

# Kvantne tehnologije daljinskega zaznavanja in kvantni radar

Vid Vrh, Andrej Lavrič, Boštjan Batagelj

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija  
e-pošta: vv6294@student.uni-lj.si

## Quantum Remote Sensing Technologies and Quantum Radar

*The advent of quantum technologies has significantly advanced the field of remote sensing and led to the development of quantum remote sensing and quantum radar systems. This paper provides an overview of these breakthrough technologies, focusing on the underlying principles, potential applications and recent advances. Quantum remote sensing utilizes quantum entanglement and superposition to achieve higher sensitivity and resolution compared to classical methods. In particular, quantum radar utilizes the unique properties of entangled photons to improve target detection and imaging capabilities, offering significant advantages in terms of stealth, noise resistance and information security. We provide an overview of key theoretical concepts, including quantum illumination and quantum interferometry, and discuss recent experimental demonstrations that show the feasibility and performance advantages of these technologies. In addition, we address the technical challenges and future directions for research and development in this emerging field, emphasizing the transformative impact of quantum technologies on remote sensing applications in both civilian and military domains.*

## 1 Uvod v kvantne tehnologije daljinskega zaznavanja

Kvantne tehnologije se že dobro uvajajo na področja računalništva, zaznavanja in komunikacij. Še posebej pomembno področje je prenos kvantnega ključa (angl. *quantum key distribution* – QKD), ki služi za šifriranje občutljivih podatkov in preprečevanje kibernetičnih napadov [1]. Na drugi strani vedno zmogljivejši kvantni računalniki omogočajo boljše upravljanje, optimizacijo in raziskovanje. Transportna industrija kvantne pojave trenutno že izkorišča za natančno merjenje časa preko cezijevih atomov v atomskih urah. Najnovejši napredek pri uporabi kvantne mehanike v drugi kvantni revoluciji [2] pa obeta tudi vedno bolj varne sisteme za pozicioniranje, navigacijo in določanje časa [3].

Kvantno šifriranje je znanost, ki se ukvarja z izkoriščanjem kvantnih lastnosti za opravljanje nalog šifriranja v digitalni družbi. Pri tem je glavna prednost kvantnega šifriranja ta, da lahko opravlja tiste naloge šifriranja, ki

jih v klasični komunikaciji ni mogoče opraviti [4]. Pričakovati je, da bo kvantno računalništvo omogočilo razvoj zelo učinkovitih dešifrirnih algoritmov, kar bo imelo za posledico razbitje klasičnih šifrirnih postopkov.

Osnova za uvedbo kvantnih tehnologij v drugi kvantni revoluciji sta fizikalna principa superpozicije in prepletenosti. Prav ta dva sta tudi najbolj zanimiva na področju satelitskih komunikacij. Koncepta kvantne prepletenosti in prenosa kvantnega ključa bosta zagotovila dobro šifrirano komunikacijo med zemeljskimi postajami in sateliti.

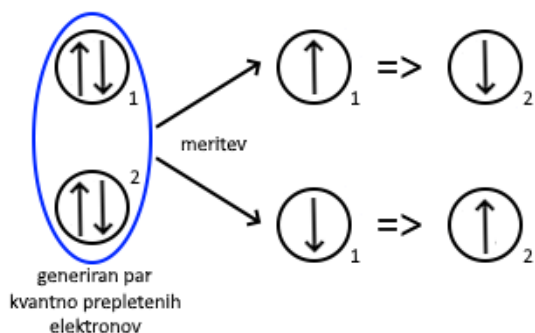
Industrija na področju pomorstva in prometa za navigacijo in daljinsko zaznavanje s pomočjo kvantne fizike išče rešitve, ki bi bile odporne proti najrazličnejšim motnjam ali izgubi signala globalnega navigacijskega satelitskega sistema. Izpad satelitske navigacije bi ohromil mnoge sektorje gospodarstva. Ker so satelitski signali zelo šibki, je motilne sisteme razmeroma lahko izdelati in uporabiti, in tako ustvariti izjemno visoke stroške. Možna rešitev so sistemi za inercialno navigacijo, ki uporabljajo izjemno natančne pospeškometre [5]. Najboljše pospeškometre je mogoče izdelati z uporabo kvantnih tehnologij, denimo v sistemih hladnih atomov. Sistemi za inercialno navigacijo povsem izničijo možnost napadov in omogočajo visoko razpoložljiv in varen promet. Omogočajo tudi navigacijo brez vidnega polja do satelitov, denimo v predorih in pod morsko gladino. V igri za izvedbo inercialne navigacije je več možnih rešitev, ki temeljijo na zaznavanju premikanja, kot je pospešek, rotacija in gravitacija, ali pa na zaznavanju električnega in magnetnega polja oziroma na slikovnih tehnologijah. Kvantno slikanje omogoča izdelavo izjemno občutljivih kamer, ki delujejo na nivoju posameznih delcev svetlobe (fotonov). Obetajo možnost opazovanja okolja tudi v izjemno slabih pogojih (dež, megla, sneg, ponoči). Pogosto uporabljena rešitev za zaznavanje magnetnega polja je osnovana na kvantnih pojavih, ki so posledica učinka magnetnega polja na strukturo dušikovih praznin na osnovi diamanta. To je zelo občutljiva struktura, ki omogoča hitro in natančno zaznavanje zrakoplovov, podvodne komunikacije in pozicioniranje z žiroskopom, ki zaznava Zemljino magnetno polje. Pri tem je potrebno poudariti, da čeprav se tehnologija že uporablja pri navigaciji in geodeziji, zaznavanje hitro premikajočih se objektov preko magnetnega polja s tako tehnologijo še ni bila izvedena [3].

Sodobne komunikacijsko informacijske tehnologije prinašajo tudi revolucionarno idejo, da se komunikacijska in radarska tehnika, ki sta bili zgodovinsko ločeni področji razvoja povsem drugačne strojne in programske opreme, združita v enovit sistem kvantnih komunikacij in daljinskega zaznavanja, pri čemer bo izkoriščena kvantna tehnologija. Učinkovita nova kvantna komunikacijsko-senzorska infrastruktura, ki pomeni tudi nove raziskovalne izzive na področju kvantnega radarja, bo prinesla izboljšane postopke kooperativnega (sodelovalnega) pozicioniranja, ki pripomore pri navigaciji ladij v primeru izpada ali nedelovanja satelitskega navigacijskega sistema. V ta namen so že razviti nekateri deterministični in probabilistični algoritmi za lokalizacijo, kot so na primer Bayesianov algoritem.

## 2 Kvantni radar

Kvantni radar je naprava za merjenje oddaljenosti, ki mikrovalovne oziroma optične fotone in kvantne pojave uporablja za boljšo učinkovitost pri detekciji in prepoznavanju tarč. Največja prednost pred klasičnimi radarji je v izkoriščanju kvantne prepletenosti, ki onemogoča ponarejanje radarskega signala. Dodatna posebnost kvantnega radarja je, da je odporen proti trenutnim načinom skrivanja letal pred klasičnimi radarji.

Kvantna prepletenost je kvantni pojav, pri katerem si dva sicer ločena delca delita nekatere lastnosti, čeprav nimata možnosti vplivanja drug na drugega, in tako ne glede na razdaljo med njima tvorita kvantni sistem. Kvantna prepletenost delcev se odraža v kvantnih lastnostih, kot sta spin elektrona ali polarizacija fotona. Na primeru polarizacije fotona je učinek kvantne prepletenosti viden v tem, da ko enemu fotonu izmerimo njegovo polarizacijo, bo drugi delec iz para vedno imel nasprotno polarizacijo. Prav tako se ob spremembi polarizacije enega fotona spremeni tudi polarizacija drugega delca iz kvantno prepletenega para [6]. Pojav je demonstriran na Sliki 1.

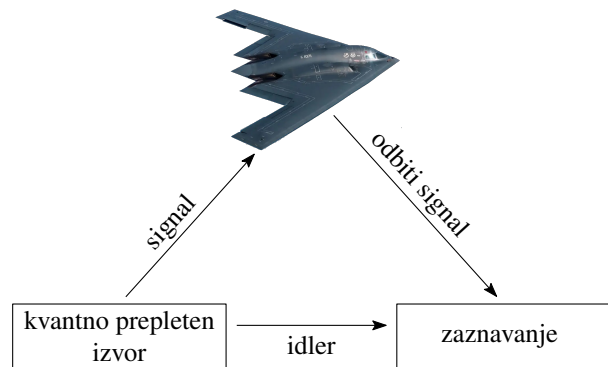


Slika 1: Prikaz kvantne prepletenosti.

Glede na signale, ki jih oddajajo kvantni radarji, jih delimo na dve skupini, in sicer na radarje, ki uporabljajo kvantno neprepletene signale, in radarje, ki uporabljajo kvantno prepletene signale. Predstavniki prve skupine so enofotonski radarji, ki oddajajo signal v obliki impulzov iz povprečno enega fotona na impulz, radarski sprejemnik pa sprejema odbite fotone in šteje, koliko se jih

je odbilo od tarče. Takšen radar ni pravi kvantni radar, saj za delovanje ne izkorišča kvantnih pojavov, ampak z majhnim številom fotonov na posamezen impulz pri odboju zazna večjo radarsko odmevno površino tarče, kot bi bila zaznana s klasičnim radarjem.

Radar s kvantno prepletenimi fotoni za svoje delovanje proizvede par kvantno prepletenih fotonov, od katerega odda proti tarči, drugega pa zadrži na radarski napravi. Če se oddani foton ne odbije od tarče, radar sprejme samo fotone šuma. Po drugi strani je foton, ki se od tarče odbije do sprejemnika, »označen« zaradi kvantne povezanosti z drugim fotonom iz para, tako da ga sprejemnik preko tega prepozna kot signalni foton. Koncept kvantne osvetlitve (angl. *quantum illumination*) je prikazan na Sliki 2.



Slika 2: Koncept radarja na osnovi kvantne osvetlitve.

Interferometerski kvantni radar po sprejemu odbitega signala z interferometrom izvede meritev njegove faze, iz česar pridobi informacijo o razdalji od tarče.

Po drugi strani kvantni radar, ki deluje na podlagi kvantne osvetlitve, preprosto prešteje fotone, ki so se odbili od tarče, pri čemer za razlikovanje med šumom in signalnimi fotoni izkorišča lastnost kvantne prepletenosti, kar močno poveča njegovo občutljivost. Kvantna osvetlitev sicer temelji na naslednjih predpostavkah: vsak rod sevanja tako oddanega kot na napravi zadržanega signala vsebuje zelo majhno število fotonov, produkt trajanja impulza in njegove pasovne širine mora biti velik, odbojnost tarče je ob njeni prisotnosti majhna, v njeni odsotnosti pa ničelna, in da šum predstavlja visoko povprečno število fotonov na rod valovanja v šumu ozadja.

Izboljšava klasičnih metod kvantne osvetlitve je Gaussova kvantna osvetlitev, ki z uporabo Gaussovih stanj v teoriji ponuja velike prednosti pred klasično izvedbo, in sicer za kar 6 dB boljše razmerje med sprejetim signalom in šumom. Ta metoda prinaša tudi nove vrste sprejemnikov: sprejemnik, ki temelji na optičnem parametričnem ojačanju in oba signala meša v optičnem parametričnem ojačevalniku, fazno konjugirani sprejemnik, ki konjugira rodove valovanja, odbitega od tarče, sprejemnik, ki deluje na podlagi generiranja fotonov s frekvenco, ki je vsota frekvenc vseh fotonov vseh rodov valovanja, in heteromodinski sprejemnik sekvenčnim zaznavanjem, pri katerem ni potrebno izvajati neposrednih meritev kvantno prepletenih signalov, za oceno napak pri zaznavanju tarče

pa si pomaga s sekvenčnim testom razmerja verjetnosti (angl. *Sequential Probability-Ratio Test* – SPRT) [7, 8].

## 2.1 Praktične omejitve kvantne osvetlitve

Raziskave kvantne osvetlitve so pokazale, da metoda v konvencionalni obliki zahteva predhodno znanje o oddaljenosti tarče od radarja, kar omejuje njeno praktičnost na uporabo za namene skeniranja. Ena od možnih rešitev problema dosega je uporaba frekvenčno moduliranih impulzov, ki ob izkoriščanju klasičnega Dopplerjevega pojava ponuja tudi možnost meritve relativne hitrosti tarče. Druga možnost je Maccone-Renov protokol kvantnega radarja, ki pa na radarju ne ohrani enega od kvantno prepletenih signalov in tako povsem zanemari kvantno osvetlitev.

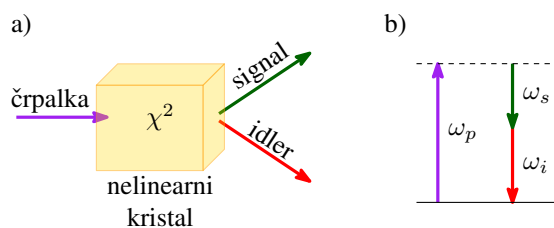
Pri Gaussovi kvantni osvetlitvi se največje težave pojavijo pri nizki moči signala, ki je sicer nujna za doseganje visoke občutljivosti radarja, a hkrati predstavlja omejitve pri možnem dosegu radarja. To še posebej pride do izraza pri mikrovalovnem kvantnem radarju, kjer prihaja do velikih izgub pri razširjanju signala skozi ozračje. Mikrovalovna kvantna osvetlitev poleg tega zahteva tudi visok produkt trajanja impulza in njegove pasovne širine, kar pa je v nasprotju z majhno pasovno širino generiranih kvantno prepletenih fotonov. Če radar deluje pri optičnih frekvencah, se pojavi težava Rayleighovega presihla signala pri razširjanju skozi prostor.

Izzivi se pojavljajo tudi pri izvedbi radarske naprave, kjer je potrebno poskrbeti za učinkovito shranjevanje fotonov, ki niso oddani proti tarči. Izkazalo se je, da izgube pri shranjevanju teh fotonov pomembno vplivajo na domet radarja. Še ena težava pri praktični izvedbi mikrovalovnega kvantnega radarja je zahteva po kirogenih razmerah v radarski napravi, saj sicer delovanje radarja moti termični šum [8].

## 2.2 Izvedba kvantnega radarja

Metodo kvantne osvetlitve je mogoče izvesti s signali iz širokega frekvenčnega območja. Kljub temu je še vedno potrebno upoštevati slabljenje signala pri prehodu skozi ozračje, tako da so še vedno najbolj uporabne tiste frekvence, ki jih za delovanje že sedaj uporabljajo klasični radarji, to je od 100 MHz do 36 GHz, in ponekod nekaj sto gigahertzov v primeru radarjev, ki delujejo na milimetrovalovnem valovnem področju. Področje kratkih valovnih dolžin kljub temu ostaja zanimivo področje za nadaljnje raziskave.

Za generiranje kvantno prepletenih fotonov je bilo do sedaj predlaganih nekaj možnih metod, med drugimi spontana parametrična pretvorba navzdol (angl. *Spontaneous Parametric Down-Conversion* – SPDC) [7], harmonsko generiranje (angl. *Harmonic Generation*) [9] in elektro-optomehanska votlina (angl. *electro-optomechanical cavity*) [10–13]. Prva, ki je prikazana na Sliki 3, z uporabo nelinearnih kristalov, na primer barij-borovega oksida, žarek fotonov razcepi na dva žarka nižje frekvence, druga pa hkrati proizvede en rod mikrovalovnega in en rod optičnega valovanja, pri čemer se proti tarči odda mikrovalovno valovanje. Pri tej metodi obstaja tudi možnost povratne vezave



Slika 3: Kvantno prepleten izvor. a) Blokovni načrt generiranja prepeltenih fotonov v nelinearnem optičnem kristalu. b) Energijski nivoji pri pretvorbi fotonov.

med optično in elektromagnetno votlino, ki v praksi predstavlja obnovitev dela prvotne kvantne prepletenosti in pomaga pri zmanjševanju izgub v oddajnem delu radarja. V primeru elektro-optomehanske votline je nato potrebno sprejeto odbito mikrovalovno valovanje v podobni elektro-optomehanski votlini pretvoriti v optične fotone, na katerih nato tako kot pri metodi s spontano pretvorbo navzdol skupaj s fotoni, ki so bili ohranjeni na napravi, izvedemo meritve kvantne prepletenosti [7, 8].

V strogo nadzorovanem laboratorijskem okolju je raziskovalcem s pomočjo linearnega zaznavanja (homodinskega in heterodinskega) in veliko naknadne obdelave podatkov uspelo validirati koncept kvantno izboljšane šumnega radarja, ki je za delovanje uporabljal dva kvantno prepletena signala. Poskus je bil izveden z dvema kvantno prepletenima mikrovalovnima žarkoma. Oba signala sta bila najprej ojačana, pri čemer je bil prvi poslan na heterodinski detektor, drugi pa proti območju s tarčo. Pri zaznavanju sta bila signala primerjana preko digitalnega fazno-kvadrature sprejemnika, ki je z meritvijo linearne kvadrature signalov praktično izmeril korelacijo med njima. Celoten postopek je bil izveden pod kirogenimi pogoji pri temperaturi 7 mK.

Praktično je bil demonstriran tudi kvantni radar, ki deluje na podlagi štetja fotonov. Pri poskusu je bil kot tarča uporabljen cirkulator z nastavljenim zareznim filtrom, ki mu je sledil 12 metrov dolg koaksialni kabel, kar je omogočalo sprotno nastavljanje odbojnosti tarče. Odbitemu signalu je bil na koncu dodan še termični šum. V poskusu so izmerili za 20% boljšo zmogljivost kvantnega radarja v primerjavi s tradicionalnimi radarskimi sistemi [8].

## 2.3 Kvantni LiDAR

Kvantni LiDAR za razliko od mikrovalovnega radarja za svoje delovanje ne potrebuje kirogenih temperatur, tako da v radarski napravi ni potrebno izvesti kirognega hladilnega sistema. Prav tako ima v primerjavi z radarji dosti boljšo ločljivost in natančnost, dobro pa deluje tudi v slabih vremenskih pogojih. Tako kot pri mikrovalovnih radarjih, se je tudi pri optičnih radarjih izkazala prednost kvantne osvetlitve pred klasičnimi izvori svetlobe. Po drugi strani kvantna osvetlitev za zagotavljanje večjega dosega potrebuje visoke oddajne moči [8].

## 2.4 Kvantna radarska odmevna površina

Kvantni radarji pri delovanju oddajajo skupke fotonov, ki se pri odbojih od tarče podrejajo zakonom kvantne elektrodinamike, zaradi česar je klasična definicija radarske odmevne površine [14] teoretsko nekonsistentna, tako da je potrebno uvesti nov koncept kvantne radarske odmevne površine. Po analogiji s klasično radarsko odmevno površino tudi tu zahtevamo, da vrednost objektivno odraža vidnost tarče za radar, predpostavlja ohranitev energije ob zanemarnih absorpcijskih pojavih, je odvisna tako od geometrije kot od materiala, iz katerega je tarča izdelana, ni odvisna od lastnosti radarskega sistema, in jo je možno primerjati z klasično radarsko odmevno površino, proti kateri tudi limitira pri velikem številu fotonov [8].

## 3 Sklep

Članek prinaša pregled prelomnih tehnologij daljinskega zaznavanja in kvantnih tehnologij, pri čemer se osredotoča na temeljna načela, potencialno uporabo in nedavni napredek. Kvantno daljinsko zaznavanje uporablja kvantno prepletenost in superpozicijo za doseganje višje občutljivosti in ločljivosti v primerjavi s klasičnimi metodami. Zlasti kvantni radar uporablja edinstvene lastnosti prepletenih fotonov za izboljšanje zmogljivosti zaznavanja ciljev in slikanja, kar ponuja znatne prednosti v smislu prikritosti, odpornosti proti šumu in varnosti informacij. Članek nudi pregled ključnih teoretičnih konceptov, vključno s kvantno osvetlitvijo in kvantno interferometrijo, ter vodi razpravo o nedavnih poskusih, ki prikazujejo izvedljivost in prednosti teh tehnologij. Poleg tega članek obravnava tehnične izzive in prihodnje usmeritve za raziskave in razvoj na tem nastajajočem področju.

## Zahvala

Delo je nastalo pod okriljem projekta J2-50072 in programa P2-0246 Javne agencije za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije.

## Literatura

- [1] J. Tratnik and B. Batagelj, "Predstavitev ideje kvantnega šifriranja in pregled osnovnih tehnik kvantnega razdeljevanja ključa," *Elektrotehniški vestnik*, vol. 75, no. 5, pp. 257–263, 2008.
- [2] B. Batagelj, "Kvantni internet," in *Zaupanja vreden internet: zbornik referatov = Trusted internet: proceedings*, ser. Štiriintrideseta delavnica o telekomunikacijah VITEL. Brdo pri Kranju, Slovenija: Slovensko društvo za elektronske komunikacije, 2018, pp. 35–39.
- [3] S. Singh, "Instrument applications in quantum for the aerospace and defense industry," *Microwave Journal*, vol. 63, no. 9, 2020.
- [4] B. Batagelj, "Varen prenos informacij s pomočjo kvantne fotonske tehnologije," *Avtomatika*, no. 165, pp. 8–13, 2018.
- [5] L. Hayward, "The future of inertial navigation is classical-quantum sensor fusion," Jun 2024. [Online]. Available: <https://www.advancednavigation.com/tech-articles/the-future-of-inertial-navigation-is-classical-quantum-sensor-fusion>
- [6] C. Wood, "Pioneering Quantum Physicists Win Nobel Prize in Physics," Oct. 2022. [Online]. Available: <https://www.quantamagazine.org/pioneering-quantum-physicists-win-nobel-prize-in-physics-20221004/>
- [7] M. Mathews, "A study on quantum radar technology developments and design consideration for its integration," 2022. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2205.14000>
- [8] R. Gallego Torromé and S. Barzanjeh, "Advances in quantum radar and quantum lidar," *Progress in Quantum Electronics*, vol. 93, p. 100497, 2024.
- [9] X. Wang, Z. Liu, B. Chen, G. Qiu, D. Wei, and J. Liu, "Experimental Demonstration of High-Efficiency Harmonic Generation in Photonic Moiré Superlattice Microcavities," *Nano Letters*, 2024.
- [10] N. Lauk, N. Sinclair, S. Barzanjeh, J. P. Covey, M. Saffman, M. Spiropulu, and C. Simon, "Perspectives on quantum transduction," *Quantum Science and Technology*, vol. 5, no. 2, p. 020501, mar 2020.
- [11] S. Barzanjeh, A. Xuereb, S. Gröblacher, M. Paternostro, C. A. Regal, and E. M. Weig, "Optomechanics for quantum technologies," *Nature Physics*, vol. 18, no. 1, pp. 15–24, 2022.
- [12] S. Barzanjeh, M. Abdi, G. J. Milburn, P. Tombesi, and D. Vitali, "Reversible optical-to-microwave quantum interface," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 109, p. 130503, Sep 2012.
- [13] S. Barzanjeh, D. Vitali, P. Tombesi, and G. J. Milburn, "Entangling optical and microwave cavity modes by means of a nanomechanical resonator," *Phys. Rev. A*, vol. 84, p. 042342, Oct 2011.
- [14] P. Nimač, P. Miklavčič, and B. Batagelj, "Samogradnja radarskega trirobnika s kvadratno stranico in meritev njegove odmevne površine," in *Zbornik tridesete mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2021*. Slovenska sekcija IEEE; Fakulteta za elektrotehniko, 2021, p. 48–51.