, the paper highlights that quantum sensors represent significant potential to enhance the security, robustness, and autonomy of maritime and transport systems, as well as broader societal and industrial applications.

1 Uvod

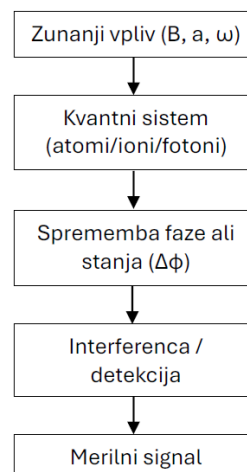
Namen prispevka je podati enoten pregled ključnih vrst kvantnih senzorjev ter analizirati njihov potencial za uporabo v pomorstvu, prometu in pametni infrastrukturi [1, 2, 3]. Kvantni senzorji temeljijo na pojavih, kot so superpozicija, prepletenost in interferenca, kar omogoča bistveno izboljšano natančnost meritev v primerjavi s klasičnimi pristopi. Poseben poudarek je na uporabi kvantnih inercialnih navigacijskih sistemov, ki v kombinaciji z atomskimi urami omogočajo avtonomno navigacijo brez odvisnosti od globalnih navigacijskih satelitskih sistemov (angl. Global Navigation Satellite System – GNSS), kar je še zlasti pomembno za pomorska okolja, podvodna plovila in promet v motenih pogojih. Prispevek obravnava tudi uporabo kvantnih magnetometrov in radiofrekvenčnih (RF) senzorjev za pasivno zaznavanje magnetnih anomalij in elektromagnetnih signalov, kar prispeva k naprednim

metodam nadzora, sledenja in zaščite kritične infrastrukture v transportnih sistemih. Dodatno so predstavljeni razvojni trendi na področju kvantnega radarja, ki omogoča izboljšano detekcijo slabo opaznih objektov v zahtevnih okoljih, čeprav so te rešitve še v zgodnjih fazah razvoja [4, 5]. V zaključku članek izpostavlja, da glede na trenutne razvojne trende kvantni senzorji predstavljajo velik potencial za povečanje varnosti, robustnosti in avtonomnosti sistemov v pomorstvu, prometu in industrijskem okolju.

2 Osnove kvantnih senzorjev

Kvantni senzorji predstavljajo razred naprednih merilnih naprav, katerih delovanje temelji na izkoriščanju kvantnomehanskih pojavov na ravni posameznih delcev ali kolektivnih kvantnih sistemov. Za razliko od klasičnih senzorjev, ki zaznavajo spremembe prek makroskopskih lastnosti materialov, kvantni senzorji neposredno merijo spremembe kvantnih stanj, kar omogoča izjemno visoko natančnost, stabilnost in občutljivost [2].

Osnovna značilnost kvantnega senzorja je, da je merilni signal neposredno povezan s temeljnimi fizikalnimi konstantami. Meritve so sledljive tem konstantam, zato zahtevajo bistveno manj kalibracije kot klasični senzorji in omogočajo dolgoročno stabilnost. Kvantni senzorji predstavljajo ključne gradnike prihodnjih sistemov za navigacijo, merjenje časa, zaznavanje polj ter spremljanje okolja, zlasti v primerih uporabe, kjer klasične metode dosegaajo svoje meje.



Slika 1. Shematski prikaz delovanja kvantnega senzorja, kjer zunanji vpliv povzroči spremembo kvantnega stanja, ki se zazna kot merilni signal.

Slika 1 prikazuje zaporedje pretvorb, pri katerih nek zunanji fizikalni vpliv, kot je magnetno polje B , pospešek α ali kotna hitrost ω , deluje kot vhodni signal v sistem. Ta vpliv deluje na kvantni sistem, npr. atome, ione, fotone ali NV-centre v diamantu, ki je pripravljen v občutljivem kvantnem stanju, običajno v obliki superpozicije. Interakcija povzroči spremembo kvantnega stanja, ki se pogosto izrazi kot fazni zamik $\Delta\phi$, včasih pa tudi kot sprememba energijskega nivoja ali stanja spina, ter je odvisna od jakosti in trajanja vpliva. Ta sprememba vsebuje informacijo o merjeni količini. V nadaljnjem koraku se sprememba kvantnega stanja zazna z detekcijskimi metodami, kot so interferenca ali optična absorpcija. Detekcijski blok nato pretvori kvantni signal v klasičen izhodni signal, na primer električno napetost ali frekvenčni signal. Celoten proces omogoča neposredno pretvorbo fizikalnega vpliva v merilni signal z visoko natančnostjo, saj temeljne veličine določajo kvantna stanja in osnovne fizikalne konstante.

2.1 Fizikalni principi

Delovanje kvantnih senzorjev temelji na osnovnih kvantnomehanskih pojavih, ki nimajo analogije v klasični fiziki. Med najpomembnejše sodijo superpozicija, kvantna interferenca, prepletenost ter kvantizacija energijskih stanj [4, 5]. V enačbah v nadaljevanju uporabljamo Diracovo (ket) notacijo, kjer zapis $|\psi\rangle$ označuje kvantno stanje sistema. Simbola $|0\rangle$ in $|1\rangle$ predstavljata osnovni kvantni stanja, ki ju lahko razumemo kot analogijo binarnima stanjema 0 in 1 v klasičnih sistemih.

Superpozicija in interferenca – kvantni sistem lahko sočasno obstaja v linearni kombinaciji več stanj:

$$|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle \quad (1)$$

kjer sta α in β kompleksna koeficienta superpozicije, ki določata verjetnosti opazovanja posameznih stanj. Zunanje motnje, npr. magnetno ali gravitacijsko polje, povzročijo spremembo faze ($\Delta\phi$) kvantnega stanja:

$$\Delta\phi = \frac{1}{\hbar} \int V(t) dt \quad (2)$$

kjer je $V(t)$ potencial, ki deluje na sistem in $\hbar$ Planckova konstanta. Ta fazna sprememba je merljiva z interferenčnimi metodami, kar predstavlja osnovo številnih kvantnih senzorjev (npr. interferometričnih pospeškometrov).

Kvantna prepletenost – prepletena kvantna stanja omogočajo korelacije med delci, ki presegajo klasične omejitve:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) \quad (3)$$

Takšna stanja omogočajo zmanjšanje šuma in izboljšanje razmerja med signalom in šumom, kar vodi do

preseganja standardne kvantne meje (angl. Standard Quantum Limit – SQL).

Heisenbergova meja občutljivosti – kvantni senzorji lahko dosežejo občutljivost, omejeno s Heisenbergovo relacijo:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad (4)$$

kjer Δx označuje negotovost položaja in Δp negotovost gibalne količine.

Pri optimiziranih sistemih, npr. z uporabo prepletenosti, je občutljivost meritev ($\Delta\theta$):

$$\Delta\theta \sim \frac{1}{N} \quad (5)$$

kjer je N število kvantnih delcev, kar predstavlja precejšnje izboljšanje glede na klasično mejo:

$$\Delta\theta \sim \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (6)$$

Diskretna energijska stanja – Pri atomskih in optičnih senzorjih so energijski nivoji diskretni. Prehodi med temi nivoji predstavljajo izredno stabilne frekvenčne reference, kar je osnova za delovanje atomskih ur in spektroskopskih senzorjev.

2.2 Prednosti kvantnih senzorjev

Kvantni senzorji presegajo omejitve klasičnih senzorjev, ki izhajajo iz materialnih lastnosti, šuma in potrebe po kalibraciji.

Preglednica 1. Prednosti in uporaba kvantnih senzorjev

Senzor	Merilna veličina	Prednost	Uporaba
atomska ura	čas	stabilnost	navigacija
kvantni inercialni navigacijski sistem (INS)	pospešek/rotacija	brez GNSS	podmornice
magnetometer	B	pasivnost	zaznavanje
RF senzor	elektromagnetni signal	širok spekter	komunikacije
kvantni gravimeter	gravitacijski pospešek	visoka občutljivost	navigacija, geodezija
kvantni radar	cilji	odpornost na motnje	zaznavanje

Glavne prednosti kvantnih senzorjev pred klasičnimi senzorji so povzete v preglednici 1 in opisane v nadaljevanju:

- višja občutljivost in natančnost, saj delujejo na ravni kvantnih stanj in lahko zaznavajo zelo majhne spremembe (npr. magnetna polja pod femto T),
- absolutna kalibracija, ker so meritve določene z osnovnimi fizikalnimi konstantami,

- dolgoročna stabilnost, brez izrazitega lezenja (ang. drift), kar omogoča delovanje brez zunanjih referenc (npr. GNSS),
- avtonomnost in pasivnost, kar omogoča prikrito delovanje v pomorstvu in prometu.

3 Ključne vrste kvantnih senzorjev in njihova stopnja tehnološke zrelosti

Posamezne tehnologije se po stopnji tehnološke zrelosti močno razlikujejo. Medtem ko so atomske ure in nekateri kvantni magnetometri že vključeni v praktične sisteme, so kvantni RF-senzorji, kvantni inercialni navigacijski sistemi in zlasti kvantni radarji še v različnih fazah raziskav in razvoja.

Kvantni senzorji zajemajo več tehnoloških pristopov, ki omogočajo zelo natančne meritve fizikalnih veličin, pomembnih za prometne sisteme. Njihova uporaba v navigaciji, detekciji in komunikaciji omogoča večjo avtonomnost, zanesljivost in odpornost na motnje. Posebej pomembni so v okoljih, kjer klasične tehnologije, kot je GNSS, odpovedo ali niso na voljo. Med ključnimi vrstami izstopajo atomske ure, inercialni navigacijski sistemi (INS), magnetometri, RF-senzorji in kvantni radarji. Vsaka od teh tehnologij je namenjena svojemu segmentu prometnih sistemov.

3.1 Atomske ure

Atomske ure predstavljajo najzrelejšo obliko kvantnih senzorjev in omogočajo izjemno natančno merjenje časa na osnovi kvantnih prehodov med energijskimi nivoji atomov. V prometnih sistemih zagotavljajo stabilno časovno referenco za navigacijo, komunikacijo in sinhronizacijo. Najboljše optične atomske ure dosegajo relativno frekvenčno nestabilnost reda 10^{-18} . Njihova ključna prednost je neodvisnost od zunanjih sistemov, kot so GNSS.

Miniaturizirane izvedbe omogočajo integracijo v mobilne in transportne platforme in zaradi teh lastnosti predstavljajo osnovo za razvoj avtonomnih navigacijskih sistemov.

3.2 Kvantna inercialna navigacija

Kvantna inercialna navigacija temelji na uporabi kvantnih pospeškomerov in žiroskopov, ki merijo gibanje z atomsko interferometrijo. Takšni sistemi omogočajo določanje položaja, hitrosti in orientacije brez zunanjih referenc [6].

V prometu so ključni za delovanje podvodnih plovil (npr. podmornic), letal in avtonomnih vozil v okoljih brez GNSS. Njihova prednost je bistveno manjše kopičenje napak v primerjavi s klasičnimi sistemi. Raziskave kažejo, da lahko hibridni sistemi, ki združujejo klasične in kvantne inercialne senzorje, izboljšajo stabilnost meritev pospeška tudi za približno 100-krat v primerjavi s samostojnimi klasičnimi senzorji, kar neposredno zmanjšuje kopičenje navigacijskih napak skozi čas [7]. S tem omogočajo dolgoročno stabilno in avtonomno navigacijo. Pri klasičnih inercialnih sistemih lahko napaka položaja po več urah delovanja brez korekcije z GNSS naraste na več sto metrov ali celo kilometre. Kvantni senzorji zaradi bistveno manjšega lezenja

zmanjšajo hitrost kopičenja napak ter omogočajo natančnejšo določitev položaja tudi pri daljšem avtonomnem delovanju.

3.3 Kvantni magnetometri

Kvantni magnetometri omogočajo zaznavanje zelo šibkih magnetnih polj z izjemno visoko občutljivostjo. Občutljivost lahko dosega območje $\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$, medtem ko so tipične občutljivosti klasičnih sistemov pogosto v območju $\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$. Temeljijo na interakciji med kvantnimi stanji atomov ali centri dušikovih prostih mest v diamantu (angl. Nitrogen-Vacancy - NV) ter zunanjim magnetnim poljem [2, 8, 9, 10].

V prometu se uporabljajo za zaznavanje podvodnih plovil, navigacijo in kartiranje okolja. Njihova prednost je pasivno delovanje brez oddajanja signalov. Zaradi visoke občutljivosti omogočajo zaznavanje skritih ali zakritih objektov.

3.4 Kvantni radiofrekvenčni senzorji

Kvantni radiofrekvenčni (RF) senzorji predstavljajo novo generacijo sprejemnih sistemov, ki za zaznavanje elektromagnetnih signalov uporabljajo kvantna stanja atomov ali trdninskih kvantnih sistemov namesto klasičnih anten in elektronskih detekcijskih vezij. Najpogostejše temeljijo na Rydbergovih atomih ali NV-centrih v diamantu, ki omogočajo neposredno zaznavanje amplitude, frekvence, faze in polarizacije elektromagnetnih signalov. Njihove glavne prednosti so visoka občutljivost, širok frekvenčni razpon, možnost absolutne kalibracije ter pasivno delovanje brez oddajanja elektromagnetnega sevanja. Takšni senzorji imajo velik potencial za uporabo v prometnih in pomorskih sistemih, kjer je pomembno zanesljivo zaznavanje elektromagnetnega okolja ter odpornost na elektromagnetne motnje.

Za razliko od klasičnih radiofrekvenčnih merilnih sistemov, pri katerih signal najprej sprejme antena in ga nato obdela elektronski sprejemnik, kvantni RF-senzorji izkoriščajo neposredno interakcijo elektromagnetnega polja s kvantnimi stanji. Zato je mogoče zmanjšati vpliv elektronskega šuma ter določene kalibracijske napake, ki omejujejo zmogljivost klasičnih sistemov.

Ena najperspektivnejših izvedb uporablja Rydbergove atome, pri katerih so elektroni vzbujeni v zelo visoki energijski stanja. Zaradi velikega električnega dipolnega momenta so takšni atomi izredno občutljivi na zunanja radiofrekvenčna in mikrovalovna polja. Posledično omogočajo zaznavanje signalov v zelo širokem frekvenčnem območju, od nekaj sto MHz do več deset GHz. Takšni sistemi se vse pogostejše uporabljajo kot etalonski merilniki električnega polja in predstavljajo eno pomembnejših raziskovalnih smeri na področju kvantnega zaznavanja elektromagnetnega spektra.

Pomemben primer kvantnega RF-senzorja predstavlja tudi radiofrekvenčni analizator na osnovi NV-centrov v diamantu. Delovanje temelji na spinskih lastnostih NV-defektov, ki omogočajo zaznavanje mikrovalovnih signalov preko sprememb fotoluminiscentne. Zunanji RF-signal povzroči prehode med spinskimi stanji NV-centra, kar zaznamo z metodo optično detektirane magnetne resonance (angl. Optically

Detected Magnetic Resonance – ODMR). Resonančna frekvenca sistema je podana z izrazom:

$$\nu = |D \pm \gamma B| \quad (7)$$

kjer je D ničelna razcepitev spinskih nivojev, B magnetno polje in γ giromagnetni faktor NV-centra.

S pomočjo gradienta magnetnega polja se različne frekvenčne komponente signala prostorsko preslikajo v diamantnem vzorcu, kar omogoča sočasno spremljanje širokega frekvenčnega spektra brez uporabe Fourierjeve transformacije. Takšen pristop omogoča veliko hitrost zajema signalov, visoko časovno ločljivost in delovanje pri sobni temperaturi.

Kljub številnim prednostim imajo kvantni RF-senzorji tudi določene omejitve. Trenutni sistemi pogosto zahtevajo lasersko vzbujanje in optični detekcijski sklop, kar povečuje kompleksnost naprave. Dodatne omejitve predstavljajo dinamični razpon, občutljivost na temperaturne spremembe in zahteve po stabilnem magnetnem okolju. Zaradi teh razlogov kvantni RF-senzorji še niso neposredna zamenjava za klasične spektralne analizatorje, temveč predstavljajo dopolnilno tehnologijo za specifične primere uporabe, kjer so ključni visoka občutljivost, pasivnost in absolutna sledljivost meritev.

V prometu in pomorstvu so posebej zanimivi za pasivni nadzor elektromagnetnega spektra, zaznavanje motilnikov GNSS, spremljanje komunikacijskih kanalov, analizo radarskih signalov in zaščito kritične infrastrukture. Ker ne oddajajo lastnega elektromagnetnega sevanja, omogočajo prikrito delovanje, kar je pomembno pri zavarovanju kritične infrastrukture in v obrambne namene.

3.5 Kvantna gravimetrija

Posebno področje kvantnega zaznavanja predstavlja kvantna gravimetrija, ki omogoča izredno natančne meritve gravitacijskega pospeška in njegovih prostorskih sprememb. Kvantni gravimetri najpogosteje temeljijo na atomski interferometriji, pri kateri laserski pulzi razdelijo in ponovno združijo valovno funkcijo hladnih atomov. Pri tem gravitacijsko polje povzroči fazni zamik med interferenčnima potema, iz katerega je mogoče zelo natančno določiti lokalno gravitacijo [11]. Sodobni atomski gravimetri dosegajo občutljivosti reda nekaj μGal .

Delovanje kvantnega gravimetra temelji na zvezi:

$$\Delta\phi = k_{eff} g T^2 \quad (8)$$

kjer je k_{eff} efektivni valovni vektor laserskega sistema, g gravitacijski pospešek in T čas med laserskimi impulzi.

Natančno merjenje faznega zamika omogoča določitev zelo majhnih sprememb gravitacijskega polja. Kvantni gravimetri dosegajo višjo občutljivost od številnih klasičnih gravimetrov, pri čemer njihova natančnost temelji na atomskih lastnostih in osnovnih fizikalnih konstantah. Zaradi tega so primerni za

dolgotrajne meritve z majhnim lezenjem (ang. drift) in visoko stabilnostjo.

V prometu in infrastrukturi omogočajo zaznavanje podzemnih objektov, votlin, tunelov, cevovodov in geoloških struktur brez potrebe po invazivnih postopkih. Takšni sistemi se lahko uporabljajo za spremljanje stabilnosti tal pod železniškimi progami, mostovi ali predori ter za zgodnje zaznavanje posedanja terena. V pomorstvu imajo kvantni gravimetri pomembno vlogo pri gravitacijski navigaciji. S primerjavo izmerjenega gravitacijskega zemljevida z referenčnimi gravitacijskimi kartami je mogoče določati položaj plovila tudi brez uporabe GNSS. Tak pristop je posebej zanimiv za podmornice in avtonomna podvodna vozila, ki delujejo dalj časa pod vodno gladino. Kvantna gravimetrija omogoča tudi kartiranje morskega dna, geofizikalne raziskave ter spremljanje sprememb v podzemnih vodonosnikih in drugih naravnih sistemih. Zaradi teh lastnosti velja za eno najobetavnejših področij uporabe kvantnih senzorjev.

3.6 Kvantni radar

Kvantni radar predstavlja napredno tehnologijo, ki za zaznavanje objektov uporablja kvantno prepletenost ali kvantno osvetlitev [12, 13]. Omogoča detekcijo slabo opaznih ciljev v prisotnosti šuma ali motenj. V prometu bi lahko prispeval k izboljšani detekciji plovil, letal in ovir v zahtevnih okoljih. Njegova prednost je delovanje z nizko oddajno močjo in visoka odpornost na motnje.

Kljub obetavnim laboratorijskim rezultatom, doslej še ni bilo demonstriranih operativnih kvantnih radarjev na večjih razdaljah, zato ostaja dejanski domet prednosti kvantnega radarja predmet raziskav. Tehnologija ima velik potencial, vendar je še vedno v razvojni fazi.

4 Uporaba v pomorstvu in prometu

Kvantni senzorji predstavljajo pomembno tehnološko osnovo za prihodnje sisteme v pomorstvu in prometu, saj se pričakuje, da bodo bistveno izboljšali navigacijo in omogočili visoko natančne, robustne in avtonomne meritve. Primeri uporabe so zajeti v preglednici 2.

Ključna prednost kvantnih senzorjev je zmožnost delovanja brez zunanjih referenčnih signalov, kar je še zlasti pomembno v okoljih z omejenim dostopom do GNSS ali ob prisotnosti motenj. Različne vrste kvantnih senzorjev omogočajo zaznavanje gibanja, orientacije, elektromagnetnih signalov in okoljskih sprememb, kar odpira nove možnosti za izboljšanje varnosti, učinkovitosti in zanesljivosti prometnih sistemov.

Integracija več vrst kvantnih senzorjev v skupne platforme dodatno povečuje zmogljivost in robustnost sistemov, v prihodnosti pa se pričakuje njihova široka uporaba v pametnih transportnih omrežjih. Zaradi teh lastnosti kvantni senzorji predstavljajo ključen element digitalne preobrazbe prometnih sistemov.

Preglednica 2. Primeri uporabe kvantnih senzorjev v pomorstvu, prometu in pametni infrastrukturi

Vrsta kvant. senzorja	Pomorstvo	Promet	Pametna infrastruktura
atomska ura	navigacija in komunikacije na morju	sinhronizacija prometnih in komunikacijskih sistemov	časovna sinhronizacija omrežij in kritične infrastrukture
kvantni inercialni navigacijski sistemi	navigacija podmornic in avtonomnih podvodnih plovil brez GNSS	avtonomna vozila, letala in navigacija v tunelih	natančno pozicioniranje mobilnih platform
kvantni magnetometer	zaznavanje podvodnih plovil in magnetnih anomalij	navigacija in kartiranje urbanega okolja	nadzor podzemnih kablov, cevi in tunelov
kvantni RF-senzor	pasivno zaznavanje komunikacijskih in radarskih signalov	nadzor elektromagnetnega spektra in zaznavanje motenj	zaznavanje elektromagnetnih motenj in kibernetičnih groženj
kvantni radar	zaznavanje plovil in nizko opaznih ciljev	zaznavanje ovir v zahtevnih vremenskih razmerah	nadzor kritične infrastrukture in varnostnih območij

4.1 Pomorstvo

V pomorstvu kvantni senzorji bistveno izboljšujejo navigacijo, zaznavanje in nadzor okolja. Kvantni inercialni sistemi omogočajo natančno določanje položaja podvodnih plovil brez uporabe GNSS, kar je ključno za podmornice in avtonomna podvodna vozila. Atomske ure zagotavljajo stabilno časovno osnovo za navigacijo in komunikacijo tudi v globokomorskih razmerah. Kvantni magnetometri omogočajo zaznavanje magnetnih anomalij in sledenje podvodnim objektom ali plovilom. Kvantni radarji imajo potencial za daljinsko zaznavanje slabo opaznih objektov na morski gladini ali nad njo. RF-senzorji omogočajo pasivno zaznavanje komunikacijskih in radarskih signalov.

Primer uporabe je navigacija avtonomnega podvodnega vozila, ki z uporabo kvantnega inercialnega navigacijskega sistema in magnetometra ohranja natančen položaj v daljšem časovnem obdobju. Takšni sistemi povečujejo varnost plovbe in zmanjšujejo odvisnost od satelitskih signalov. Poleg tega omogočajo učinkovitejšo nadzorovanje morskih poti in kritične infrastrukture, kot so podmorski kabli.

4.2 Promet

V kopenskem in zračnem prometu kvantni senzorji omogočajo razvoj naprednih navigacijskih in varnostnih sistemov.

Kvantni inercialni navigacijski sistemi omogočajo neodvisno določanje položaja vozil brez GNSS, kar je ključno v urbanih okoljih, tunelih ali ob motnjah signalov. Atomske ure izboljšujejo sinhronizacijo komunikacijskih in prometnih sistemov. Kvantni magnetometri omogočajo zaznavanje okolja in orientacijo v kompleksnih urbanih strukturah. RF-senzorji omogočajo nadzor elektromagnetnega spektra ter zaznavanje motenj ali nepooblaščenih oddajnikov. Kvantni radar lahko prispeva k izboljšani detekciji ovir v slabih vremenskih ali motenih pogojih.

Primer uporabe je avtonomno vozilo, ki uporablja kvantni inercialni navigacijski sistem za navigacijo v tunelu brez satelitskega signala. Takšni sistemi povečujejo zanesljivost avtonomnih transportnih rešitev. Kvantni senzorji tako omogočajo večjo varnost, robustnost in avtonomijo prometnih sistemov. Njihova integracija bo ključna za razvoj prihodnjih inteligentnih transportnih omrežij.

4.3 Pametna infrastruktura

Kvantni senzorji imajo pomembno vlogo pri razvoju pametne infrastrukture v prometnih sistemih. Omogočajo natančen nadzor fizičnih in elektromagnetnih veličin v realnem času. Kvantni magnetometri omogočajo zaznavanje sprememb v podzemni infrastrukturi, kot so cevi, kabli ali tuneli. RF-senzorji omogočajo nadzor elektromagnetnega spektra in zaznavanje motenj ali kibernetičnih groženj. Atomske ure zagotavljajo natančno časovno sinhronizacijo med različnimi infrastrukturnimi elementi. Kvantni senzorji omogočajo tudi zgodnje zaznavanje okvar ali strukturnih sprememb.

Primer uporabe je nadzor mostu ali železniške proge z uporabo kvantnih senzorjev za zaznavanje mikro vibracij ali sprememb v okolju. Takšni sistemi povečujejo zanesljivost in varnost infrastrukture. Integracija z umetno inteligenco bo omogočila avtomatsko analizo podatkov in napovedovanje napak.

5 Izzivi in prihodnji razvoj

Kljub velikemu potencialu se kvantni senzorji še vedno soočajo s številnimi tehničnimi in implementacijskimi izzivi. Eden ključnih izzivov je kompleksnost sistemov, saj številni kvantni senzorji zahtevajo natančen nadzor temperature, laserskega vzburjanja in elektromagnetnega okolja, kar otežuje njihovo uporabo v realnih prometnih okoljih. Poseben izziv predstavlja tudi miniaturizacija, saj je prehod iz laboratorijskih sistemov v kompaktne in robustne naprave za uporabo na ladjah, vozilih ali infrastrukturi še vedno v razvoju.

Dodatni izziv predstavlja občutljivost kvantnih sistemov na šum in okoljske vplive. Pri navedbah o odpornosti kvantnih senzorjev na motnje je treba razlikovati med motnjami v merjenem okolju in motnjami, ki vplivajo na sam kvantni sistem. Kvantni senzorji lahko na primer omogočajo delovanje v okoljih z motenim GNSS ali v prisotnosti elektromagnetnega šuma, hkrati pa so lahko sami občutljivi na temperaturna nihanja, vibracije ali spremembe elektromagnetnega okolja, ki vplivajo na kvantna stanja.

Prav tako je treba razviti učinkovite metode za integracijo kvantnih senzorjev z obstoječimi navigacijskimi in komunikacijskimi sistemi. Pomemben vidik je tudi stroškovna učinkovitost, saj so trenutne rešitve še relativno drage in omejene na specifične primere uporabe.

V prihodnosti se pričakuje napredek na področju materialov, kot so npr. izboljšani NV-centri v diamantu ali nove atomske strukture, optičnih gradnikov in kvantnega nadzora, kar bo omogočilo bolj robustne in zanesljive sisteme. Razvoj hibridnih sistemov, ki združujejo kvantne in klasične senzorje, bo omogočil večjo zanesljivost in zmanjšanje vpliva posameznih omejitev. Pomembno vlogo bo imela tudi integracija z umetno inteligenco za napredno obdelavo podatkov in zaznavanje anomalij.

Na področju prometa in pomorstva bo ključni cilj razvoj popolnoma avtonomnih sistemov, ki bodo delovali neodvisno od GNSS in drugih zunanjih referenc. Takšni sistemi bodo omogočili večjo varnost, odpornost na motnje in zanesljivo delovanje v zahtevnih okoljih. Kvantni senzorji tako predstavljajo pomembno raziskovalno smer, ki bo v prihodnjih desetletjih bistveno vplivala na razvoj naprednih transportnih sistemov.

6 Zaključek

Prispevek je predstavil osnovne koncepte kvantnih senzorjev ter njihovo uporabo v pomorstvu in prometu. Kvantni senzorji omogočajo bistveno bolj natančne in stabilne meritve kot klasični senzorji ter predstavljajo ključno tehnologijo za prihodnje navigacijske in zaznavne sisteme. Poseben poudarek je bil na atomskih urah, kvantnih inercialnih sistemih, magnetometrih, RF-senzorjih in kvantnem radarju. Njihova uporaba omogoča avtonomno delovanje tudi v okoljih brez GNSS in prispeva k večji varnosti ter robustnosti sistemov. Kvantni senzorji bodo v prihodnosti pomemben gradnik inteligentnih transportnih rešitev.

Nadaljnje raziskave so usmerjene v miniaturizacijo in industrijsko implementacijo kvantnih senzorskih tehnologij.

Zahvala

Delo je podprla Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS) v okviru projekta KTTK21 (<https://kttk21.org/>), št. SN-ZRD/22-27/510, projektov L7-60164, V2-24005, J2-50072 in programa P2-0246.

Literatura

- [1] Digitalna Slovenija 2030, https://www.gov.si/assets/ministrstva/MDP/Dokumenti/DI2030-potrjena-na-Vladi-RS_marec-2023.pdf
- [2] E. Zupanič, P. Jeglič, M. Breskvar in B. Batagelj: Pregled trenutnega stanja in možnosti uporabe kvantnih senzorjev

na področju varnosti, projektno poročilo KVANTSSENZ, 2025.

- [3] EU Quantum Flagship, <https://qt.eu/>
- [4] Michal Krelina, Czech Technical University, Prague, Quantum Technologies for Air and Space (Part 2 of 3), Quantum-Enhanced Radars and Electronic Warfare: Use Cases and Timelines, JAPCC, Journal Edition 37, 2024
- [5] X. Zuo, Z. Tang, B. Li, X. Chen, and J. Sun, "Quantum-Empowered Fiber Sensing Metrology," *Photonics*, vol. 12, no. 8, p. 763, 2025, doi: 10.3390/photonics12080763.
- [6] L. Jiao and J.-H. An, "Noisy quantum gyroscope," *Photonics Research*, vol. 11, no. 2, pp. 150–158, Feb. 2023, doi: 10.1364/PRJ.469779.
- [7] C. Salducci, Y. Bidet, M. Cadoret, S. Darmon, N. Zahzam, A. Bonnin, S. Schwartz, C. Blanchard in A. Bresson, "Quantum sensing of acceleration and rotation by interfering magnetically-launched atoms," *arXiv preprint arXiv:2405.13689*, 2024. doi: 10.48550/arXiv.2405.13689.
- [8] S. Magaletti, L. Mayer, J.-F. Roch, and T. Debuisschert: Quantum diamond radio frequency signal analyser based on nitrogen-vacancy centers, *arXiv preprint arXiv:2206.06734*, 2022B.
- [9] Nitrogen-Vacancy (NV) Center Magnetometry, <https://www.nist.gov/noac/technology/magnetic-and-electric-fields/nv-center-magnetometry>
- [10] E. Stopar, J. Pirman, K. Gosar, C. Ramond, E. Zupanič, and P. Jeglič, "Radiofrekvenčna antena z Rydbergovim plinom," in 14. Slovenska fizikalna konferenca, Brdo pri Kranju, Slovenija, 10. okt. 2025, prispevek P056, p. 79.
- [11] J. Fang, W. Wang, Y. Zhou, J. Li, D. Zhang, B. Tang, J. Zhong, J. Hu, F. Zhou, X. Chen, J. Wang, and M. Zhan, "Classical and Atomic Gravimetry," *Remote Sensing*, vol. 16, no. 14, p. 2634, Jul. 2024, doi: 10.3390/rs16142634
- [12] V. Vrh, A. Lavrič in B. Batagelj, "Kvantne tehnologije daljinskega zaznavanja in kvantni radar", Zbornik triinštridesete mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2024 (Proceedings of the 33rd International Electrotechnical and Computer Science Conference ERK 2024), Portorož, Slovenija, 26.–27. sep. 2024, A. Žemva in A. Trost, ur. Ljubljana: Slovenska sekcija IEEE in Fakulteta za elektrotehniko, 2024, str. 45–48. Dostopno: [https://erk.fe.uni-lj.si/2024/papers/vrh\(kvantne_tehnologije\).pdf](https://erk.fe.uni-lj.si/2024/papers/vrh(kvantne_tehnologije).pdf)
- [13] V. Vrh, A. Lavrič, B. Batagelj, "Idejna zasnova kvantnega radarskega senzorja na osnovi kvantne prepletenosti", 27. Seminar Optične komunikacije, Ljubljana, 5. do 7. februar 2025, str. 385, ISBN 978-961-243-477-9. Dostopno: <https://sok.fe.uni-lj.si/zborniki/ZBORNIK%20SOK%202025.pdf>