



UNIVERZA V LJUBLJANI
Fakulteta za elektrotehniko

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko
University of Ljubljana, Faculty of Electrical Engineering



27. SEMINAR RADIJSKE KOMUNIKACIJE

Ljubljana, 4. do 6. februarja 2026

Z B O R N I K

27TH SEMINAR ON RADIO COMMUNICATIONS

Ljubljana, 4 to 6 February 2026

P R O C E E D I N G S

UREDILA/EDITORS:

Tomi Mlinar, Boštjan Batagelj

Katalogni zapis o publikaciji (CIP) pripravili v Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani

COBISS.SI-ID 267091203

ISBN 978-961-243-485-4 (PDF)

URL: <https://srk.fe.uni-lj.si/zborniki/>

Copyright © 2026 Založba FE. All rights reserved. Razmnoževanje (tudi fotokopiranje) dela v celoti ali po delih brez predhodnega dovoljenja Založbe FE prepovedano.

Naslov: SRK 2026: 27. Seminar radijske komunikacije; Zbornik / 27th Seminar on Radio Communications; Proceedings

Založnik: Založba FE, Ljubljana

Izdajatelj: Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana

Urednik: prof. dr. Sašo Tomažič

Kraj in leto izida: Ljubljana, 2026

1. elektronska izdaja



Gradivo za interno uporabo na 27. seminarju Radijske komunikacije SRK 2026.
Material for internal use at the 27th Seminar on Radio Communications SRK 2026.

Uredila / *Editors:* Tomi Mlinar, Boštjan Batagelj

Uvodnik

Spoštovana bralka, spoštovani bralec zbornika 27. seminarja Radijske komunikacije. Veseli naju, da držite v rokah gradivo, ki povzema najnovejše raziskave, merilne študije in industrijske izkušnje s področij radijskih komunikacij, brezžičnih omrežij in digitalnih sistemov. Tudi letošnji nabor prispevkov odseva temeljno poslanstvo seminarja: povezovati akademijo in prakso, utrjevati strokovno skupnost ter odgovarjati na vprašanja, ki jih v omrežjih prihodnosti odpirata digitalizacija in umetna inteligenca.

Letošnji prispevki odpirajo tri prepoznavne vsebinske osi:

Spekter in standardizacija – od pregledov odločitev po WRC-23 in pogledov proti WRC-27, do postopkov standardizacije Wi-Fi z aktualnim poudarkom na Wi-Fi 8 (IEEE 802.11bn) ter praktičnih meritev Wi-Fi 7 in Mesh v stanovanjskih okoljih. Avtorji prispevkov ponudijo tako regulativni okvir kot merilne podatke in vidike uporabniške izkušnje.

5G v praksi in koraki proti 6G – predstavljene so zasebne 5G (MPN) rešitve za industrijo in kritično infrastrukturo, prenos AV-vsebin prek 5G v profesionalni televizijski produkciji ter arhitekture, ki od avtomatizacije prehajajo k inteligenci z oporo v AI-nativnih principih. Prispevki osvetlijo tudi vidike trajnosti, učinkovitosti in interoperabilnosti v uvajanjih rešitev v prakso.

Senzorika, radarske tehnologije in GNSS – od FMCW vremenskih radarjev in radarjev v vozilih do koherentnih porazdeljenih radarjev ter GNSS meritev v ekstremnih pogojih; nabor tem dopolnjujejo razprave o ultra-nizki zakasnitvi v radijskih komunikacijah, samonastavljivih antenah na področju mm-valov ter faznem merjenju razdalje v IoT. Skupna nit je iskanje robustnosti in zanesljivosti v zahtevnih okoljih.

Kot v predhodnih letih je seminar tudi tokrat zasnovan kot platforma vseživljenjskega učenja, ki združuje vrhunske domače in mednarodne strokovnjake ter na eni strani pogloblja temeljno znanje, na drugi pa prinaša empirične meritve, primerjalne študije in praktične uvide za inženirske odločitve v realnih sistemih.

Iskrena hvala avtorjem in recenzentom za vložen trud ter udeležencem za dejavno soustvarjanje naše skupnosti. Zbornik naj vam bo uporaben spremljevalec pri laboratorijskem delu, projektnih odločitvah in razmisleku o smeri, v katero vodimo razvoj radijskih omrežij v letih do 2030 in naprej. Ob tem ohranjamo osnovni namen seminarja, to je spoštovanje do zgodovine stroke ter odprtost za nove izzive.

Ljubljana, 4. februarja 2026

Tomi Mlinar in Boštjan Batagelj

urednika

Foreword

Dear reader of the proceedings of the 27th Seminar on Radio Communications!

We are pleased that you are holding a collection of work that brings together the latest research, measurement studies, and industrial insights from the fields of radio communications, wireless networks, and digital systems. This year's selection of articles once again reflects the core mission of the seminar: to connect academia and industry, to strengthen the professional community, and to address the questions posed by digitalization and artificial intelligence as we move toward the networks of the future.

This year's contributions follow three clearly defined thematic pillars:

Spectrum and standardization – from reviews of decisions following WRC-23 and perspectives toward WRC-27, to Wi-Fi standardization processes with a current emphasis on Wi-Fi 8 (IEEE 802.11bn), as well as practical Wi-Fi 7 and Mesh measurements in residential environments. The authors present both the regulatory context and measurement results, together with user-experience-oriented perspectives.

5G in practice and the path toward 6G – featuring private 5G (MPN) solutions for industry and critical infrastructure, the transmission of AV content over 5G in professional TV production, and architectures that are evolving from automation toward intelligence supported by AI-native principles. The contributions also highlight aspects of sustainability, efficiency, and interoperability in the practical deployment of these solutions.

Sensing, radar technologies, and GNSS – ranging from FMCW weather radar and automotive radar to coherent distributed radar and GNSS measurements in extreme environments. This thematic set is complemented by discussions on ultra-low-latency radio communications, self-adjusting antennas in the mmWave domain, and phase-based ranging in IoT. The common thread is the pursuit of robustness and reliability in demanding environments.

As in previous years, the seminar remains a platform for lifelong learning, bringing together leading domestic and international experts. On the one hand, it deepens fundamental knowledge; on the other, it provides empirical measurements, comparative studies, and practical insights to support engineering decisions in real-world systems.

Our sincere thanks go to all authors and reviewers for their dedicated effort, and to all participants for actively shaping our community. We hope these proceedings will serve as a valuable companion in laboratory work, project planning, and in reflecting on the direction in which we steer the development of radio networks toward 2030 and beyond. In doing so, we maintain the essential spirit of the seminar: respect for the history of the field and openness to new challenges.

Ljubljana, February 4, 2026

Tomi Mlinar and Boštjan Batagelj

Editors

Seznam prispevkov

	Avtor(ji)	Naslov predavanja	Stran
1	Meta Pavšek Taškov	Upravljanje radijskega spektra po WRC-23 in priprave na WRC-27	5
2	Alojz Hudobivnik	Izzivi pri upravljanju frekvenčnega spektra za državne potrebe	9
3	Drago Majcen	Postopki standardizacije na področju tehnologij Wi-Fi	12
4	Gorazd Penko	Wi-Fi 7 in Mesh: meritve in izzivi domačih omrežij	16
5	Andrej Trojer	Trajnost sistema RTV	24
6	Janez Öri, Urban Zaletel	Vloga zasebnih 5G omrežij v industriji in kritični infrastrukturi	29
7	Anže Zadravec, Andrej Kos, Matevž Pogačnik, Klemen Pečni	Prenos avdio-video vsebin preko omrežij 5G v profesionalni TV produkciji	33
8	Janez Sterle	Od avtomatizacije do inteligence v 6G: Kako umetna inteligenca preoblikuje mobilne sisteme prihodnosti	39
9	Aljaž Blatnik, Luka Zmrzlak	Visokofrekvenčna elektronika v ekstremnem mrazu - meritve signalov GNSS na Antarktiki	44
10	Matjaž Vidmar	Vremenski radar FMCW	48
11	Vjekoslav Matić	Radarji v vozilih	55
12	Luka Podbregar	Videti nevidno: Koherentni porazdeljeni radarji za zaznavanje objektov z nizko odmevno površino	59
13	Primož Lemut, Jurij Tratnik	Radijske komunikacije z zelo nizko zakasnitvijo	62
14	Ivana Kesić	Popravek motenega signala GNSS	66
15	Luka Naglič, Robert Vilhar, Fabio Rosato	Samonastavljive antene za področje mm-valov	70
16	Tomaž Javornik, Grega Morano, Andrej Hrovat	Merjenje razdalje na osnovi faze sprejetega signala v napravah IoT	74
17	Martin Petek	Valovodi z zračno režo in njihova praktična uporaba	78
18	Leon Kocjančič	Detekcija in sledenje v radarskih sistemih	82
19	Stanislaw Jasinski	Osnove digitalnih modulacij in kako jih meriti	87
20	Srdjan Knežević	Zakaj rabimo 6G?	89
21	Ivan Lesić	Omrežja, pripravljena na prihodnost in umetna inteligenca	98

Seznam plakatov

	Avtor(ji)	Naslov plakata	Stran
P1	Martin Petek	Reševalniki lastnih vrednosti za periodične strukture v šestkotni rešetki	101
P2	Boštjan Batagelj, Dušan Gleich	Odkrivanje objektov pod površino z georadarjem	102
P3	Ivana Kesić, Aljaž Blatnik, Carolina Fortuna, Blaž Bertalanič	Popravljanje odstopanj GNSS zaradi motenj z uporabo globokih časovnih grafovFi	103
P4	Primož Smogavec, Blaž Pongrac, Marko Vovk, Jon Tofant, Andrej Sarjaš, Pane Andov, Dušan Gleich	Napredne metode zaznavanja objektov pod površino	104
P5	Andrej Lavrič, Boštjan Batagelj, Matjaž Vidmar	Posledice faznega šuma v sodobnih Dopplerjevih radarskih sistemih	105
P6	Brin Soko, Mihael Zeme, Kristjan Komloši, Tomaž Terčič, Jaka Urh, Filip KoceliAljaž Blatnik, Boštjan Batagelj	Preprost visokofrekvenčni radar na 2,4 GHz	106

Table of contents

	Author(s)	Article	Page
1	Meta Pavšek Taškov	Radio Spectrum Management after WRC-23 and Preparations for WRC-27	5
2	Alojz Hudobivnik	Challenges in Managing Frequency Spectrum for State Needs	9
3	Drago Majcen	Standardization Procedures in Wi-Fi Technologies	12
4	Gorazd Penko	Wi-Fi 7 and Mesh: Measurements and Challenges of Home Networks	16
5	Andrej Trojer	Sustainability of the RTV System	24
6	Janez Ōri, Urban Zaletel	The role of private 5G networks in industry and critical infrastructure	29
7	Anže Zadavec, Andrej Kos, Matevž Pogačnik, Klemen Pečni	5G-Based Audio-Visual Content Transmission for Broadcast Production	33
8	Janez Sterle	From Automation to Intelligence in 6G: How AI Transforms Future Mobile Systems	39
9	Aljaž Blatnik, Luka Zmrzlak	High-Frequency Electronics in Extreme Cold – GNSS Signal Measurements in Antarctica	44
10	Matjaž Vidmar	FMCW Weather Radar	48
11	Vjekoslav Matić	Radars in Vehicles	55
12	Luka Podbregar	Seeing the invisible: Coherent distributed radars for detecting objects with low echo surfaces	59
13	Primož Lemut, Jurij Tratnik	Radio Communications with Ultra-Low Latency	62
14	Ivana Kesić	Jamming Correction of GNSS Signal	66
15	Luka Naglič, Robert Vilhar, Fabio Rosato	Self-Adjusting Antennas for mm-Wave Range	70
16	Tomaž Javornik, Grega Morano, Andrej Hrovat	Phase-Based Ranging in IoT Devices	74
17	Martin Petek	Slotted Waveguides and Their Practical Use	78
18	Leon Kocjančič	Detection and Tracking in Radar Systems	82
19	Stanislaw Jasinski	Basics of Digital Modulations and How to Measure Them	87
20	Srdjan Knežević	The need for 6G	89
21	Ivan Lesić	Future-Proof Network and AI	98

List of posters

	Author(s)	Poster	Page
P1	Martin Petek	Eigenvalue solvers for periodic structures in a hexagonal lattice	101
P2	Boštjan Batagelj, Dušan Gleich	Ground-penetrating radar for subsurface object detection	102
P3	Ivana Kesić, Aljaž Blatnik, Carolina Fortuna, Blaž Bertalanich	Correcting GNSS interference-induced deviations using deep time graphs	103
P4	Primož Smogavec, Blaž Pongrac, Marko Vovk, Jon Tofant, Andrej Sarjaš, Pane Andov, Dušan Gleich	Advanced techniques for subsurface object detection	104
P5	Andrej Lavrič, Boštjan Batagelj, Matjaž Vidmar	Consequences of phase noise in modern Doppler radar systems	105
P6	Brin Soko, Mihael Zeme, Kristjan Komloši, Tomaž Terčič, Jaka Urh, Filip Koceli, Aljaž Blatnik, Boštjan Batagelj	Simple high-frequency radar at 2.4 GHz	106

Upravljanje radijskega spektra po WRC-23 in priprave na WRC-27

Meta Pavšek Taškov

Agencija za komunikacijska omrežja in storitve

meta.pavsek-taskov@akos-rs.si

Radio Spectrum Management after WRC-23 and Preparations for WRC-27

Abstract. This article presents AKOS activities in spectrum management for Wireless Broadband Electronic Communication Services following WRC-23 and preparing for WRC-27. The article highlights strategic goals and legal framework, WRC-23 results, and spectrum assignments between 2023 and 2025. It emphasizes spectrum allocation for vertical industries and the upcoming public tender for mobile network operators, including new bands for WBB ECS. Preparations for WRC-27 focus on aligning international requirements and upgrading existing services.

1. Uvod

AKOS izvaja aktivnosti na področju upravljanja radiofrekvenčnega spektra za širokopasovne elektronske komunikacijske storitve po konferenci WRC-23 in se pripravlja na WRC-27. V članku so predstavljeni strateški cilji in pravna podlaga, rezultati WRC-23 in podelitve med letoma 2023 in 2025. Poseben poudarek je na spektru za vertikalne industrije ter na načrtovanem javnem razpisu za mobilne operaterje in novih frekvenčnih pasovih za WBB ECS. Priprave na WRC-27 vključujejo usklajevanje mednarodnih zahtev in nadgradnjo obstoječih storitev.

2. Strateški cilji in pravna podlaga

Strategija AKOS za obdobje 2024–2030 [1] poudarja potrebo po predvidljivem upravljanju spektra, univerzalni povezljivosti ter podpori vertikalnim sektorjem.

Glavni strateški cilji AKOS na področju radiofrekvenčnega spektra, z namenom uporabe za doseg največjega možnega družbeno ekonomskega napredka, v obdobju 2024 – 2030, so:

1. Zagotavljanje predvidljivosti pri upravljanju in podeljevanju radiofrekvenčnega spektra.
2. Globalna usklajenost spektra za zagotavljanje ekonomije obsega.

3. Pokritost vseh naseljenih območij do leta 2030 z omrežji 5G.
4. Internetna povezljivost s hitrostjo najmanj 100 Mb/s za vsa slovenska gospodinjstva.
5. Začetek uvajanja omrežja 6G.

Agencija je pri izvajanju aktivnosti upravljanja z radiofrekvenčnim spektrom zasledovala naslednja splošna načela iz Strategije 2024 -2026 [2]:

- pravočasno zagotavljanje zadostne količine spektra za uvajanje najnovejših tehnologij;
- spodbujanje učinkovite konkurence pri zagotavljanju storitev na trgu in souporabe;
- zagotavljanje povezljivosti med ljudmi in stvarmi;
- spodbujanje digitalizacije slovenskega gospodarstva in lokalnih skupnosti;
- proučevanje potencialne konvergence javnih mobilnih in radiodifuznih omrežij;
- transparentnost - vključevanja zainteresirane javnosti v postopke podeljevanja frekvenc v obliki javnih posvetovanj.

Primarno pravno podlago predstavlja Pogodba o delovanju EU (PDEU) [3], predvsem naslednji členi:

- člen 114 – harmonizacija notranjega trga (telekomunikacije, oprema, standardi),
- člen 173 – industrijska politika (konkurenčnost EU digitalne industrije),
- člen 170–172 – transevropska omrežja (TEN-T / digitalna infrastruktura) in
- člen 179–190 – raziskave in tehnološki razvoj (Horizon Europe, 6G).

Ključna sekundarna zakonodaja (zavezujoče pravo) je:

- Evropski zakonik o elektronskih komunikacijah (EECC), direktiva (EU) 2018/1972 – prenešana v ZEKom-2
- Uredba o prostem pretoku neosebni podatkov, Uredba (EU) 2018/1807 (Pomembna za 5G/6G: omogoča edge computing, IoT, industrijski 5G, prepoved neupravičene lokalizacije podatkov)

- Akt o kibernetiki varnosti Uredba (EU) 2019/881 (pravna podlaga za varnost 5G/6G omrežij)
- NIS2 direktiva Direktiva (EU) 2022/2555 (Ključna za varnost 5G in prihodnjih 6G omrežij.)

Strateški dokumenti EU in Slovenije so:

- Akcijski načrt EU za 5G (5G for Europe: An Action Plan) (2016)
- Skupni nabor orodij EU za varnost 5G (EU 5G Toolbox) (2020)
- Digitalni kompas 2030 (Digital Compass: the European way for the Digital Decade) (strateški cilji do 2030: 5G povsod, priprava na uvedbo 6G, digitalna suverenost)
- Digitalna Slovenija 2030 [4], kjer AKOS z upravljanjem radiofrekvenčnega spektra prispeva k naslednjim prednostnim področjem:
 - gigabitna infrastruktura,
 - digitalna preobrazba gospodarstva,
 - pot v pametno družbo 5.0,
 - digitalne javne storitve in
 - kibernetika varnost.

Mnenja Skupine za politiko radijskega spektra (RSPG) o spektru za vertikalne, o okoljskih vidikih, o izklopu 2G/3G in o spektru za 5G/6G so zbrana v dokumentih [5-18].

3. Rezultati konference WRC-23 glede WBB ECS

Rezultati WRC-23 pomembno vplivajo na prihodnji razvoj mobilnih storitev. Nekaj poudarkov je zbranih v naslednjih alinejah [19]:

AI1.1: IMT 4800-4900 MHz - zmanjšanje omejitev - ni sprememb oziroma zaščita RaAlt.

AI1.2: Novi pasovi za IMT:

- A: 3300-3400 MHz R1 - ni sprememb oziroma zaščita radarjev;
- B: 3300-3400 MHz R2 - ni sprememb oziroma zaščita radarjev;
- C: 3600-3800 MHz R2 – sprejeto;
- D: 6425–7025 MHz R1 - : dodelitev za IMT pod 5 pogoji – RR Opomba FN 5.457E;
- E: 7025-7125 MHz (R1+R3) RR Opomba FN 5.457E;
- F: 10.0-10.5 GHz R2 - Ni sprememb oziroma zaščita EESS.

AI1.3: 3600-3800 MHz R1 nadgradnja statusa alokacije za mobilno storitev v primarno;

AI1.4: uporaba HAPS kot IMT bazno postajo HIBS v IMT pasovih pod 2,7 GHz -> dodelitev možnosti v pasovih 700, 800, 900, 1800, 2100 in 2600 MHz;

AI1.5: Revizija uporabe spektra v pasu 470-960 MHz v Regiji 1 - RR FN. 5.295A sekundarna mobilna dodelitev in možnost nadgradnje v primarno 2031.

4. 6G

Prihod 6G bo temeljil na izjemni učinkovitosti, nižjih zakasnitvah, večji zanesljivosti in podpori za nove storitve, kot so porazdeljeni senzorski sistemi, robotika ter hibridna satelitsko-mobilna omrežja [20].

Evropske analize trenutno proučujejo predvsem frekvenčne pasove 4,4–4,8 GHz, 7,125–8,4 GHz in 14,8–15,35 GHz, v splošnem se pa predviden spekter za 6G razteza od 0,1 GHz pa vse do 10 THz, kjer so spodnji pasovni namenjeni pokrivanju in kapaciteti, zgornji pasovi (v področju THz) pa izjemno velikim hitrostim.

Šest uporabniških scenarijev za IMT-2030 je zbranih v dokumentu [21].

5. Strategija 2024-2026

V obdobju 2024–2026 AKOS načrtuje več korakov, ki se nanašajo na določene dele frekvenčnega spektra:

1. 800/900/1800/2600 MHz—priprava razpisa za nacionalno pokrivanje;
2. 6 GHz—določitev pogojev za dodelitev pasu na 6 GHz. Mnenje RSPG o 6 GHz pasu (RSPG25-031 z novembra 2025) določa del pasu 6425 – 7125 MHz, ki bo na voljo za javno mobilno tehnologijo in del pasu za WAS/RLAN. Mnenje je pogojeno z odločitvijo WRC-27.
3. 26/40 GHz—19. 9. 2025 je bil objavljen posvetovalni dokument - tržni interes za pasove 40,5 – 43,5 GHz in za ne-podeljeni del civilnega dela pasu 26 GHz za nacionalno pokrivanje. Do roka do vključno 20. 10. 2025 je agencija prejela odgovore deležnikov. Ni bilo interesa. Ponovljeno povpraševanje glede tržnega interesa bo Q1/2027. V primeru interesa bo spekter podelila skupaj s frekvencami za 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz in 2600 MHz.
4. 2300 MHz in 3600 MHz—podelitev dela spektra za IMT lokalno.

Pomembne akcije, ki so zapisane v Strategiji upravljanja z radiofrekvenčnim spektrom 2024-2026:

- Akcija 4: skladno s 4. členom ECC DEC2017/899 v UHF frekvencah testirati 5G unicast in broadcast ob zaščiti DTT skladno z GE 06 do WRC-31 (več delavnic-posvetov, ECC – delovna točka o začetku uvajanja mobilnih storitev).
- Akcija 6: podelitev radijskih frekvenc v pasu 410-430 MHz za vertikalne oziroma za tehnološko/storitveno nevtrarno (IMT) - področje Republike Slovenije – delo na preferenčnih sporazumih in posodobitvi

tehnične regulative za 5G v tem pasu - Sporazum med SVN, AUT, HRV in HNG v sklepni fazi priprave.

- Akcija 7: v primeru pobude pristojnim organom pomagati pri izvedbi postopkov podelitev spektra za PPDR (IMT 450 MHz in 700 MHz) – delo na preferenčnih sporazumih in posodobitvi tehnične regulative za 5G v pasu 450 MHz - Sporazum med SVN, AUT, HRV in HNG je v sklepni fazi priprave.
- Akcija 10: prehod železniških aplikacij iz 450 MHz v 874,4-880 MHz/919,4-925, 1900-1910 MHz – FM 56 je dokončala delo. Ni interesa.
- Akcija 11: Dražba za M2M v 700 MHz pasu za poslovno kritične storitve – pobuda – planirana priprava javnega razpisa lokalno v Q2/2026. Umaknjena pobuda.
- Akcija 8: podelitev v BWA (preko IMT) 28 GHz za vertikale oziroma za tehnološko/storitveno nevtralno podelitev za lokalno uporabo (28,0 – 28,4 GHz, 29,0 – 29,4 GHz) -povpraševanje po interesu v okviru 26/40 GHz. Ni bilo interesa.
- Akcija 9: podelitev radijskih frekvenc v pasu 3800 – 4200 MHz za IMT za vertikale – lokalno.
- Akcija 3: Uskladiti Metodologijo za preverjanje izpolnjevanja za SA 5G - dokončana Jan/2026.
- Akcija 12: Podelitev MMDS 10&12 GHz – 2024 končano.
- Akcija 13: Podelitev na vlogo za potrebe meritev, atestiranja in drugih preizkusov radijske opreme ter za preizkušanje novih tehnologij.
- Akcija 14: P-P 92 do 174,8 GHz (oprema v razvoju) in prehod iz 26 GHz v pas 32 GHz - dokončan.
- Akcija 15: Prerazporeditev Fiksni zvez – končano 2024.

6. Priprave na WRC-27

Na ravni CEPT že potekajo intenzivne priprave na WRC-27. Delovne skupine oblikujejo skupna stališča držav članic glede bodočih frekvenčnih dodelitev, satelitskih integracij ter vprašanj mednarodne harmonizacije. Rezultati teh procesov bodo odločilno vplivali na prihodnjo evropsko frekvenčno politiko.

Novi spekter za 6G (je predviden v naslednjih frekvenčnih pasovih:

AI 1.7:

- 4400-4800 MHz,
- 7125-8400 MHz (ali del pasu) in
- 14,8-15,35 GHz

Za t.i. NATO pasove bo CEPT lahko podprl le frekvenčni pas med 7125 in 7250 MHz.

AI 10:

- 2.6: 102–109,5 GHz, 151,5–164 GHz, 167–174,8 GHz, 209–226 GHz in 252–275 GHz za IMT;

- 2.14: pregledati uporabo spektra in potrebe aplikacij radiodifuznih in mobilnih storitev ter preučiti možne regulativne ukrepe v frekvenčnem pasu 470–694 MHz ali njegovih delih v skladu z resolucijo 235 (o IMT) (Rev. WRC-23);

WRC-27 bo obravnavala možne nove frekvenčne pasove za mobilno-satelitsko storitev (MSS), s čimer bi omogočila direktno satelitsko povezavo (D2D – Direct-to-Device) s standardnimi mobilniki [22]:

AI 1.12: NON-GEO MSS za majhne prenosne hitrosti v pasovih 1427-1432 MHz in 1645.5-1646.5 MHz (vesolje-Zemlja) ter 1880-1 920 MHz in 2010-2025 MHz (vesolje-Zemlja) (Zemlja-vesolje);

AI 1.13: MSS v pasovih za IMT od 694/698 MHz do 2.7 GHz za dopolnitev pokrivanja prizemnega IMT;

AI 1.14: Dodatne dodelitve MSS v pasovih 2010-2025 MHz (Zemlja-vesolje) in 2160-2170 MHz (vesolje-Zemlja) v Regijah 1 in 3 ter 2120-2160 MHz (vesolje-Zemlja) globalno.

7. Literatura

- [1] https://www.akos-rs.si/fileadmin/user_upload/dokumenti/O_agenciji/2025/20250714_PDFN2026_Sprejet.pdf
- [2] https://www.akos-rs.si/fileadmin/user_upload/dokumenti/Radijski_spekter/Strategija_upravljanja_z_rs/Strategija_upravljanja_radiofrekvencnega Spektra_za_obdobje_2024-2026_potrjena.pdf
- [3] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SL/TXT/?uri=celex%3A12016ME%2FTXT>
- [4] Digitalna Slovenija 2030, https://www.gov.si/assets/ministrstva/MDP/Dokumenti/D/SI2030-potrjena-na-Vladi-RS_marec-2023.pdf
- [5] Opinion on 5G implementation challenges (RSPG 3rd opinion on 5G), [Document RSPG19-007](#) (30.1.2019)
- [6] BEREC and RSPG, [Joint Position Paper on spectrum related EMF issues](#) (9.10.2020)
- [7] RSPG Report on the role of radio spectrum policy to help combat climate change, [Document RSPG23-038](#) (October 2023)
- [8] RSPG Report on Mobile technology evolution – experiences and strategies, [Document RSPG23-010](#) (15.2.2023)
- [9] Opinion on spectrum related aspects for next-generation wireless systems (5G), [Document RSPG16-032](#) FINAL (9.11.2016)
- [10] Second Opinion on 5G networks (Strategic Spectrum Road Map Towards 5G for Europe), [Document RSPG18-005](#) (30.1.2018)
- [11] RSPG Opinion on 5G developments and possible implications for 6G spectrum needs and guidance on the rollout of future wireless broadband networks, [Document RSPG23-040](#) (October 2023)
- [12] RSPG Opinion on “How to master Europe's digital infrastructure needs?” [Document RSPG24-019](#) (June 2024)
- [13] RSPG Report on 6G Strategic vision, [Document RSPG25-006](#) (February 2025)
- [14] RSPG Opinion on the EU-level policy approach to satellite Direct-to-Device connectivity and related Single Market issues, [Document RSPG25-020](#) (June 2025)

- [15] RSPG Opinion on Long-term vision for the upper 6 GHz band, [Document RSPG25-031](#) (November 2025)
- [16] RSPG Report on Assessment of future usage of the frequency band 470-694 MHz within the EU, [Document RSPG25-033](#) (November 2025)
- [17] RSPG Interim Opinion on WRC-27, [Document RSPG25-022](#) (June 2025)
- [18] RSPG Opinion on the EU-level policy approach to satellite Direct-to-Device connectivity and related Single Market issues, Document RSPG25-020 (June 2025)
- [19] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SL/TXT/?uri=celex%3A12016ME%2FTXT>
- [20] <https://www.nokia.com/6g/6g-explained/>
- [21] <https://cept.org/files/2621/4%20Eiman%20Mohyeldin%20ECC%206G%20WS%202023-v2.pdf>
- [22] <https://urgentcomm.com/satellite-direct-to-device/spotting-the-losers-in-satellite-d2d>

O avtorju



Meta Pavšek Taškov je diplomirala leta 1990 in magistrirala leta 1993 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Od leta 1995 je zaposlena na Agenciji za komunikacijska omrežja in storitve RS. Od leta 2016 vodi oddelek za mobilne komunikacije. Od leta 2010

predseduje skupini HCM-TWG, od leta 2025 pripravljalni skupini v okviru CEPT ECC PT1 – AAS<1GHz in od 2024 do novembra 2025 je sopredsedovala RSPG - skupini o prihodnji uporabi zgornjega 6 GHz-pasu. Sodelovala je na WRC-15 in WRC-19, kjer je bila namestnica vodje delegacije, ter WRC-23.

Izzivi upravljanja radiofrekvenčnega spektra za državne potrebe

Alojz Hudobivnik

Ministrstvo za obrambo Republike Slovenije (MORS)

alojz.hudobivnik@mors.si

Challenges in Managing Frequency Spectrum for State Needs

Abstract. The radio frequency spectrum represents a finite but strategically critical natural resource, essential for the functioning of key national systems in the fields of defense, public safety, protection and disaster relief, aviation, navigation, and Earth observation. Due to rapid technological advancements, the proliferation of wireless services, the implementation of 5G and forthcoming 6G technologies, and the increasing significance of the space domain, spectrum management is facing new technical, regulatory, and security challenges. This paper examines the national and international frameworks for radio frequency spectrum management tailored to governmental needs, highlights key challenges across specific application areas, and explores the role of research and development projects in shaping future solutions.

1. Uvod

Organi javnega sektorja sodijo med največje in najzahtevnejše uporabnike radiofrekvenčnega (RF) spektra. Zanesljivo delovanje obrambnih sistemov, sistemov javne varnosti, letalstva, pomorske navigacije, satelitskih storitev ter znanstveno-raziskovalnih dejavnosti je neposredno odvisno od razpoložljivosti, zaščite in učinkovite rabe radijskih frekvenc. Radiofrekvenčni spekter je hkrati omejen vir, nad katerim ima država suvereno pravico upravljanja, kar zahteva celosten, dolgoročno usmerjen in usklajen pristop.

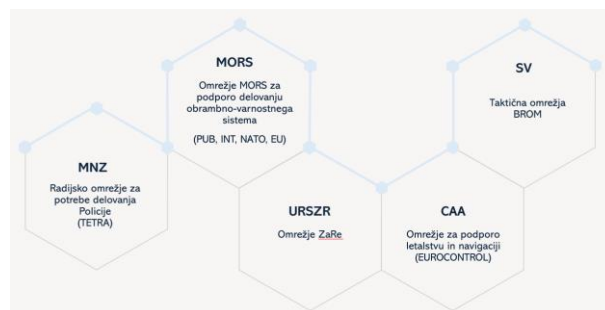
V zadnjih letih se pritisk na spekter močno povečuje, zaradi eksponentne rasti mobilnih komunikacij, interneta stvari, brezpilotnih sistemov ter satelitskih konstelacij. Poseben izziv predstavlja usklajevanje civilnih in vojaških potreb, kjer je potrebno zagotavljati interoperabilnost, hkrati pa zaščito kritičnih in zaupnih storitev.

2. Pravna in institucionalna ureditev v Republiki Sloveniji

Upravljanje radiofrekvenčnega spektra za državne potrebe v Republiki Sloveniji temelji na nacionalni zakonodaji, zlasti na Zakonu o obrambi [1] in Zakonu o elektronskih komunikacijah [2], ter na podzakonskih aktih, ki opredeljujejo uporabo frekvenc za varnost, obrambo in zaščito pred naravnimi ter drugimi nesrečami. Glavno vlogo ima Uredba o upravljanju radijskih frekvenc za državne potrebe [3], katere cilj je zagotoviti enotno načrtovanje, dodeljevanje in koordinacijo spektra za državne uporabnike.

Na institucionalni ravni ima regulatorno vlogo Agencija za komunikacijska omrežja in storitve (AKOS), ki uresničuje suvereno pravico države do regulacije in sodeluje v mednarodnih telekomunikacijskih organizacijah, kot sta ITU-R in CEPT.

Nacionalna državna agencija za radijske frekvence (NARFA) skrbi za upravljanje spektra za državne in vojaške uporabnike ter zagotavlja njegovo učinkovito in varno uporabo. Takšna delitev vlog omogoča jasno ločitev civilnih in državnih pristojnosti ob hkratnem tesnem sodelovanju.



Slika 1. Ključni deležniki pri državni uporabi RF.

3. Civilno-vojaško usklajevanje in mednarodni okvir

Učinkovito upravljanje spektra ni mogoče brez mednarodnega usklajevanja. Slovenija kot članica Nata in Evropske unije sodeluje v mehanizmih, ki zagotavljajo interoperabilnost in preprečevanje škodljivih motenj. Ključno vlogo ima NATO Joint

Civil/Military Frequency Agreement (NJFA), ki predstavlja temeljni okvir za usklajevanje civilne in vojaške rabe spektra.

NJFA je posebej pomemben pri vojaških vajah, kriznem odzivanju in napotnih operacijah, kjer se prepletajo nacionalni in zavezniški sistemi. Usklajevanje temelji na nacionalnih radijskih predpisih (NURF [4]) ter na standardih, kot je SVS STANAG 5641[5], ki zagotavljajo skupne tehnične in operativne postopke.

4. Ključni izzivi po področjih uporabe spektra

4.1 Letalski sektor

Letalski spekter je izrazito zasičen, kar se kaže v prehodu na kanalno razporeditev širine 8,33 kHz za govorno komunikacijo. Uvajajo se nova digitalna omrežja, kot sta npr. LDACS in Link-16, ki izboljšujejo podatkovno izmenjavo, hkrati pa obremenjujejo obstoječi spekter. Dodatni izziv predstavljajo brezpilotni zrakoplovi, ki za varno delovanje potrebujejo ločene krmilne in širokopasovne podatkovne kanale.

4.2 GNSS in PNT storitve

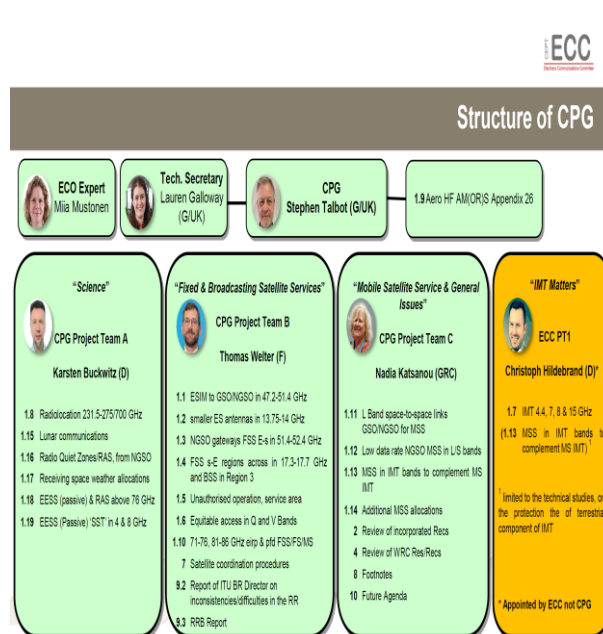
Globalni navigacijski satelitski sistemi (GNSS) so postali kritična infrastruktura za letalstvo, logistiko, sinhronizacijo komunikacijskih omrežij in vsakdanje življenje prebivalstva. Povečana izpostavljenost motnjam, kot sta jamming in spoofing, zahteva dodatne zaščitne ukrepe ter regulativni nadzor, zlasti pri uporabi zaščitnih signalov, kot je Galileo PRS.

4.3 Vesoljska domena

Vesoljska domena doživlja hitro rast, saj se povečuje število satelitskih konstelacij za komunikacije, opazovanje Zemlje in navigacijo. Slovenija sodeluje v evropskih sistemih ter uporablja lastne satelite, kar zahteva ustrezne komunikacijske kanale in zaščito pred motnjami. Poseben izziv predstavlja uvajanje nezemeljskih omrežij (NTN), ki povezujejo satelitske in zemeljske sisteme 5G.

4.4 PPDR in javna varnost

Sistemi za zaščito in reševanje (PPDR) se soočajo s prehodom iz ozkopasovnih tehnologij, kot je TETRA, v širokopasovne rešitve. Po letu 2030 se pričakuje opuščanje trenutnih frekvenčnih pasov, zato se v Evropski uniji preučuje uvedba BB PPDR v pasu okoli 700 MHz. Ključne zahteve ostajajo visoka pokritost ozemlja, zanesljivost delovanja v izrednih razmerah ter interoperabilnost med različnimi službami, tako domačimi kot gostujočimi.



Slika 2. Organizacija evropske priprave na točke WRC-27.

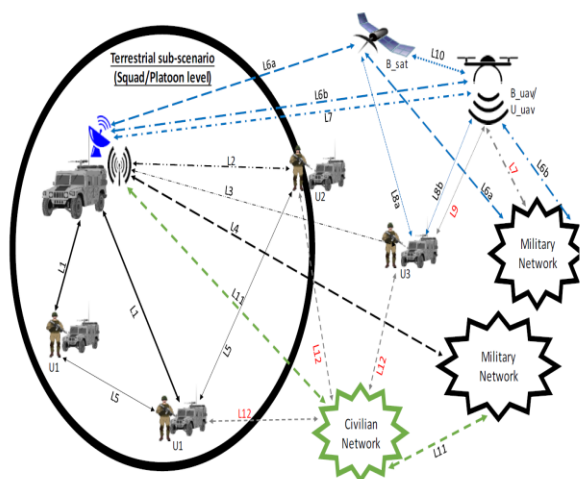
5. Priprave na svetovno radijsko konferenco WRC-27

Svetovne radijske konference ITU predstavljajo osrednji mehanizem za mednarodno razdelitev spektra. Pri pripravah na WRC-27 Republika Slovenija zagovarja zaščito obstoječih storitev v določenih pasovih in previdnost pri uvajanju novih mobilnih storitev, zlasti tam, kjer bi to lahko povzročilo škodljive motnje. Posebna pozornost je namenjena pasovom za satelitske komunikacije ter zagotavljanju dolgoročne stabilnosti za državne in varnostne uporabnike.

6. Vloga 5G in prihodnjih tehnologij

Tehnologija 5G odpira nove možnosti za državne uporabnike, zlasti na področju namenskih omrežij, rezinjenja omrežja (ang. network slicing), neposredne komunikacije med napravami (D2D) in majhnih zakasnitev. Kljub temu ostaja odprto vprašanje, kdaj in kako bodo kritične državne storitve prešle na infrastrukturo 5G, ob upoštevanju varnostnih in operativnih zahtev.

Vojaške aplikacije 5G vključujejo podporo operacijam v kopenski, pomorski, zračni in vesoljski domeni ter integracijo z obstoječimi taktičnimi sistemi. Takšna arhitektura zahteva visoko stopnjo avtonomnosti, interoperabilnosti in zanesljivo upravljanje spektra.



Slika 3. Primer omrežja 5G za vojaške operacije.

7. Raziskovalno-razvojni projekti in prihodnji trendi

Raziskovalno-razvojni projekti, kot so IST-231 [6], novi ARIS-ovi CRP-ji in pobude na področju dinamičnega upravljanja spektra, prispevajo k razvoju novih rešitev za učinkovitejšo rabo frekvenc. Poseben poudarek je na integraciji umetne inteligence za optimizacijo omrežij, masovnih strojnih komunikacijah ter podpori avtonomnim sistemom. Ti projekti predstavljajo pomembno osnovo za prihodnje tehnologije 6G in njihovo uporabo v državnih sistemih.

8. Zaključek

Upravljanje radiofrekvenčnega spektra za državne potrebe postaja vse bolj kompleksna naloga, ki zahteva usklajevanje tehničnih, regulativnih in varnostnih vidikov. Naraščajoče potrebe po spektru, razvoj novih tehnologij ter vse večja vloga vesoljske domene terjajo proaktiven in strateški pristop. Le z učinkovitim civilno-vojaškim sodelovanjem, mednarodnim usklajevanjem in vlaganji v raziskave bo mogoče zagotoviti zanesljiv in varen dostop do spektra za prihodnje generacije državnih storitev.

9. Literatura

- [1] Zakon o obrambi (ZObr), <https://pisrs.si/pregledPredpisa?id=ZAKO532>
- [2] Zakon o elektronskih komunikacijah (ZEKom-2), <https://pisrs.si/pregledPredpisa?id=ZAKO8611>
- [3] Uredba o upravljanju radijskih frekvenc za državne potrebe, <https://pisrs.si/pregledPredpisa?id=URED3187>
- [4] Splošni akt o načrtu uporabe radijskih frekvenc (NURF-5), https://pisrs.si/pregledPredpisa?id=AKT_1301
- [5] Spectrum Management in Military Operations, SVS STANAG 6541(2) AEMP-01(A) Ver. 1, <https://nso.nato.int/nso/nsdd/main/standards/stanag-details/9516/EN>

- [6] IST-231 Selected Challenges on Future-G Developments, <https://www.sto.nato.int/wp-content/uploads/20250210-uc-ikm-nato-science-and-technology-organization-2025-collaborative-programme-of-work.pdf>

O avtorju



Alojz Hudobivnik je diplomiral leta 1983 in magistriral leta 1989 na Fakulteti za elektrotehniko in računalništvo v Ljubljani. Zaposlen je bil v Iskra Delti in kasneje v podjetjih Iskratel in NiceLabel. Vodi podjetje AH.TS, sedaj pa dela kot radiofrekvenčni koordinator

(NARFA) na MORS. V podjetju Iskratel je vodil razvojni oddelek programske opreme signalizacije št. 7 na sistemu EWSD, projekt uvajanja ATM in ADSL v Sloveniji, profitni center novih podatkovnih rešitev, skrbel za strokovno-tehnično usposabljanje in bil nazadnje svetovalec tehničnega direktorja. Intenzivno deluje na področju mednarodne standardizacije, kjer od leta 1994 zastopa Slovenijo v ITU-T na področju konceptov in zahtev razvoja omrežja. V letih 2009–2012 je bil koporočevalec Q21/13 (Future networks), od 2012-2016 namestnik vodje ITU-T SG13 WP3 (Future networks and SDN) in poročevalec Q15/13 (Data aware networking), potem (2019-2024) namestnik vodje ITU-T SG13 WP1 (IMT-2020 Networks & Systems). Na SIST je bil od 2011-2015 član, sedaj (2015-2027) pa predseduje Strokovnemu svetu za elektrotehniko, informatiko in telekomunikacije. Med drugim je bil udeleženelec WTSA-24, ITU PP-22 in WRC-23. Slovenijo zastopa v »EU MSP for ICT standardization«, CENELEC BT in podskupini za standardizacijo »EU AI Board«. V obdobju 2005-2019 je vodil programski odbor VITEL, poučuje na Višji šoli ŠCPET v Ljubljani predmeta TKO2 in EKS in na Višji šoli SCKR predmet RAO. Od 2013 je Senior Member IEEE, kjer je bil aktiven član IEEE SDN publicity committee.

Postopki standardizacije na področju tehnologij Wi-Fi, s poudarkom na Wi-Fi 8

Drago Majcen

SIST TC MOC

drago.majcen@gmail.com

Standardization processes in the field of Wi-Fi technologies, with a focus on Wi-Fi 8

Abstract. We continually seek the newest technology, yet as soon as we adopt it, our attention quickly shifts to what comes next. Many users are still only becoming familiar with Wi-Fi 6, and with an estimated 233 million Wi-Fi 7 devices entering the market this year, it is unsurprising that interest in Wi-Fi 8 is already growing. Wi-Fi 8 represents the next evolutionary step beyond Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be) and will remain backward compatible with all previous Wi-Fi standards. This new generation is expected to significantly enhance the overall transmission capacity of wireless networks. Combined with newly introduced features, Wi-Fi 8 will further improve the quality, reliability, and user experience of wireless connectivity. Although detailed specifications and official technical documentation for Wi-Fi 8 have not yet been released, numerous predictions and early research indicate a variety of advanced capabilities that the standard is likely to support.

Wi-Fi 8 (IEEE 802.11bn) is expected to reach Draft 1.0 soon, enabling the definition of its key features and allowing manufacturers to begin early implementations. Wi-Fi Alliance certification is planned for January 2028, providing a framework for interoperability testing and product development. Final approval by the IEEE 802.11 Working Group is scheduled for March 2028, marking the completion of the standard. Although the next generation of Wi-Fi will not arrive for some time, early prototypes are already emerging. TP-Link demonstrated Wi-Fi 8 (802.11bn) on October 13, 2025, well before the standard's final confirmation in 2028.

1. Uvod

V tem prispevku so opisani postopki standardizacije na področju tehnologij Wi-Fi, s predvidevanji, kaj bo prinesla uvedba Wi-Fi 8, ki jo pričakujemo v letu 2028.



Slika 1. Wi-Fi 8 – prihodnost brezžičnih povezav.

2. Razvoj tehnologij Wi-Fi

Kot družba si vedno želimo najsodobnejše tehnologije, a komaj jo dobimo v roke, se že začnemo ozirati na to, kaj sledi. Morda ste se komaj spoznali z Wi-Fi 6, toda glede na to, da naj bi letos na trg prišlo 233 milijonov naprav Wi-Fi 7, ali je potemtakem čudno, da se že veselimo Wi-Fi 8.

V preglednici 1 so primerjani posamezni parametri različnih generacij tehnologije Wi-Fi.

Preglednica 1. Parametri različnih generaciji Wi-Fi (vir: po standardih IEEE)

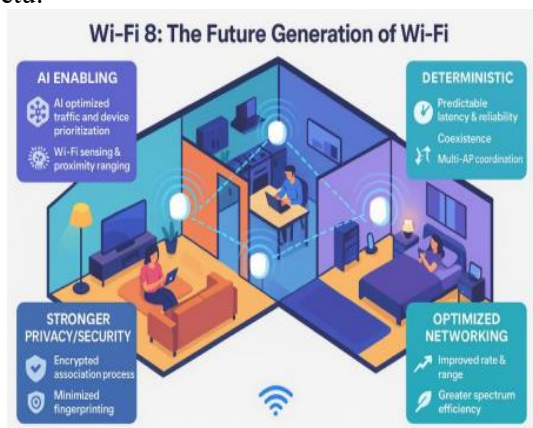
IEEE Standard	WiFi Gen	Year	Frequency	Max PHY Data Rate	Max Range
802.11	-	1997	2.4 GHz	2 Mbps	20m (indoor) 100m (outdoor)
802.11 a	-	1999	5 GHz	54 Mbps	35m (indoor) 120m (outdoor)
802.11 b	-	1999	2.4 GHz	11 Mbps	35m (indoor) 140m (outdoor)
802.11 g	-	2003	2.4 GHz	54 Mbps	35m (indoor) 140m (outdoor)
802.11 n	WIFI 4	2009	2.4/5 GHz	600 Mbps	70m (indoor) 250m (outdoor)
802.11 ac	WIFI 5	2013	5 GHz	6.9 Gbps	35m (indoor)
802.11 ad	-	2012	60 GHz	8.1 Mbps	3.3m (indoor)
802.11 ah	-	2017	Sub 1 GHz	347 Mbps	1km
802.11 ax	WIFI 6	2021	2.4/5/6 GHz	9.6 Gbps	30m (indoor) 120m (outdoor)
802.11 ay	-	2021	60 GHz	30.3 Gbps	10m (indoor) 100m (outdoor)
802.11 be	WIFI 7	2024	2.4/5/6 GHz	46.1 Gbps	30m (indoor) 120m (outdoor)

3. Wi-Fi 8

Wi-Fi 8 je naslednja generacija Wi-Fi 7 (standard IEEE 802.11be), ki je združljiva z vsemi prejšnjimi standardi Wi-Fi. Wi-Fi 8 bo znatno izboljšal splošno zmogljivost prenosa brezžičnega omrežja, skupaj z novimi funkcijami pa bo prispeval k nadaljnjemu izboljšanju kakovosti in izkušnje brezžičnih omrežij prek povezav Wi-Fi.

Osmo različica Wi-Fi bo uporabnikom omogočila hitrejši dostop do podatkov in hitrosti prenosa, zmanjšala zakasnitev (ping) in zagotovila boljše zmogljivost kot prejšnji standardi Wi-Fi. Čeprav trenutno ni podrobnih informacij ali glavnih specifikacij za različico Wi-Fi 8, obstaja veliko napovedi o novih funkcijah, ki jih bo podpiral.

V nadaljevanju so opisane glavne značilnosti Wi-Fi 8 (slika 2), ki je zajet v standardu 802.11bn. Delovanje omrežja Wi-Fi je strnjeno v petih ključnih dimenzijah, ki so ključne v sodobnem svetu.



Slika 2. Glavni tehnološki stebri standarda Wi-Fi 8.

3.1 Gostovanje

802.11bn uvaja transformativen pristop k mobilnosti, s konceptom enotnih domen mobilnosti, ki omogoča brezhibno gostovanje med več dostopnimi točkami. To napravam omogoča, da zagotavljajo izkušnjo »enkrat povezana, vedno povezana«, z vzdrževanjem neprekinjenih povezav z nizko zakasnitvijo med premikanjem, brez prekinitev ali izgub paketov, ki jih povzročajo tradicionalne predaje.

Wi-Fi 8, izposojen iz modelov celične mobilnosti, uvaja brezhibno gostovanje, ki drastično skrajša čas ponovne povezave med dostopnimi točkami. Namesto ponovnega pogajanja vsakič, ko se naprava premakne, dostopne točke vzdržujejo enotni seznam mobilnih naprav (UML - Ultra-High Reliability Mobility Layer), ki sledi prej povezanim napravam in omogoča skoraj takojšnje prehode.

3.2 Pokritost na robu

Drug pomemben inovacijski vektor v standardu 802.11bn je osredotočenost na izboljšanje zmogljivosti na robu. To je sposobnost omrežja Wi-Fi, da vzdržuje zanesljivo in visokokakovostno povezljivost za odjemalske naprave, ki delujejo v neidealnih pogojih signala. Še posebej pomembno je za odjemalske naprave, ki delujejo na zunanjih mejah pokritosti dostopne točke ali v okoljih z degradacijo signala, zaradi razdalje, motenj ali omejitev moči. Standard te izzive obravnava z vrsto izboljšav fizične plasti, ki skupaj krepijo zmogljivost na robu.

3.3 Pametnejša koordinacija dostopnih točk

V okoljih z visoko gostoto, kot so poslovni kampusi, stanovanjske stavbe in javni prostori, se lahko omrežja Wi-Fi soočajo z izzivi zaradi prekrivajočih se signalov in tekmovanja za čas prenosa. Ti pogoji lahko vodijo do konic zakasnitve, zmanjšane prepustnosti in splošne uporabniške izkušnje. Wi-Fi 8 se s tem spopada z eno svojih najpomembnejših inovacij: koordinacijo več dostopnih točk. Z omogočanjem sodelovanja dostopnih točk in ne samostojnega delovanja Wi-Fi 8 uvaja pametnejši in učinkovitejši način dostopa do medija in deljenja virov med dostopnimi točkami, kar zagotavlja dosledno uporabniško izkušnjo.

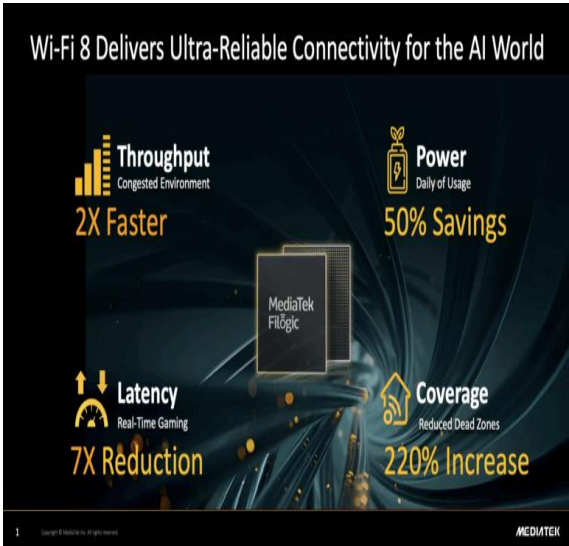
3.4 Sobivanje z drugimi tehnologijami

Sodobne naprave imajo vse pogostejše integriranih več radijskih sprejemnikov (Wi-Fi, Bluetooth, UWB), kar ustvarja nove izzive za sobivanje. To se opazi pri motnjah eni tehnologiji, ko se skupna antena uporablja za drugo tehnologijo. Wi-Fi 8 uvaja izboljšano sobivanje več tehnologij v napravah, da zagotovi bolj gladko delovanje, ko si več radijskih sprejemnikov deli antene ali spekter, in elegantno obravnava začasne izpade, ko se antena uporablja za drugo tehnologijo.

3.5 Pametnejša poraba energije

Ker Wi-Fi postaja vse bolj osrednjega pomena v vsakdanjem življenju, je energetska učinkovitost ključnega pomena za podaljšanje življenjske dobe baterij odjemalskih naprav in mobilnih dostopovnih točk ter zmanjšanje porabe energije fiksnih dostopnih točk in prehodov. Wi-Fi 8 uvaja

nove funkcije, zaradi katerih je brezžična povezljivost bolj energetske učinkovita, ne da bi se pri tem ogrozila odzivnost (slika 3).



Slika 3. Izboljšave v Wi-Fi 8: večja prepustnost, manjša zakasnitev, manjša poraba energije in boljša pokritost.

4. Prihodnost Wi-Fi

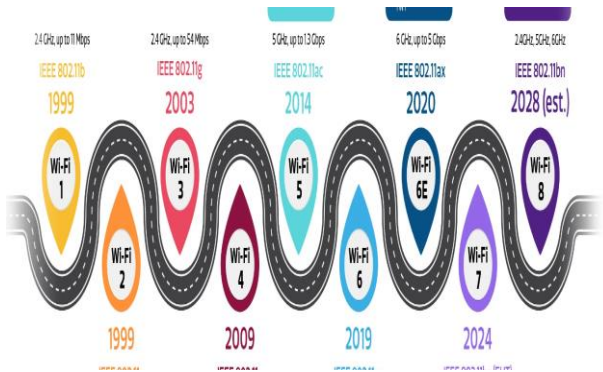
Wi-Fi nikoli ne miruje in delo na naslednjem standardu Wi-Fi že resno poteka. Prvi izdelki, ki podpirajo novi standard, sčasoma jih bo Wi-Fi Alliance poimenoval Wi-Fi 8, bodo predvidoma na tržišču proti koncu leta 2027 oziroma v začetku 2028. Medtem se delo na izboljšanju prihodnjega nabora funkcij Wi-Fi 8 osredotoča na omogočanje zanesljivega delovanja v vsakodnevnih okoljih.

Pričakuje se, da bo Wi-Fi 8 vsak čas dosegel status osnutka 1.0, kar bo opredelilo njegove ključne funkcije in omogočilo proizvajalcem opreme, da jih implementirajo.

Dejansko certificiranje Wi-Fi Alliance je načrtovano za januar 2028, kar bo omogočilo testiranje in razvoj interoperabilnosti izdelkov. Končna odobritev s strani delovne skupine IEEE 802.11 je predvidena za marec 2028, ko bo standard IEEE 802.11bn predvidoma dokončan (preglednica 2 in slika 4).

Preglednica 2. Časovnica uvajanja Wi-Fi do leta 2030

Generacija Wi-Fi-ja	Standard IEEE	Leto izdaje
Wi-Fi 6	802.11ax	2019
Brezžično omrežje 7	802.11be	2024–2025
Wi-Fi 8	~802.11caj	~2029–2030



Slika 4. Časovni pregled razvoja Wi Fi standardov od IEEE 802.11b (1999) do prihajajočega Wi Fi 8 (IEEE 802.11bn, 2028).

5. Zaključek

Wi-Fi 8 predstavlja naslednjo mejo brezžičnih inovacij – ambiciozen napor, da se zagotovi, da bodo prihodnja omrežja lahko zadostila naraščajočim zahtevam hiperpovezanega, z umetno inteligenco izboljšanega in poglobljenega digitalnega sveta. Čeprav natančne specifikacije še vedno nastajajo, je smer jasna: pametnejša, hitrejša, zanesljivejša in bolj prilagodljiva brezžična komunikacija.

Z naraščajočim zagonom industrije bo Wi-Fi 8 verjetno igral ključno vlogo pri oblikovanju naše interakcije s tehnologijo v tridesetih letih 21. stoletja in pozneje.

Na naslednjo generacijo Wi-Fi bomo še nekoliko počakali, obstaja pa že nekaj prvih prototipov. Npr. podjetje TP-Link je 13. 10. 2025 demonstriralo delovanje Wi-Fi 8 (802.11bn), čeprav bo končna verzija standarda potrjena šele leta 2028.

6. Literatura

[1] Delovni dokumenti IEEE, ITU, ETSI, 3GPP,
[2] IEEE 802.11bn, IEEE Communications Magazine,
[3] Pioneering the Future with Wi-Fi 8, Mediatech,
[4] Študija standarda IEEE 802.11 za uporabo v komunikaciji med vozilom in infrastrukturo | Publikacija konference IEEE | IEEE Xplore,
[5] WI-Fi NOW: Posodobitev standardov: Da, že delamo na Wi-Fi 8.
[6] IEEE Xplore: Future Directions for Wi-Fi 8 and Beyond,
[7] Mednarodni simpozij IEEE: Kako bo Wi-Fi 8 izgledal leta 2029?
[8] Mobile europe: Wi-Fi 8: kako blizu smo končnemu standardu?
[9] Lorenzo Galati: What Will Wi-Fi 8 Be? A Primer on IEEE 802.11bn Ultra High Reliability,
[10] Qualcomm:
<https://www.qualcomm.com/news/onq/2025/07/wi-fi-8-advancing-wireless-through-ultra-high-reliability>,

O avtorju

Drago Majcen je diplomiral na Fakulteti za Elektrotehniko v Ljubljani. Po končanem študiju se je zaposlil v podjetju PTT Ljubljana, ki je bilo kasneje preoblikovano v Telekom Slovenije (TS). Leta 1977 je ustanovil in postal prvi vodja Centra za gradnjo in vzdrževanje magistralnih RR sistemov. Leta 1990 je vodil gradnjo in montažo infrastrukture prvega analognega slovenskega mobilnega omrežja NMT.

Od junija leta 2004 je bil zaposlen v Mobitelu kot svetovalec direktorja Tehničnega področja, kasneje pa je deloval v skupini za standardizacijo in Tehnološki pisarni Področja za tehnologijo ter Službi za razvoj in raziskave Sektorja za radijska omrežja.. Upokojen je od 1. marca 2015.

Je dolgoletni sodelavec SIST. Trenutno predseduje delovnemu odboru TC MOC (mobilne komunikacije), ki se je preoblikoval iz prvotnega TC RES (radijske naprave in sistemi v telekomunikacijah).

Wi-Fi 7 in Mesh: meritve in izzivi domačih omrežij

Gorazd Penko

T-2 d.o.o.

gorazd.penko@t-2.com

Wi-Fi 7 and Mesh: Measurements and Challenges of Home Networks

Abstract. *The introduction of XGS-PON technology, enabling speeds of up to 10 Gbps, has increased the demand for high-performance networks in residential environments, which is supported by Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be). This paper presents the key technological features of Wi-Fi 7 and its advantages over previous generations. Empirical measurements were conducted at distances of up to 120 meters without obstacles, along with comparative performance analyses of Wi-Fi 7 versus Wi-Fi 6 under various technical conditions in a typical residential setting. The results provide insights into the real-world capabilities of the new technology and its suitability for future broadband services.*

1. Uvod

Z uvedbo najnovejše tehnologije XGS-PON v realna telekomunikacijska omrežja operaterjev, ki omogoča simetrične podatkovne hitrosti do 10 Gb/s, se povečuje potreba po višjih podatkovnih hitrostih znotraj stanovanjskih prostorov naročnikov. To omogoča najnovejša tehnologija Wi-Fi 7.

Wi-Fi 7, znan kot standard IEEE 802.11be, je naslednja generacija brezžičnih omrežij, zasnovana za izboljšanje hitrosti, zmogljivosti, zanesljivosti in zmanjšanje zakasnitev v primerjavi s prejšnjimi standardi Wi-Fi. Poleg uporabe že uveljavljenih frekvenčnih pasov 2,4 GHz in 5 GHz omogoča tudi uporabo novega frekvenčnega pasu na 6 GHz, kar zmanjšuje motnje in povečuje zmogljivost omrežja. Standard podpira širše kanale, do 320 MHz, kar je dvakrat več kot pri Wi-Fi 6 in omogoča bistveno hitrejši prenos podatkov.

Wi-Fi 7 uvaja 16×16 MIMO (Multiple Input Multiple Output), ki omogoča večje število podatkovnih tokov med napravami ter povečuje učinkovitost in kapaciteto omrežja. MU-MIMO (Multi-User MIMO) dodatno izboljšuje učinkovitost z omogočanjem sočasnega prenosa podatkov več uporabnikom. Wi-Fi 7 uporablja modulacijo 4096-QAM, nadgradnjo 1024-QAM iz Wi-Fi 6, kar povečuje gostoto podatkov in omogoča

hitrejši prenos, vendar zahteva višjo kakovost signala.

OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) izboljšuje učinkovitost prenosa podatkov z delitvijo frekvenčnih kanalov na manjše podkanale, kar omogoča sočasno povezavo več naprav. MLO (Multi-Link Operation) omogoča združevanje frekvenčnih pasov 2,4 GHz, 5 GHz in 6 GHz v enoten podatkovni tok. TWT (Target Wake Time) optimizira porabo energije in zmanjšuje zakasnitev z razporejanjem časovnih rež za prenos podatkov ter zmanjševanjem prekrivanja med napravami. Wi-Fi 7 lahko teoretično doseže hitrosti do ~46 Gbit/s, kar je bistveno več kot pri Wi-Fi 6 (~9,6 Gbit/s).

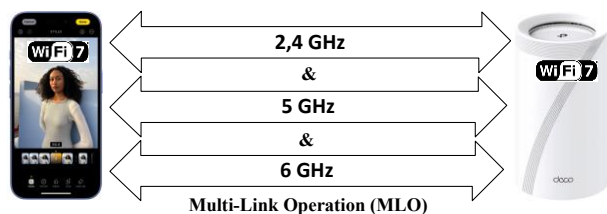
2. Osnovne značilnosti tehnologije Wi-Fi 7

2.1. Povečana hitrost in pasovna širina

Wi-Fi 7 prinaša znatno povečanje hitrosti in pasovne širine v primerjavi s prejšnjimi generacijami. Teoretična hitrost lahko doseže do ~46 Gb/s, kar omogoča hiter prenos velikih datotek in nemoten pretočni video razločljivosti 8K. Širši kanali do 320 MHz in napredna modulacija 4096-QAM povečujejo količino podatkov, ki se prenaša hkrati, kar omogoča večjo zmogljivost omrežja tudi pri več povezanih napravah. Povečana pasovna širina zagotavlja stabilnejše povezave in manjšo zakasnitev pri zahtevnih aplikacijah, kot so VR, gaming in profesionalni prenos podatkov.

2.2. Večpovezavno delovanje

Večpovezavno delovanje (MLO - Multi-Link Operation) omogoča napravam Wi-Fi 7 hkratno uporabo več frekvenčnih pasov za prenos podatkov: 2,4 GHz, 5 GHz in 6 GHz (slika 1). Podatki se lahko prenašajo po dveh ali več kanalih istočasno, kar povečuje skupno prepustnost omrežja. Če je en frekvenčni pas moten ali zaseden, MLO samodejno preusmeri promet po drugih pasovih, kar zmanjšuje motnje in izgube paketov. Funkcija omogoča boljšo izrabo razpoložljivih frekvenc ter stabilnejšo povezavo za več naprav in tako bistveno izboljša učinkovitost omrežja ter zmanjša zakasnitev.



Slika 1. MLO: hkratna raba več spektrov za hitrejši in zanesljivejši Wi-Fi 7 prenos.

2.3. Širši frekvenčni spekter (6 GHz)

Wi-Fi 7 omogoča uporabo širšega frekvenčnega spektra, ki poleg klasičnih pasov 2,4 GHz in 5 GHz vključuje tudi nov pas 6 GHz. Širši spekter omogoča višje hitrosti in stabilnejše povezave. Možne širine kanalov po različnih frekvenčnih pasovih so:

- 2,4 GHz: 20 MHz, 40 MHz
- 5 GHz: 20 MHz, 40 MHz, 80 MHz, 160 MHz
- 6 GHz: 20 MHz, 40 MHz, 80 MHz, 160 MHz, 320 MHz

Uporaba širših kanalov, posebej v pasu 6 GHz, omogoča hkratni prenos več podatkov, kar bistveno povečuje prepustnost omrežja in zmanjšuje zakasnitev. To je še posebej pomembno za zahtevne aplikacije.

2.4. Izboljšana učinkovitost z OFDMA in MU-MIMO

Wi-Fi 7 izboljšuje učinkovitost omrežja z uporabo tehnologij OFDMA in MU-MIMO, ki omogočata hkratno povezovanje več naprav. OFDMA razdeli kanal na manjše podkanale, tako da lahko več naprav istočasno prenaša podatke brez čakanja. MU-MIMO omogoča hkratni prenos podatkov do več uporabnikov, kar povečuje skupno prepustnost omrežja. Skupaj ti tehnologiji zmanjšujeta zakasnitev in povečujeta stabilnost povezave, tudi v gostih omrežjih, zaradi česar je Wi-Fi 7 primeren za zahtevne aplikacije.

2.5. Načrtovani čas bujenja (Target Wake Time, TWT)

Načrtovani čas bujenja (TWT-Target Wake Time) je funkcionalnost, ki omogoča optimizacijo porabe energije pri napravah, povezanih v omrežje. Napravam določi časovne intervale, ko se morajo zbuditi za pošiljanje ali prejemanje podatkov, medtem ko ostanejo v času, ko niso aktivne, v načinu nizke porabe energije. To zmanjšuje nepotrebno porabo energije, kar je še posebej pomembno za naprave IoT, pametne telefone in druge baterijsko občutljive naprave.

Delovanje TWT temelji na usklajevanju časovnih oken med dostopno točko (AP) in Wi-Fi odjemalcem. AP sporoči napravi, kdaj se bo prenašal promet, naprava pa se zbudi le v tem času, preostali čas pa ostane v stanju mirovanja. Tako se zmanjša količina nepotrebnih pregledov omrežja in izboljša skupna učinkovitost omrežja, še posebej v okoljih z veliko povezanimi napravami. Funkcija TWT hkrati zmanjšuje motnje in izboljšuje zanesljivost povezave, saj vsaka naprava komunicira z omrežjem le v predvidenih časovnih intervalih.

2.6. BSS (Basic Service Set) Color

BSS Color je funkcija, ki omogoča zmanjšanje motenj med sosednjimi omrežji, ki uporabljajo isti frekvenčni kanal. Vsak BSS dobi svojo "barvo" ali identifikator, ki ga naprave uporabljajo za razlikovanje med lastnim omrežjem in sosednjimi omrežji. Ko naprava prejme signal, preveri barvo BSS in se odloči, ali je signal del njenega omrežja ali tujek, s čimer lahko ignorira moteče pakete iz drugih BSS.

Tehnično delovanje temelji na tem, da vsaka dostopna točka v svojem okvirju (ang. beacon frame) vključi identifikator barve. Naprave v omrežju, ki sprejemajo podatke, primerjajo barvo v naslovu BSS z lastno barvo. Če se barvi ujemata, se paket obdela; sicer se ignorira ali odloži, dokler kanal ni prost. To omogoča sočasno delovanje več omrežij na istem kanalu brez prekinitev in motenj ter povečuje skupno učinkovitost in zmogljivost omrežja.

Funkcija BSS Color je posebej pomembna v gostih urbanih okoljih ali pisarnah, kjer je veliko Wi-Fi omrežij v istem spektru, saj zmanjša kolizije in izboljša zanesljivost povezav.

2.7. Združljivost s starejšimi standardi

Wi-Fi 7 je zasnovan tako, da je združljiv z vsemi predhodnimi standardi, vključno z Wi-Fi 6 (802.11ax), Wi-Fi 6E, Wi-Fi 5 (802.11ac) in Wi-Fi 4 (802.11n). To pomeni, da lahko nove dostopne točke (AP) Wi-Fi 7 komunicirajo z napravami, ki uporabljajo starejše standarde in to brez prekinitve povezave.

Tehnično združljivost zagotavljajo mehanizmi, kot so dual-mode prenosni protokoli, združljivi oglasni okviri in podpora za starejše modulacije, kot sta 1024-QAM za Wi-Fi 6 ali 256-QAM za Wi-Fi 5. Ko se Wi-Fi 7 AP poveže s starejšo napravo, samodejno prilagodi širino kanalov, modulacijo in nastavitve MIMO, da zagotovi pravilno delovanje. Hkrati Wi-Fi 7 omogoča, da sodobne funkcije, kot so MLO, širši 320 MHz-kanali in modulacija 4096-

QAM, uporabljajo le naprave, ki jih podpirajo, kar ohranja optimalno delovanje omrežja.

Združljivost s starejšimi standardi omogoča postopno nadgradnjo omrežij, saj nove dostopovne točke lahko delujejo z obstoječimi napravami, hkrati pa zagotavljajo prednosti nove generacije.

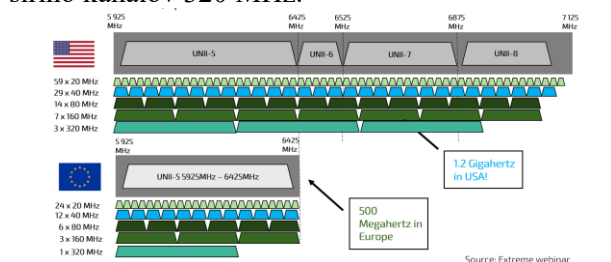
2.8. Primerjava oddajne moči in pasovne širine 6 GHz Wi-Fi 7 v EU in ZDA

Oddajna moč naprav je regulirana glede na geografski prostor in frekvenčne pasove, kar vpliva na doseg in zmogljivost omrežja.

V Združenih državah Amerike je maksimalna dovoljena oddajna moč za Wi-Fi 7 v pasovih 2,4 GHz in 5 GHz do 30 dBm (1 W) za odjemalce in dostopne točke, medtem ko v pasu 6 GHz lahko doseže tudi 36 dBm (4 W EIRP) pri profesionalnih in komercialnih napravah.

V Evropski uniji so omejitve strožje: maksimalna oddajna moč je običajno 20 dBm (100 mW) za 2,4 GHz, do 23 dBm (200 mW) za 5 GHz in do 30 dBm (1 W EIRP) za 6 GHz pas. Razlika v dovoljenih močeh pomeni, da lahko Wi-Fi 7 naprave v ZDA dosežejo daljši doseg in višjo hitrost v idealnih pogojih, medtem ko je v EU zaradi nižje moči poudarek na optimizaciji zmogljivosti in zmanjšanju interferenc.

Tehnično se razlike odražajo tudi v nastavitvah dostopnih točk (AP), kjer se prilagajajo kanalna širina, konfiguracije MLO in algoritmi regulacije moči, da omrežje deluje stabilno in skladno z lokalnimi predpisi. Razumevanje teh omejitev je ključnega pomena pri načrtovanju omrežij Wi-Fi 7, še posebej pri uporabi naprav s funkcijo MLO in širino kanalov 320 MHz.



Slika 2. Primerjava EU in ZDA Wi-Fi 7 6 GHz frekvenčnega spektra.

Frekvenčni pasovi v 6 GHz-področju so razdeljeni na podpasove UNNI (Unlicensed National Information Infrastructure) (Slika 2) [2, 3, 4, 9, 13, 14]:

- UNNI-5: 5,925 – 6,425 GHz
- UNNI-6: 6,425 – 6,525 GHz
- UNNI-7: 6,525 – 6,625 GHz
- UNNI-8: 6,625 – 7,125 GHz

V EU (ETSI) je dovoljena uporaba samo pasu UNNI-5, ki pa je razdeljen na frekvenčne podpasove:

- UNNI-5a (Low): 5,925 – 6,025 GHz; Nizka moč (Low Power Indoor), ni potrebna AFC (Automated Frequency Coordination); običajno za notranjo uporabo, manjši kanali (20/40/80 MHz).
- UNNI-5b (Mid): 6,025 – 6,125 GHz; Standard Power, zahteva AFC (Automated Frequency Coordination) za preprečevanje motenj; omogoča višje hitrosti.
- UNNI-5c (High): 6,125 – 6,425 GHz; Standard Power z AFC; največja razpoložljiva širina kanalov (80/160/320 MHz), namenjena največjim hitrostim in kapaciteti.

V ZDA je dovoljena uporaba vseh štirih pasov: UNNI-5, UNNI-6, UNNI-7 in UNNI-8. Pogoje uporabe z omejitvami določa FCC (Federal Communications Commission). V ZDA je za tehnologijo Wi-Fi razpoložljiv bistveno širši frekvenčni pas kot v EU.

2.9. Omrežja Wi-Fi Mesh

Omrežje Wi-Fi Mesh je brezžična omrežna arhitektura, sestavljena iz več medsebojno povezanih dostopnih točk oziroma vozlišč (angl. mesh nodes), ki skupaj tvorijo enotno brezžično omrežje z enim SSID (Service Set Identifier). Namen arhitekture Mesh je zagotoviti enakomerno pokritost, višjo razpoložljivost povezave in nemoteno prehajanje uporabniških naprav (roaming) v večjih ali prostorsko razgibanih okoljih, kjer ena sama dostopna točka ne zadošča.

Osnovna značilnost omrežij Mesh je, da vsako vozlišče deluje hkrati kot dostopna točka za odjemalce in kot posredniško vozlišče za prenos podatkov do drugih vozlišč Mesh. Povezava med vozlišči se imenuje backhaul povezava, ki je lahko žična (Ethernet) ali brezžična (Wi-Fi). V brezžičnih omrežjih Mesh se backhaul praviloma (ni pa nujno) izvaja v ločenem frekvenčnem pasu ali na namenskem kanalu, da se zmanjša vpliv na prepustnost za končne uporabnike.

Tehnično delovanje omrežja Mesh temelji na dinamičnem usmerjanju prometa med vozlišči. Vsako vozlišče sproti ocenjuje kakovost povezav do sosednjih vozlišč (moč signala, zakasnitev, izgube paketov) in na tej podlagi izbere optimalno pot za prenos podatkov proti glavnemu vozlišču (Mesh Controller ali root node ali gateway). Če pride do poslabšanja povezave ali izpada posameznega vozlišča, omrežje samodejno preusmeri promet po alternativni poti, kar povečuje zanesljivost in odpornost omrežja.

Pomemben vidik omrežij Mesh je tudi upravljanje mobilnosti uporabniških naprav.

Sistemi Mesh uporabljajo mehanizme, kot so:

- 802.11k (*Radio Resource Measurement*)

Omogoča, da dostopne točke (AP) in odjemalci zbirajo podatke o stanju brezžičnega omrežja. Meri moč signala, zakasnitev, izgubo paketov in zasedenost kanalov. Odjemalcem pomaga pri odločitvi, katero vozlišče je optimalno za povezavo. Vozlišča med seboj izmenjujejo informacije o kakovosti povezav, kar omogoča dinamično optimizacijo poti (routing).

- 802.11v (*Wireless Network Management*)

Optimizacija uporabe brezžičnega omrežja in pomoč pri prehodih med AP-ji. Omrežju omogoča, da napravam posreduje informacije o najbolj primernih vozliščih in kanalih. Omogoča upravljanje prehajanja med vozlišči (load balancing), s čimer se zmanjšajo motnje in poveča stabilnost omrežja.

- 802.11r (*Fast BSS Transition - Fast Roaming*)

Pospesitev prehoda odjemalca med dostopnimi točkami. Omogoča, da se odjemalec premakne z ene AP na drugo brez prekinitve povezave, kar je ključno za aplikacije v realnem času (VoIP, video klici, igre). Zmanjša čas ponovne avtorizacije in vzpostavitev šifrirane povezave. Zagotavlja nemoteno izkušnjo prehajanja, ko se uporabniki gibljejo po prostoru ali med nadstropji.

Z vidika omrežne arhitekture omrežja Mesh praviloma uporabljajo centralizirano upravljanje, kjer ena enota ali programski krmilnik (Mesh Controller) skrbi za konfiguracijo, posodabljanje in optimizacijo delovanja vseh vozlišč. To vključuje samodejno izbiro kanalov, prilagajanje oddajne moči ter uravnoteženje obremenitve med posameznimi dostopnimi točkami. Tak pristop omogoča enostavnejšo namestitvev, skalabilnost in učinkovito delovanje.

Wi-Fi 7 Mesh podpira Multi-Link Operation (MLO) in pas 6 GHz, kar omogoča hkratno uporabo več pasov in večjo prepustnost, medtem ko Wi-Fi 6 uporablja le pasova 2,4 GHz in 5 GHz. Širši kanali do 320 MHz in modulacija 4096-QAM pri Wi-Fi 7 povečujeta gostoto podatkov in zmogljivost omrežja, medtem ko Wi-Fi 6 uporablja za širino kanala le do 160 MHz in 1024-QAM. Wi-Fi 7 Mesh zagotavlja manjšo zakasnitev, večjo stabilnost in odpornost na motnje, kar omogoča podporo za VR, 8K-video in zahtevne aplikacije v realnem času.

3. Empirične performančne meritve Wi-Fi 7 na vidni razdalji brez ovir

3.1. Pomen predkomercialnih meritev in testiranj z vidika telekomunikacijskega operaterja

Pred komercialno uvedbo tehnologije Wi-Fi 7 je za telekomunikacijskega operaterja nujno izvajanje celovitih testiranj in performančnih meritev v nadzorovanem in realnem okolju.

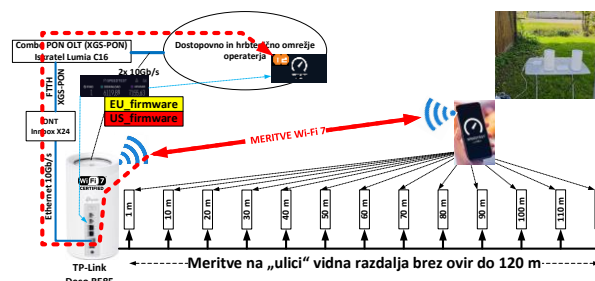
Z empiričnimi meritvami se preveri, ali dostopovno in hrbtenično omrežje operaterja zagotavlja zadostno pasovno širino, nizko zakasnitev in stabilnost, ki so nujni za izkoriščanje zmogljivosti Wi-Fi 7 na uporabniški strani. Poleg tega meritve omogočajo oceno vpliva razdalje, frekvenčnega pasu in uporabljenih terminalskih naprav na dejansko dosegljive hitrosti, kar je ključno za realno dimenzioniranje storitev in pričakovanj uporabnikov.

Primerjalne meritve različnih odjemalskih naprav ter delovanja po posameznih frekvenčnih pasovih in v načinu MLO omogočajo tudi identifikacijo razlik v implementaciji standarda in interoperabilnosti med napravami. Dodatno je preverjanje skladnosti delovanja po EU regulativnih omejitvah bistvenega pomena za zagotovitev zakonite in stabilne komercialne uporabe.

Takšen pristop operaterju omogoča, da pred uvedbo storitve identificira morebitne tehnične omejitve, optimizira omrežno konfiguracijo ter zagotovi kakovost storitve in kakovostno uporabniško izkušnjo, skladno s pričakovanji tehnologije Wi-Fi 7.

3.2. Opis empiričnih merilnih postopkov in merilne sheme

Na prikazani merilni shemi (slika 3) je predstavljena struktura empiričnih meritev hitrosti Wi-Fi 7 na vidni razdalji med 0 in 120 m, izvedenih v korakih po 10 m.



Slika 3. Merilna shema empiričnih meritev na vidnih razdaljah do 120 metrov brez ovir.

Meritve so temeljile na zaporedni povezavi telekomunikacijskih elementov: odjemalci Wi-Fi 7 z nameščeno aplikacijo Ookla Speedtest [10, 11], Wi-Fi 7 usmerjevalnik TP-Link Deco BE85 [2] z 10 Gb/s Ethernet povezavo, ONT Innbox X24 [6] z 10 Gb/s ethernet vmesnikom (dostopovna tehnologija XGS-PON), ter Combo PON OLT Lumia C16 [5], ki je povezan na hrbtenično omrežje s kapaciteto 2×10 Gb/s.

V omrežju operaterja je uporabljen strežnik Ookla Speedtest [12], ki omogoča merjenje hitrosti prenosa podatkov v obeh smereh (download v smeri proti uporabniku in upload v smeri od uporabnika). Pred izvedbo meritev na odjemalskih napravah je bila izvedena kontrolna testna meritev neposredno na ethernet vmesniku 10 Gb/s na usmerjevalniku Deco BE85 [2]. Kontrolna meritev je pokazala hitrost 6119 Mb/s (download) in 7155 Mb/s (upload). Pričakovane podatkovne hitrosti na Wi-Fi 7 delu merilne sheme so do maksimalno 5000 Mb/s. Z navedenim je preverjena stalna razpoložljivost več kot 5 Gb/s (v obe smeri) v dostopnem in hrbteničnem omrežju operaterja do strežnika Ookla Speedtest [12]. Takšna konfiguracija omogoča kvantitativno oceno zmogljivosti povezave Wi-Fi 7 na različnih razdaljah in predstavlja podlago za nadaljnje analize vpliva oddaljenosti na hitrost prenosa podatkov.

Meritve hitrosti prenosa podatkov so bile izvedene s petimi različnimi mobilnimi telefoni s podporo Wi-Fi 7 in programsko opremo po EU Wi-Fi 7 standardu in sicer: iPhone 16 Pro Max, Google Pixel 9 Pro XL, Samsung S24 Ultra, Xiaomi 14 Ultra in Xiaomi 13T Pro.

Performančne meritve so bile izvedene ločeno glede na posamezne frekvenčne pasove delovanja Wi-Fi 7 2,4 GHz, 5 GHz in 6 GHz, ter nenazadnje tudi v Wi-Fi 7 MLO (Slika 1) načinu delovanja. Izvedena je tudi izključno laboratorijska eksperimentalna primerjava delovanja Wi-Fi 7 po evropskem in ameriškem standardu (samo TP-Link Deco BE85 [2] je imel razpoložljiv firmware po ZDA standardu, mobilni telefoni razpoložljivi samo EU standard).

3.3. Rezultati izvedenih empiričnih meritev Wi-Fi7

Empirične meritve Ookla Speedtest s petimi različnimi odjemalci so bile izvedene s šestimi različnimi nastavitvami frekvenčnih pasov 2,4 GHz, 5 GHz in 6 GHz z različnimi frekvenčnimi širinami kanalov Wi-Fi 7 usmerjevalnika TP-Link Deco BE85 [2] (Tabela 1).

	Wi-Fi 7 Frekvenčno področje 2,4 GHz	Channel Bandwidth (MHz)	Wi-Fi 7 Frekvenčno področje 5 GHz	Channel Bandwidth (MHz)	Wi-Fi 7 Frekvenčno področje 6 GHz	Channel Bandwidth (MHz)
Meritev_1	On	40	Off	x	Off	x
Meritev_2	Off	x	On	80	Off	x
Meritev_3	Off	x	On	160	Off	x
Meritev_4	On	40	On	160	Off	x
Meritev_5	Off	x	Off	x	On	Auto
Meritev_6	On	Auto	On	Auto	On	Auto

Tabela 1: Spisek kombinacij tehničnih nastavitev Wi-Fi 7 na usmerjevalniku TP-Link BE85 [2] za posamezno meritev (frekvenčno področje, širina Wi-Fi 7 kanala)

Večje število meritev z različnimi tehničnimi nastavitvami Wi-Fi 7 rezultira v 36 diagramov. V članku je predstavljena samo najpomembnejša meritev št. 6, z

vidika Wi-Fi 7 z vključenimi vsemi tremi frekvenčnimi pasovi: 2,4 GHz, 5 GHz in 6 GHz v načinu delovanja MLO (Tabela 1).

Meritve Ookla download Speedtest s petimi različnimi odjemalci (Diagram 1, Diagram 3) potrjujejo, da so med njimi performančne razlike. Identično je tudi v uploadu (Diagram 2, Diagram 4). Zaradi performančnih razlik različnih odjemalcev Wi-Fi 7 podajam download in upload Ookla Speedtest povprečja petih odjemalcev (Diagram 5, Diagram 6). Na vseh diagramih sta po dve meritvi Ookla Speedtest, prva po EU-standardu in druga po ZDA-standardu.

Zaradi večje oddajne moči in širšega frekvenčnega spektra v področju 6 GHz ZDA-standarda je povprečna hitrost *Ookla Speedtest download* v povprečju za približno 56 % višja od *download* hitrosti EU-standarda (diagram 5). Odjemalci Wi-Fi 7 s katerimi so bile izvedene empirične meritve omogočajo delovanje samo z oddajnimi močmi skladno z EU-standardom, zato so hitrosti Ookla upload Speedtest v povprečju praktično enake (Diagram 6).

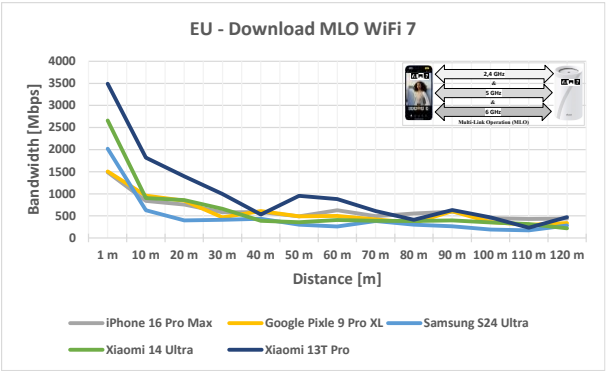


Diagram 1: EU standard: Download meritve Wi-Fi 7 hitrosti z različnimi WiFi 7 odjemalci v MLO načinu.

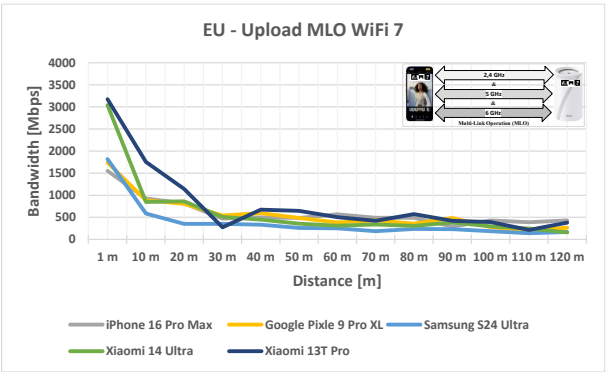


Diagram 2: EU standard: Upload meritve Wi-Fi 7 hitrosti z različnimi WiFi 7 odjemalci v MLO načinu

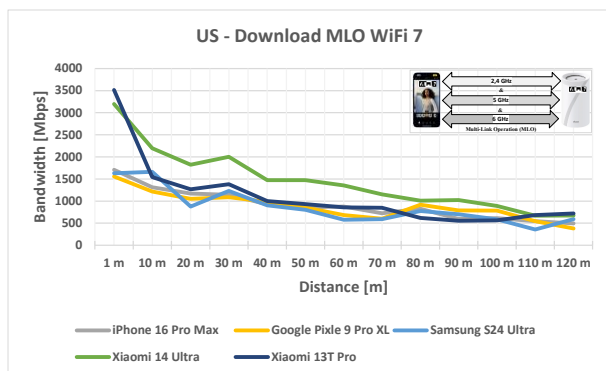


Diagram 3: ZDA standard: Download meritve Wi-Fi 7 hitrosti z različnimi Wi-Fi 7 odjemalci v MLO načinu

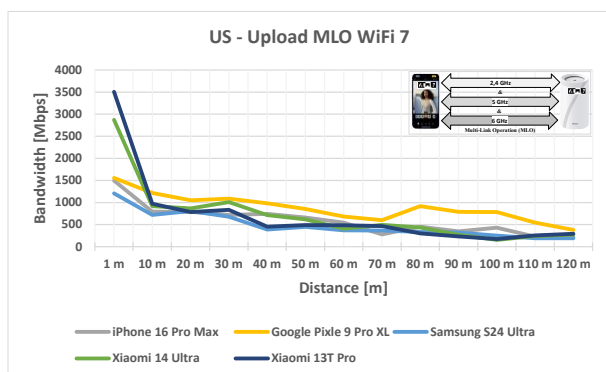


Diagram 4: ZDA standard: Upload meritve Wi-Fi 7 hitrosti z različnimi Wi-Fi 7 odjemalci v MLO načinu

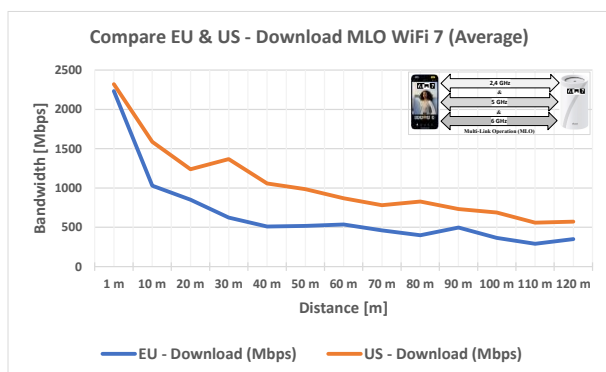


Diagram 5: EU in ZDA standard: Download meritve Wi-Fi 7 hitrosti Wi-Fi 7 MLO (povprečje 5 različnih Wi-Fi 7 odjemalcev)

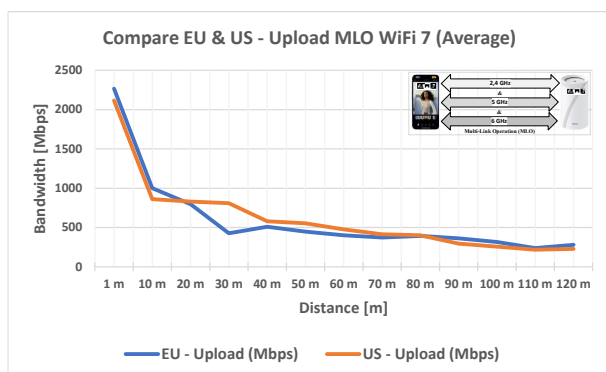


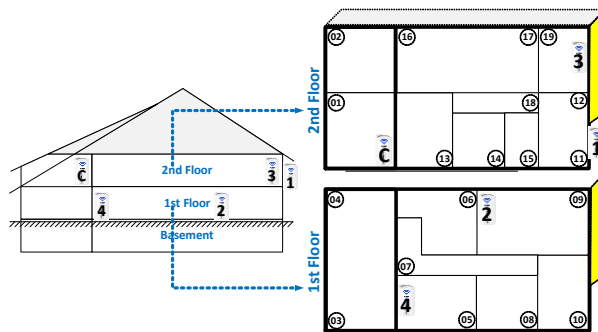
Diagram 6: EU in ZDA standard: Upload meritve Wi-Fi 7 hitrosti Wi-Fi 7 MLO (povprečje 5 različnih odjemalcev Wi-Fi 7)

Iz rezultatov opravljenih empiričnih meritev je moč zaznati tudi vpliv odbojev (multipath), ki pa zaradi pogojev okolice ni bil podrobneje obdelan (meritve opravljene na ulici). Odboji lahko povzročijo konstruktivno ali destruktivno interferenco, kar vpliva na SNR in stopnjo modulacije, pri čemer destruktivni odboji znižajo prepustnost in povzročajo presih. Medtem pa imajo konstruktivni odboji ravno nasproten učinek, kar pomeni višji SNR, višjo stopnjo modulacije ter s tem večjo prepustnost oz. v tem primeru višjo hitrost Ookla Speedtest.

4. Empirične performančne meritve Wi-Fi 7 in Wi-Fi 7 Mesh v rezidenčnem objektu

Pred komercialnim zagonom nove tehnologije Wi-Fi 7 in omrežij Wi-Fi 7 Mesh je pomembno, da operater preveri njihovo delovanje v realnem okolju. Meritve v rezidenčnem objektu omogočajo oceno hitrosti, stabilnosti in pokritosti signala v prostorih, kar laboratorijski testi ne pokažejo vedno. Takšna preverjanja pomagajo optimizirati postavitev dostopnih točk in nastavitve omrežja, s čimer se zagotovi zanesljiva in kakovostna uporabniška izkušnja že ob začetku komercialnega obratovanja.

Empirične performančne meritve Wi-Fi 7 (z enim AP) in Wi-Fi 7 Mesh (s 5 AP) so bile izvedene v tipičnem slovenskem kompleksnejšem rezidenčnem objektu (Slika 4). Meritve Ookla Speedtest so bile izvedene v dveh nadstropjih objekta s petimi dostopnimi točkami Wi-Fi 7 Mesh (Mesh kontroler in 4x Mesh Agent). Na vsaki merilni točki (ena merilna točka v vsakem prostoru) je bilo izvedenih pet meritev Ookla Speedtest s petimi različnimi odjemalci Wi-Fi 7. Rezultati meritev v posamezni merilni točki so povprečje Ookla Speedtest-ov v downloadu in uploadu.



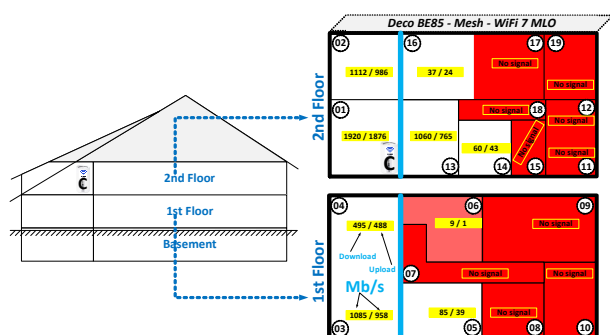
Slika 4: Rezidenčni objekt v katerem so bile izvedene empirične meritve Wi-Fi 7 in Wi-Fi 7 Mesh z označenimi merilnimi točkami in pozicijo elementov Wi-Fi 7 Mesh.

Uporabljena je bila oprema Wi-Fi 7 Mesh TP-Link Deco BE85 [2] (EU firmware) in oprema Wi-

Fi 6 Mesh Kontron Innbox U92 [8] (Mesh controller) in Innbox M92 [7] (4x Mesh Agenti).

4.1. Meritve Wi-Fi 7 z eno oddajno točko Wi-Fi

Za začetek so bile izvedene meritve Wi-Fi 7 v rezidenčnem objektu z eno samo oddajno točko (Slika 5) TP-Link Deco BE85 [2], da se preveri pokritost in zmogljivost signala. Rezultati (Slika 5) so pokazali, da ena dostopna točka Wi-Fi 7 v konkretnem primeru ni zadostna. Prostori označeni z rdečo barvo so izven dosega signala Wi-Fi 7. Potrebna je boljša tehnična rešitev, tj. omrežje Wi-Fi Mesh z več dostopnimi točkami, ki zagotavlja pokritost celotnega objekta s stabilnim in zanesljivim signalom Wi-Fi 7.



Slika 5. Rezidenčni objekt z eno dostopno točko Wi-Fi 7 in podanimi rezultati meritve Ookla speed test v posamezni sobi.

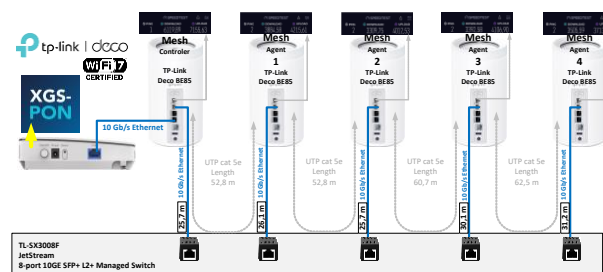
4.2. Meritve Wi-Fi 7 Mesh in primerjava z Wi-Fi 6 Mesh

Priključitev rezidenčnega omrežja Wi-Fi 7 Mesh na hrbtenično omrežje operaterja je izvedeno na enak način kot je opisano v podpoglavju 3.2 (Slika 3), le da so v rezidenčnem objektu nameščeni štirje dodatni agenti Wi-Fi 7 Mesh TP-Link Deco BE85 [2] (Slika 7). Vsi dodatni agenti Mesh znotraj rezidenčnega objekta so s kablom tipa ethernet UTP Cat5e prek L2 10 Gb/s stikala TL-SX3008F [1] povezani s kontrolno napravo (ethernet backhole). Fizične pozicije dostopovnih točk Wi-Fi 7 Mesh so bile izbrane tako, da je večji del objekta in njegova zunanost pokrita s signalom boljšim od -70 dBm. -70 dBm je najnižja vrednost sprejetega signala Wi-Fi, ki zagotavlja še kolikor toliko stabilno in zanesljivo delovanje (priporočljivo -64 dBm). Tako imamo vzpostavljeno konfiguracijo omrežja Wi-Fi 7 Mesh.

Posebno tehnično pozornost zahteva strukturirana instalacija ethernet v objektu pri uporabi električnih ethernet vmesnikov hitrosti nad 1 Gb/s. Še vedno je najpogostejše zastopan ethernet kabel tipa UTP Cat 5e. UTP Cat5e ima pri uporabi

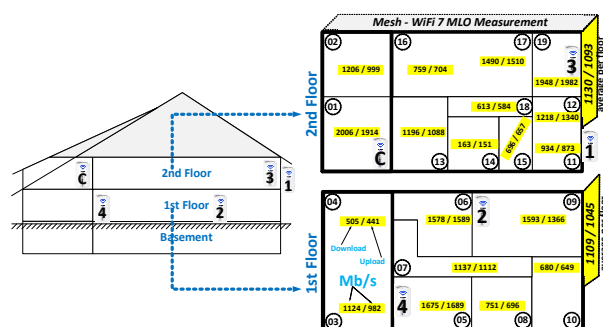
naprimer 10 Gb/s zelo omejen doseg. Instalacija ni predmet članka.

Ker rezultati meritev opisanih v podpoglavju 3.3 ne presegajo cca 3,5 Gb/s se pri preverjanju razpoložljivih hitrosti Ookla Speedtest na posameznih Wi-Fi 7 Mesh elementih zadovoljimo z razpoložljivo Ookla speed test hitrostjo 3,5 Gb/s. Preveritev je izvedena na vseh petih elementih TP-Link BE85 [2] na 10 Gb/s električnem vmesniku. Rezultati Ookla speed test preveritve so podani (Slika 6).



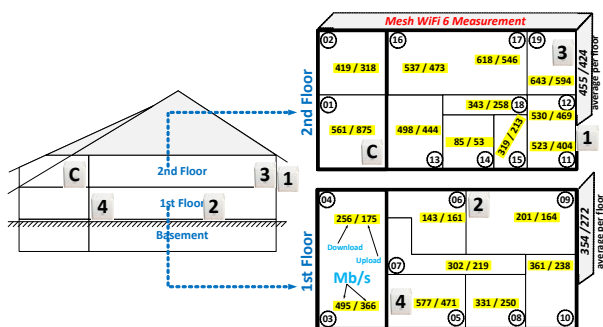
Slika 6. Vezalna shema Wi-Fi 7 Mesh omrežnih dostopovnih elementov v rezidenčnem objektu (Slika 4).

Rezultati Ookla Speedtest-ov na osnovi tehnologije Wi-Fi 7 so izvedeni po posameznih merilnih točkah (Slika 4) ter podanim povprečjem glede na nadstropje objekta (Slika 7).



Slika 7. Rezultati empiričnih meritev Wi-Fi 7 Mesh v rezidenčnem objektu s podanimi rezultati po posameznih prostorih in prikazanim povprečju glede na nadstropje.

Za potrebe primerjave in ocene uporabne vrednosti z vidika operaterja so na enak način izvedene tudi empirične meritve na osnovi tehnologije Wi-Fi 6 Mesh, le z opremo drugega proizvajalca Kontron. Za element Mesh Controller je bil uporabljen Innbox U92 [8], ter za Mesh Agenti Innbox M92 [7]. Pri opremi Kontron so bili uporabljeni ethernet električni vmesniki hitrosti 1 Gb/s in temu ustrezno prilagojena merilna shema. Maksimalno dosežena hitrost Ookla Speedtest na vseh petih dostopovnih elementih Wi-Fi 6 Mesh je bila med 910 do 930 Mb/s. Uporabljena oprema Wi-Fi 6 ne razpolaga s širino Wi-Fi kanala 160 MHz, zato je bila primerjalna meritev izvedena z 80 MHz širino kanala. Rezultati meritev so podani (Slika 8).



Slika 8. Rezultati empiričnih meritev Wi-Fi 6 Mesh v rezidenčnem objektu s podanimi rezultati po posameznih prostorih in prikazanem povprečju glede na nadstropje.

Na osnovi opravljenih empiričnih meritev Ookla Speedtest z Mesh tehnologijo Wi-Fi 7 (Slika 7) in tehnologijo Mesh tehnologijo Wi-Fi 6 (Slika 8) v rezidenčnem objektu z identičnimi pogoji okolice dobimo naslednje povprečne rezultate merjenja hitrosti Ookla Speedtest v Mb/s:

- 1. nadstropje (download / upload):
 - Wi-Fi 7 Mesh = 1190 / 1045 Mb/s
 - Wi-Fi 6 Mesh = 354 / 272 Mb/s
- 2. nadstropje (download / upload):
 - Wi-Fi 7 Mesh = 1130 / 1039 Mb/s
 - Wi-Fi 6 Mesh = 455 / 424 Mb/s
- Povprečje v rezidenčnem objektu (download / upload):
 - Wi-Fi 7 Mesh = 1119 / 1069 Mb/s
 - Wi-Fi 6 Mesh = 404 / 348 Mb/s

Iz povprečenja in sumarizacije meritev v celotnem objektu lahko ocenimo, da so hitrosti tehnologije Ookla Speedtest Mesh Wi-Fi 7 okvirno za faktor med 2,77 (download) in 3,07 (upload) višje kot pri tehnologiji Mesh Wi-Fi 6. (Brez upoštevanja novjših rešitev Wi-Fi 6, ki omogočajo širino kanala 160 MHz v frekvenčnem področju 5 GHz).

4.3. Zaključek Mesh Wi-Fi 7 in mesh Wi-Fi 6

Empirične meritve v rezidenčnem objektu jasno pokažejo, da Wi-Fi 7 Mesh v enakih okoljskih pogojih bistveno presega zmogljivosti Wi-Fi 6 Mesh. Povprečne izmerjene hitrosti so pri Wi-Fi 7 približno trikrat višje tako v smeri prenosa k uporabniku kot od uporabnika, kar potrjuje prednosti nove tehnologije v realnem okolju. Z vidika operaterja to pomeni večjo uporabno vrednost, boljšo izkušnjo končnih uporabnikov ter večjo pripravljenost omrežja na prihodnje storitve z visokimi zahtevami po pasovni širini. Definitivno ena dostopovna točka Wi-Fi v zahtevnejšem rezidenčnem objektu ni dovolj za pokrivanje celotnega objekta in kvalitetno delovanje storitev. Prihaja pa že Wi-Fi 8.

5. Reference, literatura, pripomočki

- [1] TP-Link Systems Inc, Jet Stream TL-SX3008F 10-Gigabit L2+ Managed Switch, SDN 10-Gigabit L2+ Managed Switch.pdf.

- [2] TP-Link Systems Inc, TP-Link Deco BE85 BE19000 Tri-band Mesh Wi-Fi 7, Deco BE85 (EU)1.0_Datasheet.pdf.
- [3] TP-Link Systems Inc, <https://www.tp-link.com/uk/wifi7/>
- [4] TP-Link Systems Inc, <https://www.tp-link.com/us/wifi7/>
- [5] Kontron d.o.o., Iskratel Lumia C16 Compact, energy-saving Combo OLT for XGS-PON, GPON and 10GE P2P. Iskratel-Lumia-C16-Datasheet-EN.pdf.
- [6] Kontron d.o.o., Iskratel Innbox X24 XGS-PON FTTH ONT. Iskratel-Innbox-X24-Datasheet-EN.pdf.
- [7] Kontron d.o.o., Iskratel Innbox M92 Supreme EasyMesh™-compliant Agent Access Point and Controller. Iskratel-Innbox-M92-Datasheet-EN.pdf.
- [8] Kontron d.o.o., Iskratel Innbox U92 Universal FTTH/ETTH/DSL Home Gateway and Mesh Wi-Fi Manager. Iskratel-Innbox-U92-Datasheet-EN.pdf
- [9] Kontron d.o.o., Products Presentation T-2 Workshop October 2024, Prosojnice 23-26, Predstavitev produktov T-2 v2.pptx,
- [10] Ookla iPhone App, <https://apps.apple.com/us/app/>
- [11] Ookla Android App, <https://play.google.com/store/apps>
- [12] Ookla server, <https://www.speedtest.net/>
- [13] [https://documentation.meraki.com/Wireless/Design_and_Configure/Architecture_and_Best_Practices/WiFi_7_\(802.11be\)_Technical_Guide](https://documentation.meraki.com/Wireless/Design_and_Configure/Architecture_and_Best_Practices/WiFi_7_(802.11be)_Technical_Guide)
- [14] OpenAI, ChatGPT (GPT-4) – pripomoček za oblikovanje besedila, slovnične korekcije ter preverjanje terminološke in tehnične konsistentnosti strokovnega besedila, 2025.

O avtorju



Gorazd Penko je diplomirani inženir elektrotehnike Univerze v Ljubljani in vodja oddelka Referenčnega laboratorija pri telekomunikacijskem operaterju T-2 d.o.o., kjer je odgovoren za tehnološki razvoj fiksnih dostopovnih omrežij (xDSL, FTTH, xPON) ter naročniških

CPE naprav.

Poklicno pot je začel na Telekomu Slovenije, kjer je sodeloval pri razvoju in komercialni uvedbi tehnologij ADSL in ADSL2+, ter zatem v podjetju T-2 d.o.o. VDSL in VDSL2. Je projektni vodja številnih ključnih projektov, med drugim uvajanja tehnologij GPON in XGS-PON ter vzpostavitve T-2 Laboratorija v ŠC PET Ljubljana. Aktivno sodeluje na domačih in mednarodnih konferencah s strokovnimi prispevki, zlasti s področja optičnih dostopovnih omrežij ter najnovejših Wi-Fi 7 in tehnologij Wi-Fi 7 Mesh.

Trajnost sistema RTV Slovenija – tranzicija tehnologij v radiodifuziji

Andrej Trojer

RTV Slovenija – Oddajniki in zveze

andrej.trojer@rtvslo.si

Sustainability of the RTV Slovenia System – Broadcasting Technology Transition

This paper analyses the sustainability of the RTV Slovenia broadcasting system through the transition from analogue FM radio to digital DAB+. Quantitative comparisons of spectrum usage, energy consumption and transmitter efficiency are presented. Particular emphasis is placed on modern high-efficiency transmitter architectures, including Doherty power amplifiers, and on the current and planned development of DAB+ networks in Slovenia. The results confirm that digital radio enables a substantially lower energy footprint and significantly higher programme density within limited spectrum resources.

1. Uvod

RTV Slovenija kot javni zavod in upravljavec kritične radiodifuzne infrastrukture deluje v okolju naraščajočih zahtev po energetski učinkovitosti in racionalni rabi frekvenčnega spektra. Prehod z analognega FM oddajanja na digitalni radio DAB+ pomeni bistven tehnološki odgovor na te izzive ter osrednji element dolgoročne strategije razvoja javnega medijskega sistema.

2. Spektralna učinkovitost: FM v primerjavi z DAB+

Frekvenčni spekter je omejen naravni vir, s katerim je treba upravljati učinkovito in odgovorno. DAB+ omogoča bistveno boljši izkoristek spektra v primerjavi z analognim FM, saj v istem frekvenčnem pasu omogoča oddajanje večjega števila programov. To zmanjšuje pritisk na regulatorja, omogoča razvoj lokalnih in tematskih programov ter spodbuja medijsko pluralnost. Z vidika trajnosti pomeni učinkovita raba spektra tudi manjšo potrebo po novih infrastrukturnih posegih

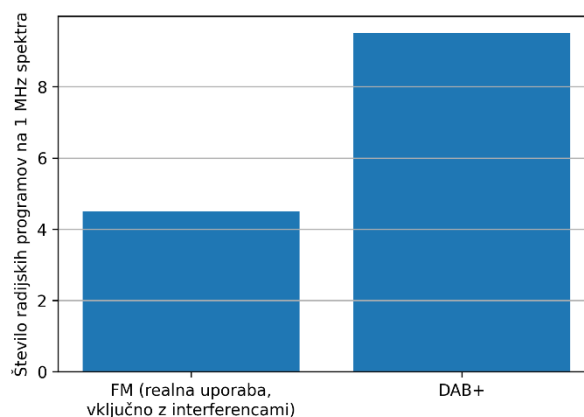
in s tem manjši vpliv na okolje. Digitalni radio tako prispeva k uravnoteženemu razvoju medijske krajine in racionalni rabi skupnih dobrin.

Frekvenčni pas FM (88–108 MHz) obsega 20 MHz spektra. Pri tipičnem kanalskem razmiku 200 kHz to teoretično pomeni do 100 kanalov, vendar je v praksi zaradi interferenc in zaščitnih razdalj na omejenem geografskem območju uporabnih bistveno manj. Za DAB+ je namenjen bistveno širši frekvenčni pas (174–230 MHz), ki se uporablja v frekvenčnih blokkih širine 1,536 MHz, znotraj katerih je mogoče oddajati 10–18 radijskih programov hkrati.

Preglednica 1. Primerjava spektralne učinkovitosti FM in DAB+

Parameter	FM radio	DAB+ radio
Spektralna širina	200 kHz / program	1,536 MHz / multipleks
Št. Programov / MHz	4 - 5	9 - 10
Omrežna arhitektura	Posamezni oddajniki	SFN, multipleks

Slika 1 prikazuje primerjavo frekvenčne spektralne učinkovitosti med FM in DAB+ tehnologijo za 1 MHz uporabljenega spektra.



Slika 1. Primerjava spektralne učinkovitosti na 1 MHz spektra

Pri FM je upoštevana realna raba spektra, omejena z interferencami, zaščitnimi razmiki, ki so potrebni zaradi "adjacent in co-channel" interferenc, ter topologijo omrežja zaradi ponovne rabe frekvenc, kar omogoča približno 4 – 5 programov na MHz. DAB+ zaradi multipleksnega oddajanja in enofrekvenčnih omrežij omogoča približno 9 – 10 programov na MHz, kar pomeni približno dvakrat boljši izkoristek spektra.

3. Energetska učinkovitost

Načini za prenos digitalnih radijskih signalov, katerega predstavnik je tudi DAB+ radio, uporabljajo OFDM modulacijo, pri kateri je signal sestavljen iz velikega števila podnosilcev (npr. 1536). Podnosilci se v času seštevajo in če se več podnosilcev fazno poravnava, nastane konstruktivna interferenca, ki povzroči zelo visok trenutni vrh amplitude. To pomeni, da povprečna moč ostaja relativno nizka, trenutna moč pa lahko močno naraste. Za ta namen meritev ojačevalnih stopenj se uporablja faktor PAPR (Peak-to-Average Power Ratio), ki se največkrat podaja v logaritmskem zapisu (1). OFDM v primerjavi z analognimi modulacijami zahteva zelo visok faktor (PAPR) – razmerje vršne in povprečne oddajne moči.

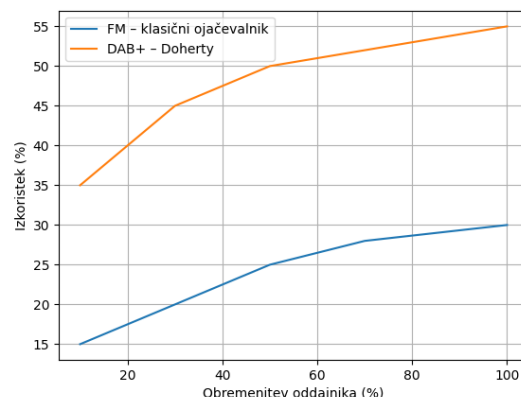
$$PAPR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{vrh}}{P_{povprečje}} \right) \quad (1)$$

Klasični linearni ojačevalniki niso primerni za uporabo pri digitalnih vrstah modulacij, ker pri delnih obremenitvah delujejo z nizkim povprečnim izkoristkom, praviloma pod 20 %. Zato se pri DAB+ oddajnikih uporabljajo ojačevalne stopnje s hibridno arhitekturo, v kombinaciji osnovnega in pomožnega ojačevalnika (Doherty metoda), kar omogoča bistveno višjo učinkovitost pri delnih obremenitvah. Pri Doherty arhitekturi, ki je bila razvita prav kot odgovor na visok PAPR, Carrier ojačevalnik deluje ves čas, medtem ko se Peaking ojačevalnik vključi le pri špicah signala. Efektivna obremenitev ojačevalnika se dinamično prilagaja. Da ne pride do nelinearnega popačenja, mora DAB+ ojačevalnik zagotavljati delovanje tako z maksimalno, kot tudi neprekinjeno s konstantno močjo.

Izkoristek ojačevalnika - η (2) je definiran kot razmerje izhodne RF moči in vhodne DC moči napajalnika.

$$\eta = \frac{P_{RF,out}}{P_{DC,in}} \quad (2)$$

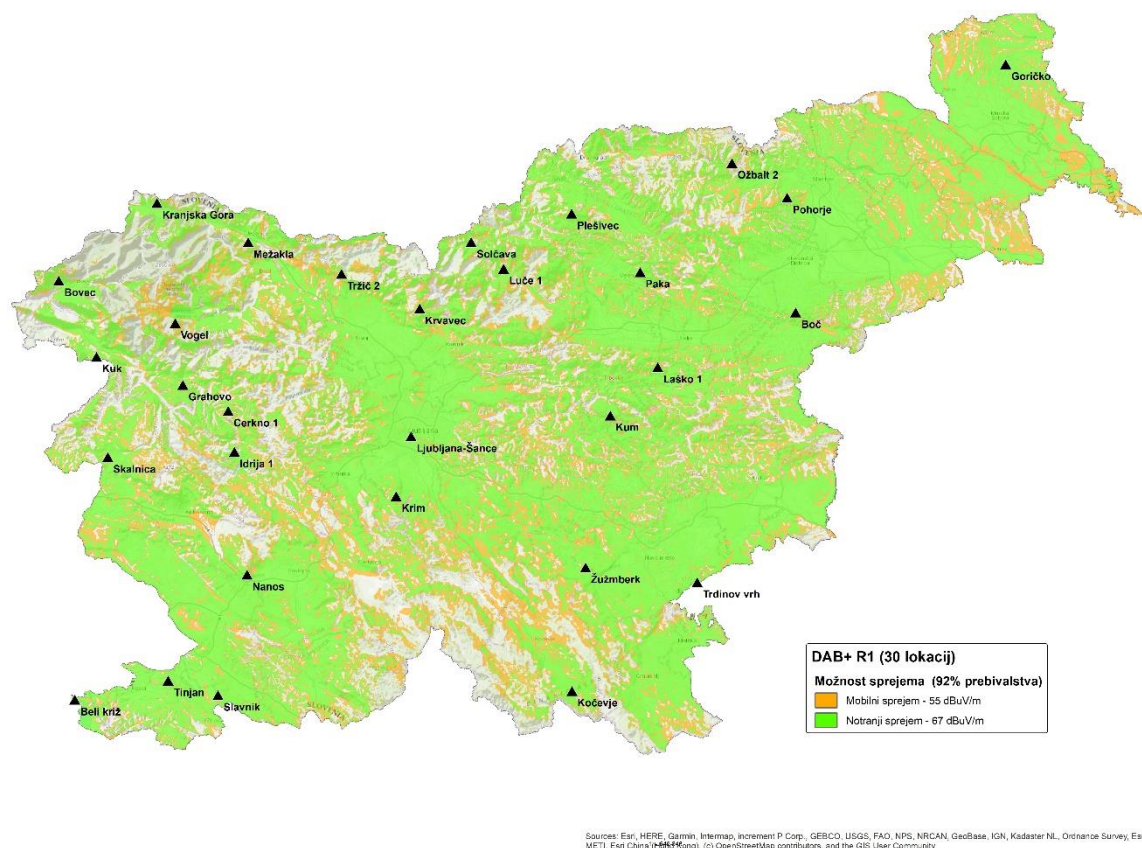
V sodobnih DAB+ oddajnikih povprečni izkoristek pogosto presega 45–50 %, medtem ko FM sistemi praviloma ostajajo pod 30 %.



Slika 2. Izkoristek RF ojačevalnikov pri FM in DAB+ (Doherty)

4. Digitalni radio v Sloveniji

Digitalni radio je v Sloveniji v uporabi že od leta 2016, prvi DAB+ multipleks (R1), kot tudi vse naslednje je postavila RTV Slovenija – Oddajniki in zveze. V Sloveniji trenutno delujejo štiri DAB+ omrežja R1–R4, operater vseh je RTV Slovenija. Trenutno je v omrežjih 59 programov, od tega je nekaj programov dostopnih izključno preko DAB+ platforme. To kaže, da je digitalna radiodifuzija v Sloveniji napredovala tako v tehnološkem kot tudi v programskem smislu — kar je neposredno povezano s trajnostnimi cilji (več programov z manj porabe, boljša spektralna izraba, sodobna oddajniška oprema). Postavljeno je tudi omrežje R5, ki se bo po prvih prognozah prav tako hitro napolnilo, vsaj glede na prve informacije zbiranja ponudb radijskih izdajateljev, ki ga je konec leta 2025 izvedel AKOS. Decembra 2025 je bila sprejeta tudi novela Zakona o RTV Slovenija, ki tudi RTV Slovenija omogoča pripravo dodatnih tematskih radijskih programov za digitalno oddajanje DAB+. Ti pomembni koraki potrjujejo, da se digitalni radio v Sloveniji uveljavlja kot osrednja platforma prihodnjega radijskega oddajanja. V sodelovanju z DARS se nadaljuje projekt uvajanja DAB+ v avtocestne predore. Projekt v naslednjih dveh letih zagotavlja fazno izvedbo DAB+ signalizacije v vseh AC predorih daljših od 500 m. Do leta 2028 pa je osrednji cilj, doseganje pokritosti z DAB+ signalom, ki bo primerljiva oziroma boljša od sedanje pokritosti z FM radijskim signalom.



Slika 3: Pokritost prvega omrežja DAB+ R1 - mobilni sprejem in fiksni sprejem

5. Dodatne možnosti za izboljšanje energetske učinkovitosti DAB+ omrežij

Novejše raziskave BBC Research & Development v sodelovanju z omrežnim operaterjem Arqiva kažejo, da je energetska učinkovitost DAB+ oddajnikov mogoče bistveno izboljšati tudi brez zamenjave obstoječe infrastrukture. Ključni pristop temelji na optimizaciji obratovalnih parametrov oddajnikov, predvsem kakovosti modulacije, izražene z modulačijskim razmerjem napake MER (Modulation Error Ratio) (3), ter s tem povezane konfiguracije napajalnih sistemov močnostnih ojačevalnikov. MER je standardni kazalnik kakovosti digitalno moduliranega signala, ki opisuje, kako daleč je dejanski signal od idealne konstelacije.

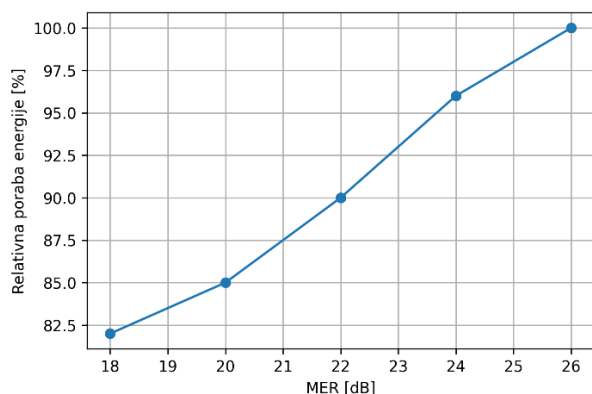
$$MER_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{n=1}^N |s_n|^2}{\sum_{n=1}^N |s_n - s'_n|^2} \right) \quad (3)$$

- s_n idealne (referenčne) simbolne točke,
- s'_n dejansko izmerjene simbolne točke,
- N število opazovanih simbolov

MER je definiran kot razmerje med povprečno močjo idealnega moduliranega signala in povprečno močjo napake modulacije.

Tradicionalno so bili DAB+ oddajniki načrtovani z relativno konservativnimi zahtevami glede MER, tipično ≥ 25 dB, kar zagotavlja zelo veliko rezervo kakovosti signala. Raziskave BBC R&D pa so pokazale, da ima znižanje MER na približno 20 dB zanemarljiv vpliv na pokritost in kakovost sprejema, tudi v realnih pogojih z večsternim razširjanjem in fadingom. To je bilo potrjeno tako z analitičnimi modeli kot z laboratorijskimi meritvami in terenskimi preskusi v dejanskem DAB+ omrežju.

Znižanje zahtevane vrednosti MER omogoča zmanjšanje potrebnega izhodnega back-offa močnostnih ojačevalnikov in s tem znižanje napajalne napetosti, kar neposredno poveča izkoristek sodobnih Doherty ojačevalnikov. BBC navaja, da kombinacija znižanja MER in prilagoditve napajalnih sistemov omogoča zmanjšanje porabe električne energije posameznega oddajnika za 5 do 18 %, odvisno od konfiguracije in obratovalnega režima. Na ravni celotnega nacionalnega DAB+ omrežja to pomeni skupne prihranke v razponu 12–13 %.



Slika 4. Poraba električne energije DAB+ oddajnikov v primerjavi z MER.

Te ugotovitve so še posebej pomembne v kontekstu statistične narave DAB+ signala, ki ima zaradi OFDM modulacije visok faktor PAPR (tipično okoli 9–10 dB). Kot kaže teoretična analiza učinkovitosti različnih razredov ojačevalnikov, je izkoristek klasičnih B oziroma AB ojačevalnikov pri takšnih signalih omejen na približno 25–30 %. Dohertyjeva arhitektura sicer bistveno izboljša učinkovitost pri delovanju pod nazivno močjo, vendar je tudi pri njej vsaka dodatna rezerva v PAPR in MER neposredno povezana z večjo porabo energije.

Rezultati raziskav kažejo, da je možno z razumno optimizacijo, kompromisa med kakovostjo modulacije in energetske učinkovitostjo doseči pomembne trajnostne učinke brez poslabšanja storitve za uporabnike. Tak pristop je še posebej primeren za javne radiodifuzne sisteme, kot je RTV Slovenija, kjer je dolgoročno zmanjševanje porabe energije in ogljičnega odtisa ključni strateški cilj.

6. Zaključek

Prehod z analognega FM oddajanja na digitalni radio DAB+ predstavlja za RTV Slovenija enega ključnih razvojnih korakov na področju radiodifuzije. Analiza spektralne učinkovitosti nedvomno kaže, da DAB+ omogoča bistveno boljši izkoristek omejenega frekvenčnega spektra, saj na enoto uporabljenega pasu omogoča približno dvakrat več radijskih programov kot analogni FM sistem. Takšna racionalna raba spektra zmanjšuje potrebo po novih frekvenčnih dodelitvah in infrastrukturnih posegih ter prispeva k dolgoročno vzdržnemu razvoju medijskega prostora.

Pomemben vidik trajnosti predstavlja tudi energetska učinkovitost oddajnih sistemov. Digitalno oddajanje DAB+ v kombinaciji s

sodobnimi arhitekturami močnostnih ojačevalnikov, zlasti z uporabo Dohertyjeve metode, omogoča bistveno višji povprečni izkoristek v primerjavi s klasičnimi FM oddajniki. Nadaljnje izboljšave energetske učinkovitosti so možne tudi z optimizacijo obratovalnih parametrov, predvsem z razumno prilagoditvijo zahtevane vrednosti MER, kar potrjujejo raziskave BBC Research & Development. Takšen pristop omogoča merljive prihranke električne energije brez zaznavnega poslabšanja pokritosti ali kakovosti storitve za uporabnike.

Razvoj DAB+ omrežij v Sloveniji, vključno z razširitvijo pokritosti, uvajanjem signala v avtocestne predore in pripravo novih vsebin, potrjuje, da se digitalni radio uveljavlja kot osrednja platforma prihodnjega radijskega oddajanja. Do leta 2028 je realen cilj doseči pokritost z DAB+ signalom, ki bo primerljiva oziroma boljša od obstoječe FM pokritosti. V tem kontekstu digitalizacija radia ne pomeni zgolj tehnološke nadgradnje, temveč strateško naložbo v energetske učinkovitost in odpornost javnega medijskega sistema RTV Slovenija.

7. Literatura

- [1] ITU-R P.1546-6, Prediction method for point-to-area terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 4000 MHz, International Telecommunication Union, Geneva, 2023.
- [2] ETSI EN 300 401, Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers, European Telecommunications Standards Institute.
- [3] EBU, Cost and Energy Efficiency of Radio Distribution Platforms, EBU Technical Report, European Broadcasting Union, Geneva.
- [4] EBU Tech 3348, Frequency and Network Planning Aspects of DAB, European Broadcasting Union.
- [5] WorldDAB, Understanding the Environmental Impact of DAB+, WorldDAB, 2021.
- [6] WorldDAB, DAB+ 2024–2030: Digital Radio Outlook, WorldDAB.
- [7] BBC Research & Development, DAB Transmitters: Energy Efficiency Optimisation, White Paper WHP 422, BBC R&D, 2025.
- [8] BBC Research & Development, DAB: Class B Amplifiers and Transmitter Efficiency, White Paper WHP 423, BBC R&D, 2024.

[9] BBC Research & Development, The Energy Footprint of Radio Distribution, BBC R&D Technical Report.

[10] CEPT ECC, Planning Parameters and Coverage Criteria for Digital Sound Broadcasting, Electronic Communications Committee.

[11] RTV Slovenija, Digitalni radio DAB+ – Oddajanje in omrežja, <https://www.rtvlo.si/oz/oddajanje/dab>

[12] AKOS, Digitalni radio DAB+ v Republiki Sloveniji – razpisi in razvoj omrežij, Agencija za komunikacijska omrežja in storitve RS.

[13] Digital Broadcasting Worldwide, DAB+ Coverage and Monitoring, <https://digitalbroadcasting.org/monitoring/>

[14] Digitalni radio Slovenija, Razvoj in stanje digitalnega radia DAB+ v Sloveniji, <https://digitalniradio.si/>

O avtorju



Andrej Trojer je vodja organizacijske enote Oddajniki in zveze na RTV Slovenija. Po izobrazbi je diplomirani inženir elektrotehnike ter magister poslovnih ved z dolgoletnimi izkušnjami na področju radiodifuznih, komunikacijskih

in oddajniških sistemov. V svoji poklicni karieri se ukvarja z razvojem, načrtovanjem in upravljanjem oddajniške infrastrukture ter s strateškimi vprašanji digitalizacije radijskega in televizijskega oddajanja. V zadnjih letih se aktivno posveča povezovanju tehničnih in upravljaljskih vidikov delovanja javnega medija, z namenom zagotavljanja dolgoročne vzdržnosti, odpornosti in zanesljivosti kritične infrastrukture RTV Slovenija.

Vloga zasebnih 5G omrežij v industriji in kritični infrastrukturi

Janez Öri, Urban Zaletel

Kontron, d.o.o.

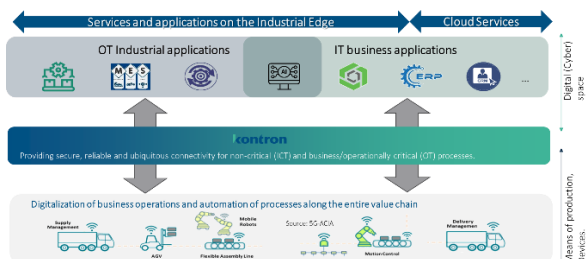
janez.ori@kontron.com

The role of private 5G networks in industry and critical infrastructure

Abstract. Private and hybrid 5G networks are becoming key infrastructure for industry, transportation, and critical public safety systems. They enable reliable, secure, and fast wireless connectivity with low latency, tailored to demanding industrial and mission-critical environments. The paper analyzes where private mobile networks are currently in the adoption cycle, describes successful deployments in various industries, and outlines future trends. It also presents Kontron's vision and ecosystem, which includes its own 5G Core, MCX, 5G devices, and cloud infrastructure to build comprehensive solutions tailored to industry requirements..

1. Uvod

Zasebna omrežja 5G postajajo hrbtenica digitalne preobrazbe v industriji, kjer povezujejo OT (operativne tehnologije) in IT svetove v enoten, varen in zmogljiv komunikacijski sloj. Kot kaže arhitektura na sliki 1, takšna omrežja omogočajo zanesljivo povezljivost med proizvodnimi sredstvi, senzoriko, mobilno robotiko in kritičnimi aplikacijami na robu omrežja (edge), obenem pa povezujejo tudi poslovne sisteme, kot so ERP, CRM in sistemi za upravljanje zalog. Tako se omogoča celovita avtomatizacija procesov skozi celotno vrednostno verigo – od surovin do dostave končnega izdelka.



Slika 1 - 5G kot omrežna platforma za digitalizacijo

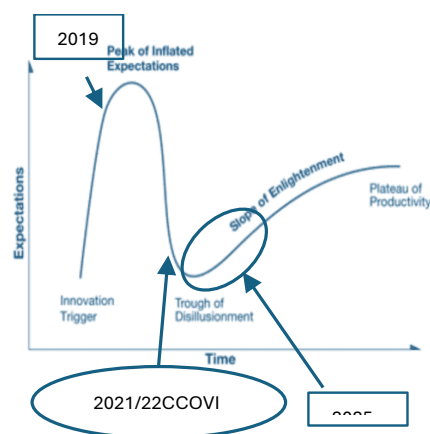
V železniškem sektorju zasebna omrežja 5G – v vlogi FRMCS – omogočajo širok spekter uporabe:

od avtonomne vožnje, sledenja, digitalnega signaliziranja in MCX komunikacij, do izboljšane potniške izkušnje in varnosti na vlakih ter postajah. Koncept zasebnih mobilnih omrežij povezuje infrastrukturo, vlake in nadzorne sisteme, z možnostjo uporabe različnih inovativnih aplikacij npr. brezpilotnih sistemov za nadzor in umetne inteligence za napredno upravljanje.

Po različnih mednarodnih organizacijah in vodilnih v industriji (npr. 5G-ACIA, UIC, Ericsson, Siemens) so zasebna 5G omrežja ključni gradnik pametnih tovarn, varnih železnic in odpornosti kritične infrastrukture. Vizija prihodnosti temelji na odprti, standardni in suvereni rešitvi, ki omogočajo varno obdelavo podatkov lokalno in v realnem času – brez kompromisov glede učinkovitosti ali varnosti.

2. Zasebna omrežja 5G in cikel uveljavljanja novih tehnologij

Kot prikazuje Gartnerjev »hype cycle« (slika 2) in industrijski vpogledi (npr. 5G-ACIA, Bosch, Siemens), so zasebna omrežja 5G trenutno v fazi prehoda iz obdobja pretiranih pričakovanj in začasnega razočaranja v fazo uvida, prve proizvodne uporabe in izgradnje zaupanja.



Slika 2 - Krivulja navdušenja nad tehnologijo 5G v industriji

Sprva, ob predstavitvi 5G za industrijske potrebe, ob koncu prejšnjega desetletja (2018, 2019), so bila pričakovanja izredno visoka, saj je tehnologija obljubljala odpravo omejitev Wi-Fi in

žičnih povezav z uvedbo zanesljive, varne in mobilne brezžične rešitve. Vendar se je v letih 2021–22, tudi zaradi pandemije, pokazalo, da industrijsko okolje zahteva še nekaj korakov, preden lahko tehnologijo v celoti vpelje v kritične procese.

Zakaj je uveljavitev 5G v industriji počasnejša, kot se je predvidevalo?

- Zahtevna narava industrije: Industrijski sistemi so tradicionalno konzervativni, z dolgimi investicijskimi cikli in visoko potrebo po razpoložljivosti.
- Nepopolni standardi: Šele zadnje 3GPP verzije (Rel. 16, 17, 18) prinašajo nujne funkcije za industrijo, kot so TSN (Time Sensitive Networking), RedCap in URLLC.
- Omejena dostopnost opreme: Ekosistem naprav, kot so industrijski moduli, routerji in senzorji s podporo 5G, se je razvijal počasneje od infrastrukture.
- Kompleksnost integracije: Povezovanje z OT sistemi (SCADA, PLC, DCS) zahteva prenovno varnostnih modelov in omrežnih arhitektur.

Zakaj zdaj prihaja čas industrijskega 5G?

- Uporaba v zahtevnih okoljih: Rudniki, пристanišča, logistika in energetika, kjer je pokritost ključna in Wi-Fi nezadosten.
- Vzporedna digitalizacija: Uvedba edge AI, video nadzora, mobilne robotike in digital twins ustvarja potrebo po zanesljivi brezžični povezavi.
- Pilotni projekti vodilnih podjetij: Siemens, Bosch, Airbus, Schneider Electric in drugi že izvajajo pilotske in produkcijske uvedbe zasebnih omrežij 5G.
- Regulativne spodbude: EU in nacionalne strategije (npr. CRA, NIS2) spodbujajo lokalno infrastrukturo in varnostno suverenost.

Zasebna omrežja 5G (MPN-Mobile Private Network) tako prehajajo iz faze PoC v produkcijsko uporabo, pri čemer industrija končno prepozna vrednost v zanesljivosti, varnosti in fleksibilnosti, ki je ni mogoče doseči s klasičnimi brezžičnimi tehnologijami. Podjetja, ki danes vlagajo v 5G, postavljajo temelje za konkurenčno prednost v prihodnjem desetletju.

3. Kje so se mobilna zasebna omrežja že uveljavila, uporabniški primeri, reference

Zasebna omrežja 5G postajajo ključna komponenta digitalne preobrazbe industrije, saj omogočajo visoko zanesljivo, varno in brezžično povezljivost za avtomatizacijo, komunikacijo in optimizacijo v kompleksnih industrijskih okoljih. Tehnologija naslavlja omejitve Wi-Fi in žičnih omrežij v okoljih, kjer sta mobilnost in odzivnost ključni.

Ključne skupine uporabe:

- Pametna proizvodnja in logistika: povezovanje AGV-jev, mobilnih robotov, AI kamer in skenerjev z MES in ERP sistemi.
- Varnostno-kritične aplikacije: video nadzor v realnem času, MCX komunikacija, opozorilni sistemi za industrijsko osebje.
- Sledenje materialom in virom: črtni in QR kodni bralniki, senzorji za energijo in porabo materiala.
- Posodobitev zastarele infrastrukture: brezžična modernizacija obstoječih proizvodnih linij brez poseganja v žično infrastrukturo.
- Raziskovalna in razvojna okolja: testiranje edge AI, prototipizacija, sinhronizacija naprav prek TSN.

Primeri iz prakse:

- Bosch, Siemens, Schneider Electric: lastni 5G-kampusi v proizvodnih obratih za digitalizacijo logistike, nadzora in avtomatizacije.
- Airbus: uvedba 5G MPN za kritično komunikacijo med mobilnimi stroji, osebjem in nadzornimi sistemi.
- Deutsche Messe Hannover: 5G-kampus, kot inovacijsko središče za industrijske PoC in testiranja.
- Grand Paris Express (Linija 18): Kontron rešitev za komunikacijo, video prenos in geolokacijo v celovito digitalizirani železniški liniji.
- Cinkarna Celje in Kontron Augsburg: praktična uvedba 5G v srednje velikih industrijskih okoljih s konkretnimi koristmi za proizvodnjo, skladiščenje in nadzor.

Zreli industrijski projekti s 5G MPN potrjujejo prehod iz PoC-faze v produkcijsko rabo. Ključni dejavniki uspeha so:

- integracija z obstoječim IT/OT okoljem,
- izbira arhitektur z ločenim jedrom 5G (5GC),

- uporaba lokalnega robne infrastrukture,
- partnerski pristop s specializiranimi sistemskimi integratorji.

4. FRMCS – prihodnost komunikacij v železniškem prometu

Uvedba FRMCS predstavlja enega najbolj strukturiranih in strateško podprtih primerov uporabe zasebnih omrežij 5G za potrebe kritične infrastrukture v Evropi. Gre za prvo implementacijo, ki združuje ključne tehnološke elemente nove generacije mobilnih omrežij (5G-jedro, komunikacija z majhno zakasnitvijo, storitve MCX, razslojevanje omrežja) v strogo reguliranem okolju, ob tem pa zagotavlja interoperabilnost na ravni EU.

FRMCS temelji na specifikacijah organizacije 3GPP (verzije 16, 17 in 18) in standardih ETSI za MCX, kar omogoča zanesljivo, varno in odzivno komunikacijo v realnem času. Ta pristop se že v pilotnih projektih uresničuje v obliki popolnoma zasebnih 5G omrežij, kjer železniški operater nadzoruje celoten spekter, jedro in dostopovno omrežje.

Ključni elementi vključujejo:

- namenska uporaba spektra, na primer pas 1900–1910 MHz (EU pas n39), rezerviran za železniške komunikacije,
- ločeno 5G-jedro, ki omogoča lokalno obdelavo, neodvisnost in visoko razpoložljivost,
- podporo za MCX storitve (glas, video in podatki) za »mission« kritične aplikacije,
- uporabo razslojevanja in mehanizmov kakovosti storitev za ločevanje signalizacije, dispečerske komunikacije, videa in diagnostičnih podatkov.

Primeri uvedbe v Evropi:

- Pilotna testiranja v okviru projekta MORANE-2, vključno z dispečerskimi klici in geolokacijo prek 5G.
- Nemčija (DB Netz): testiranje FRMCS na železniških koridorjih z naprednimi nivoji signalizacije (ERTMS).
- Francija (SNCF Réseau): načrtovana migracija na FRMCS do leta 2030 z uporabo zasebnega omrežja 5G.

FRMCS dokazuje, da je tehnologija 5G tehnično in regulativno primerna za uporabo v zasebnih in varnostno-kritičnih okoljih. Tak model je uporaben tudi za letališča, energetske distribucijske sisteme, pametna mesta, obrambo in industrijske logistične

centre, kjer je potrebna lokalna, varna in zanesljiva komunikacija brez odvisnosti od javnih operaterjev.

FRMCS ne pomeni zgolj zamenjave obstoječega sistema GSM-R, ampak uvaja celovit koncept nove generacije komunikacijske infrastrukture, ki temelji na odprtih standardih, suverenosti, varnosti in lokalni razpoložljivosti. Zaradi jasne strategije, usklajenega spektra in politične podpore v EU je FRMCS lahko model tudi za druge panoge, ki iščejo zanesljivo zasebno omrežje.

5. Zaključek

Zasebna omrežja 5G postajajo ključna sestavina digitalne preobrazbe v industriji, prometu in kritični infrastrukturi. Prispevek je pokazal, da se tehnologija kljub začetnim izzivom vse bolj uveljavlja – od pilotnih projektov do stabilnih produkcijskih okoljih. Ključni dejavniki uspeha vključujejo zanesljivost, nizko zakasnitev, varnostno suverenost, lokalno obdelavo podatkov in zmožnost integracije z obstoječimi IT in OT sistemi.

Primer FRMCS jasno dokazuje, da je 5G pripravljen za varnostno-kritično rabo in da zasebna omrežja predstavljajo vzdržen in strateško neodvisen model uvedbe. Podobni pristopi so že v teku tudi v industriji, energetiki in logistiki, kjer potreba po odpornosti in digitalni suverenosti narašča.

Kontron, kot sistemski integrator, gradi ekosistem, ki vključuje:

- lasten 5G jedrni sistem z IMS in MCX funkcionalnostmi,
- 5G RAN prilagojen FRMC in zasebnim rešitvam 5G,
- industrijsko preizkušeno strojno opremo in omrežne rešitve,
- platformo ICP za integracijo z OT/IT okoljem,
- odprto arhitekturo, ki omogoča povezljivost, varnost in nadzor v skladu z evropskimi regulativami (CRA, NIS2).

S celovitim portfeljem za načrtovanje, implementacijo in vzdrževanje zasebnih omrežij 5G Kontron naslavlja ključne zahteve uporabnikov, ki potrebujejo zanesljivo, prilagodljivo in varno komunikacijsko infrastrukturo za naslednje desetletje industrijske evolucije.

6. Literatura

- [1] GSMA (2023): "5G IoT for Manufacturing"
- [2] GSA (2024): "Private Mobile Networks Market Status"
- [3] 5G-ACIA Whitepapers: "5G for Connected Industries and Automation"

[4] UIC (2024). Future Railway Mobile Communication System (FRMCS). Dostopno na: <https://uic.org/frmcs>

[5] Kontron dokumentacija

O avtorju

Janez Ōri je izvršni direktor Poslovne enote Komunikacijske rešitve v podjetju Kontron. Ima več kot 25 let izkušenj v telekomunikacijski industriji. V Kontronu je odgovoren za poslovno vodenje, razvoj portfelja rešitev in strateško usmerjanje dejavnosti na področju zasebnih omrežij 5G, kritičnih komunikacij in digitalne infrastrukture za industrijo, transport in telekome.

5G-Based Audio-Visual Content

Transmission for Broadcast Production

Abstract. *In television production systems, the transport of Audio-Video over Internet Protocol (AVoIP) is increasingly being adopted, replacing traditional dedicated wired interfaces such as the Serial Digital Interface (SDI). Providing the high bit rates required by SDI links presents a significant challenge, while network interfaces are becoming more accessible, widely adopted, and capable of very high data rates. The use of IP infrastructure also offers numerous advantages in both signal transport and audiovisual resource management.*

At the same time, the development of modern 5G mobile networks enables higher data rates and flexible operational modes, supporting resource reservation, high bidirectional throughput, increased reliability, and low latency. Since 5G networks are inherently IP-based, their combination with AVoIP approaches creates new opportunities, particularly in field production scenarios, where the free movement of camera operators presents a major challenge and typically requires dedicated short-range wireless or satellite transmission systems.

The use of protocols such as SMPTE ST 2110 (with JPEG XS compression) or NDI, combined with 5G networks for field contribution and mobile camera connectivity in sports broadcasting, presents a unique opportunity to improve efficiency and reduce the need for additional dedicated equipment, as the transmitted signals are directly usable throughout all stages of production without further conversion. Nevertheless, several challenges remain, including the selection of appropriate frequency bands, radio-side hardware, and, in particular, measurement equipment capable of providing comprehensive insight into network conditions and link stability.

1. Televizijski produkcijski sistemi

Televizijska produkcija za delovanje zahteva sistem ustrezno povezane ter konfigurirane strojne in programske opreme, ki je razdeljena v več sklopov

- zajem, obdelava in distribucija avdio-video (ang. Audio-Video – AV) vsebin. Načrtovanje sistemov stremi k visoki tehnični kakovosti, zanesljivosti delovanja in natančni časovni usklajenosti vseh komponent, še posebej pri produkciji v živo, kjer popravki po izvedbi niso možni [1].

Sistemi za izvajanje televizijske produkcije vključujejo kamerne verige, mikrofone, avdio in video mešalne mize, zaslone, zvočnike, podsisteme za grafiko, snemanje, predvajanje, komunikacije, nadzor in krmiljenje ter drugo opremo. Povezave med posameznimi komponentami so tradicionalno zasnovane na namenskih fizičnih vmesnikih, optimiziranih za prenos nekompresiranih ali minimalno kompresiranih avdio-video signalov z nizko zakasnitvijo in visoko zanesljivostjo. Posebna pozornost je namenjena sinhronizaciji avdia in videa ter dodatnih vsebin, saj odstopanja neposredno vplivajo na zaznano kakovost vsebin.

Pomembna razdelitev na področju je med studijskimi in terenskimi televizijskimi produkcijami. Studijska TV produkcija poteka v nadzorovanem okolju s stalno infrastrukturo, kjer so pogoji osvetlitve, akustike in napajanja stabilni, sistemi pa optimizirani za dolgoročno delovanje. Terenska TV produkcija na drugi strani zahteva visoko stopnjo prilagodljivosti, mobilnosti in odpornosti na okoljske vplive, saj se produkcijski sistemi pogosto vzpostavljajo začasno, z omejenimi prostorskimi in energetske viri ter s povečanim tveganjem za motnje.

Največje gonilo tehnološkega razvoja televizijske produkcije so vsebine na področju športa, saj visoka gledanost in veliki finančni vložki spodbujajo uvajanje višjih tehničnih standardov, naprednih produkcijskih sistemov in sodobnih produkcijskih pristopov, ki se kasneje prenesejo tudi na druga področja vsebin televizijske produkcije.

2. Sodobni pristopi povezovanja produkcijske opreme

V sodobnih televizijskih produkcijskih sistemih se vse bolj uveljavlja pristop povezovanja opreme AVoIP (ang. Audio-Video over IP), pri katerem se

namenski fizični vmesniki, kot so SDI (ang. Serial Digital Interface), HDMI (ang. High-Definition Multimedia Interface) in XLR, postopno nadomeščajo z omrežnimi vmesniki, ki temeljijo na internetnem protokolu (ang. Internet Protocol – IP) [2]. Ključni razlog za ta prehod so naraščajoče zahteve po višjih ločljivostih, višjem številu slik na sekundo in večjem dinamičnem razponu video signala ter potrebe po večji prilagodljivosti in razširljivosti produkcijskih sistemov. Napredek tehnologije, skladen z naraščajočimi zahtevami, lahko pri spremljanju televizijskih programov opazijo tudi gledalci, saj so spremembe opazne tudi laičnemu očesu.

Vse te izboljšave na drugi strani pomenijo tudi povečanje zahtevanih podatkovnih pretokov. V fazi TV produkcije se zaradi številnih razlogov uporabljajo nekompresirani AV signali:

- zagotavljanje minimalne in stabilne zakasnitve z namenom sinhronizacije signalov;
- izogibanje večkratnemu izvajanju prekodiranja z namenom ohranjanja najvišje možne kakovosti signalov med različnimi fazami obdelave;
- predvidljivo delovanje sistema, njihove operativne zanesljivosti in robustnosti ter
- enostavnejša večkratna in vzporedna uporaba istega signala.

Če je bil pred dobrim desetletjem za prenos nekompresiranega signala v ločljivosti SD (ang. Standard-definition) podatkovni pretok 270 Mb/s povsem dovolj [3], se danes, ob uporabi precej višjih ločljivosti in drugih parametrov AV signalov, srečujemo z bitnimi pretoki, ki presegajo 20 Gb/s, kar presega tehnične omejitve klasičnih koaksialnih povezav. Omrežne tehnologije se medtem hitro razvijajo in v praksi omogočajo tudi mnogo višje podatkovne pretoke.

Na področju profesionalne televizijske produkcije se je kot ključni standard uveljavil SMPTE ST 2110 (ang. Society of Motion Picture and Television Engineers Standard), ki omogoča prenos posameznih audio, video in podatkovnih vsebin z ene izvirne naprave v ločenih podatkovnih tokovih [4]. Tak pristop omogoča ločeno delovanje TV produkcijskih sistemov, kjer se posamezni viri kot so zvok, slika, grafični elementi in upravljanje kamer obdelujejo ločeno, hkrati pa omogoča učinkovitejše usmerjanje signalov in večjo prilagodljivost celotne arhitekture. Medtem, ko se lahko pri tem standardu uporablja obstoječe optično ožičenje, morajo biti omrežna strojna oprema in strežniki za upravljanje signalov dovolj napredni, saj zahtevani omrežni standardi in protokoli za

delovanje SMPTE ST 2110 na splošni omrežni opremi niso podprti.

Video signal, skladen s SMPTE ST 2110 v ločljivosti 4K (3840 točk × 2160 točk) in s 50 slikami na sekundo brez prepletanja (50p) ter z visokim dinamičnim razponom (ang. High Dynamic Range – HDR; 10 bit) ustvari podatkovni pretok okrog 12 Gb/s. V profesionalnih televizijskih produkcijskih sistemih se lahko pri video signalih uporabi izvirno stiskanje po standardu JPEG XS (ang. Joint Photographic Experts Group Extra Small/Extra Speed) z izjemno nizko zakasnitvijo, ki v odvisnosti od nastavitve, znaša med 5 in 32 vrsticami. Kodiranje odlikuje tudi nizka računska kompleksnost ter vizualno brezizgubno izvirno stiskanje, običajno v razmerju od 2:1 do 10:1. V določenih konfiguracijah je podprto tudi brezizgubno izvirno stiskanje [5][6].

Poleg profesionalnih standardov se v polprofesionalni produkciji in manjših produkcijskih okoljih uveljavljajo tudi drugi protokoli za prenos AV signalov preko IP omrežij, med katerimi imata pomembno vlogo NDI (ang. Network Device Interface - NDI) in Dante. Omenjena standarda omogočata prenos signalov z nizko zakasnitvijo ter uporabo obstoječe omrežne infrastrukture, kar poenostavlja postavitve in uporabo tovrstnih sistemov. Različice omenjenih protokolov omogočajo tudi prilagoditve med zahtevami po kakovosti, zakasnitvi in pasovni širini, zato sta primerna za širok spekter produkcijskih scenarijev.

Signal skladen s standardom NDI, različice HB (ang. High Bandwidth) v ločljivosti 4K (3840 točk × 2160 točk) in s 50 slikami na sekundo brez prepletanja (50p) ter HDR (10 bit) ustvari podatkovni pretok do okvirno 250 Mb/s.

Sodobni pristopi povezovanja produkcijske opreme sicer povečujejo kompleksnost načrtovanja in upravljanja tovrstnih sistemov, a kljub temu predstavljajo enega ključnih razvojnih korakov v televizijski produkciji.

3. Brežžično povezana produkcijska oprema

Poleg žičnih povezav, ki zagotavljajo osnovno hrbenico tovrstnih sistemov, potrebno za zanesljivo in predvidljivo delovanje, se v televizijskih produkcijskih sistemih uporablja tudi brezžično povezana produkcijska oprema. Ta omogoča večjo mobilnost, večjo prilagodljivost vsebinskim zahtevam TV produkcije in hitrejšo postavitve sistemov. Uporaba brezžičnih povezav je posebej uporabna v terenskih produkcijah v živo, kjer prostorske in časovne omejitve ter dinamično

dogajanje pomembno vplivajo na zasnovo produkcijskega sistema. Uporaba brezžično povezane produkcijske opreme zahteva skrbno načrtovanje, poznavanje omejitev brezžičnih prenosov ter ustrezno integracijo z obstoječimi žičnimi sistemi.

Brezžične tehnologije se v TV produkciji že dolgo uporabljajo na avdio področju, predvsem za brezžične mikrofone in slušalke. Zahteve glede brezžičnega avdia so zelo visoke, saj mora sistem zagotavljati primerljivo nizko zakasnitev in zanesljivost z žično povezanimi avdio napravami. Poleg tega mora biti delovanje odporno na motnje in mora učinkovito izkoriščati razpoložljiv radijski spekter, pogosto v okoljih z velikim številom sočasno delujočih brezžičnih naprav.

Dodaten izziv v TV produkcijskih sistemih predstavljajo brezžično povezane AV naprave, med katerimi imajo pomembno vlogo brezžično povezane kamere. Takšne kamere se lahko v kombinaciji s stabilizacijskim sistemom premikajo na večjem območju, na primer med nogometnimi tekmami ob robu igrišča, ter v okoljih, kjer uporaba ožičenja ni mogoča, na primer pri prenosih s premikajočih se avtomobilov ali motociklov med kolesarskimi dirkami. Brezžični prenos v teh primerih omogoča zajem kadrov, ki jih s klasičnimi žičnimi povezavami ni mogoče ali pa jih je zelo težko doseči.

Brezžične povezave prinašajo različne tehnične omejitve in izzive, zaradi občutljivosti na motnje, zasedenosti spektra, spremenljivih pogojev širjenja radijskega signala in izgube podatkov na prenosni poti. Razpoložljiva pasovna širina je omejena, zato je pri prenosu AV signalov preko brezžičnih povezav običajno potrebna uporaba stiskanja, kar povečuje zakasnitev in zmanjšuje kakovost signala. To je še posebej kritično pri produkciji v živo, kjer so zakasnitve in stabilnost prenosa ključnega pomena. Zagotoviti je potrebno, da so zakasnitve brezžično povezanih virov v primerjavi z žično povezanimi viri največ 1 slika pri signalih s 25 slikami na sekundo, kar pomeni največ 40 ms [7], da to ni moteče tako za člane TV produkcijskih ekip, kot tudi ne za končne gledalce vsebin. Zaradi vseh navedenih omejitev brezžične povezave v televizijski produkciji praviloma ne nadomeščajo žičnih povezav, temveč jih dopolnjujejo.

4. Uporaba omrežij 5G za povezovanje produkcijske opreme

Omrežja 5G (ang. The Fifth Generation of Mobile Telephony) v primerjavi s predhodnimi generacijami mobilnih omrežij omogočajo dovolj visoke podatkovne pretoke ter nižje in časovno

stabilnejše zakasnitve za namen brezžičnega povezovanja opreme v televizijski produkciji. Uporaba mobilnih omrežij 5G v ta namen predstavlja razvojni napredek, saj omogoča prenos signalov skladno s pristopom AVoIP tudi v brezžičnem delu, kar pomeni poenotenje uporabljenega pristopa z žično povezanimi napravami v sodobnih produkcijskih sistemih. S tem se zagotovi krajši čas dodanih zakasnitev pri brezžičnem prenosu, ki bi sicer nastale zaradi potrebe po prekodiranjih in pretvorbah signalov.

Omrežja 5G se lahko v televizijski produkciji sicer uporabljajo tudi za namen izvajanja oddaljene produkcije na terenu, kar pomeni, da se na lokaciji dogodka preko omrežja 5G poveže samo izvirne in ponorne naprave, vse ostale komponente in podsistemi pa so fiksno postavljeni na enotni oddaljeni lokaciji, kar omogoča optimizacijo razporejanja opreme in ljudi, tako s stališča časa, logistike, stabilnosti delovanja, kot tudi stroškov.

V primerjavi z brezžičnimi lokalnimi omrežji Wi-Fi, imajo omrežja 5G več pomembnih prednosti za uporabo v TV produkciji. Omrežja 5G so namreč zasnovana kot upravljana in nadzorovana infrastruktura, ki omogoča ustrezno rezervacijo virov in nadzor kakovosti delovanja ter s tem bolj predvidljivo delovanje. Za razliko od omrežij Wi-Fi, ki delujejo v prosto dostopnem radijskem spektru, in so zato bolj izpostavljena motnjam ter nepredvidljivi zasedenosti kanalov, omrežja 5G uporabljajo reguliran frekvenčni spekter, kar omogoča bistveno višjo stopnjo zanesljivosti in stabilnosti prenosa. Poleg tega omrežja 5G omogočajo boljšo podporo mobilnosti naprav, vključno z nemotenim prehajanjem med baznimi postajami, kar je ključno pri produkcijah na večjih območjih ali pri drugih tipih hitro se premikajočih naprav. Omrežja Wi-Fi so nasprotno primarno namenjena lokalni pokritosti in imajo omejitve pri zagotavljanju stabilnega delovanja pri večjih hitrostih gibanja in večjih razdaljah [8].

Kljub navedenim prednostim se pri dejanski uporabi omrežij 5G v TV produkciji pojavljajo tudi tehnični izzivi. Ključno je zagotavljanje dovolj visokih in stabilnih podatkovnih pretokov, ki so zahtevani v smeri od končne naprave (npr. kamere) proti bazni postaji. To je ravno obratno od konfiguracije za katero je v osnovi prilagojeno delovanje baznih postaj, saj večina končnih uporabnikov mobilnih omrežij v mnogo večji meri uporablja podatkovne pretoke v smeri od bazne postaje proti končnim napravam [9]. Ob tem je potrebno v omrežju 5G potrebno zagotavljati tudi dovolj nizke in stabilne zakasnitve ter zanesljivost in razpoložljivost sistema, ni pa vedno ključna

potreba po velikem številu brezžično povezanih naprav.

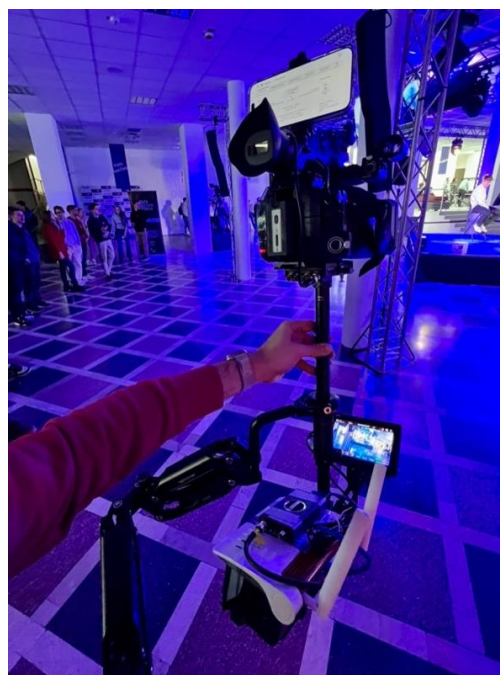
Izpolnjevanje različnih nivojev zahtev in potreb za vključevanje brezžičnih AV signalov v TV produkcijski sistem je mogoče doseči z različnimi tipi in konfiguracijami samostojnih (ang. Standalone – SA) omrežij 5G: zasebno (ang. Non-Public Network – NPN), zasebno integrirano v javnem (ang. Public Network Integrated Non-Public Network – PNI-NPN) [10] ter javno (ang. Public Network – PN), pri čemer je slednjega smiselno uporabljati tudi v kombinaciji z rezinjenjem [11]. Predvsem uporaba zadnjih dveh načinov uporabe zahteva tudi tesno sodelovanje z operaterji mobilnih omrežij. Poleg izbora tipa omrežja, je glede na zahteve, ključnega pomena tudi izbor frekvenčnega območja delovanja omrežja 5G: frekvenčni pas 1 (ang. Frequency range 1 – FR1; od 410 MHz do 7,125 GHz, pogosto poimenovan Sub-6 GHz) ali frekvenčni pas 2 (ang. Frequency range 2 – FR2; od 24,25 GHz do 71 GHz, pogosto poimenovan mmWave) [12]. Slednji je v Evropi zelo težko dostopen, predvsem zaradi omejene razpoložljivosti strojne opreme.

5. Testiranje opreme in prototipne postavitve rešitev

V okviru sodelovanja Laboratorija za multimedijo in Laboratorija za telekomunikacije na UL FE ter zunanjih partnerjev je bilo vzpostavljeno pilotno oz. raziskovalno omrežje 5G, ki omogoča povezovanje profesionalne TV produkcijske opreme. Upoštevajoč trenutno dostopnost potrebne raziskovalne opreme je poudarek pilotnega omrežja predvsem na uporabi samostojnega zasebnega omrežja 5G (5G SA NPN), ki deluje v frekvenčnem območju n78 (FR1) s frekvenčnim pasom širine 100 MHz in z načinom dupleksnega delovanja TDD.

Meritve prenosnih kapacitet, opravljene s programsko opremo iperf3, so pokazale, da je v izhodiščnih nastavitvah sistema bitna hitrost v smeri od modema proti bazni postaji znašala 130 Mb/s. Na podlagi teh meritev je bila sprejeta odločitev, da se za prenos AV vsebine uporabi NDI HB v polni visoki ločljivosti (ang. Full HD – FHD; 1920 točk × 1080 točk) in s 25 slikami na sekundo brez prepletanja (25p) ter s standardnim dinamičnim razponom (ang. Standard Dynamic Range – SDR; 8 bit), ki ustvari bitni pretok okvirno 100 Mb/s. Za pretvorbo AV vsebine v NDI signal je bil uporabljen pretvornik, ki je omogočal ročno nastavljanje bitnih pretokov od 75 Mb/s do 125 Mb/s z namenom analize vpliva bitnega pretoka na zanesljivost delovanja.

Prototipna vzpostavitev sistema je bila prvič izvedena v okviru informativnih dni Univerze v Ljubljani, Fakultete za elektrotehniko (UL FE) v februarju 2025. Izvorno stran AV signala je predstavljala kamera s stabilizacijskim sistemom, ki je kameramanu omogočala premikanje po avli fakultete, kot je razvidno na Slika 1. Ponorna stran je bila povezana v reportažno vozilo HD4 RTV Slovenija ter uporabljena skupaj z drugimi TV produkcijskimi kamerami, ki so bile v reportažno vozilo povezane na klasičen način s hibrdnim bakreno-optičnim ožičenjem. Zaradi privzetega standarda opreme v vozilu HD4 je bil uporabljen format videa 50 polslik s prepletanjem (50i). Ker reportažna vozila še ne delujejo skladno s pristopi AVoIP je bila pred končno vključitvijo v produkcijski sistem potrebna še pretvorba iz protokola NDI na vmesnik SDI.



Slika 1: Kamera nameščena na stabilizacijskem sistemu, vključno z opremo za povezavo v omrežje 5G in za sprotno spremljanje stanja povezave

Veliko število obiskovalcev v avli med informativnimi dnevi (več kot 500 oseb hkrati) je vplivalo tudi na nižji nivo sprejetega signala (ang. Received Signal Strength Indicator – RSSI) ter tudi na kvaliteto sprejetega signala oz. razmerje signala proti vsoti interference in šuma (ang. Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio – SINR), kar se je odražalo tudi v nižjih podatkovnih pretokih v smeri od modema proti bazni postaji [2][3]. Posledično so bili v okviru testiranj uporabljeni podatkovni pretoki med 75 Mb/s in 100 Mb/s. Nivo in kvaliteto sprejema bi bilo možno izboljšati z boljšo

postavitvijo anten, predvsem z višje nameščenimi antenami na strani mobilne kamere, saj so bile le-te med samim dogodkom nameščene na višini okvirno 100 cm od tal. Bazna postaja je bila nameščena na višini okvirno 250 cm od tal.

Po zaključku informativnih dni je bil obstoječi modem zamenjan za modem z boljšimi specifikacijami, ki omogoča vse zahtevane omrežne funkcionalnosti in bolj stabilno delovanje. V drugi fazi testiranja je bila zamenjanja tudi produkcijska oprema in so bile tako nadaljne raziskave opravljene s kamero ter z ostalo opremo, ki je uporabljala izvorno podporo za NDI.

Dodatno je bila prilagojena še konfiguracija bazne postaje. Po testiranju različnih parametrov bazne postaje, skladno z omejitvami le-te so bili za konfiguracijo, pri kateri so bili rezultati meritev najbolj optimalni, določeni naslednji parametri: TDD časovno razmerje povezave proti uporabniku in povezave od uporabnika (ang. Downlink:Uplink – DL:UL) 7:3, kvadraturno-amplitudna modulacija QAM256 in uporaba več prostorskih poti MIMO 2×2. Bitni pretoki, izmerjeni s programsko opremo iperf3, so v smeri od modema proti bazni postaji znašali 250 Mb/s. To v teoriji omogoča tudi uporabo 4K 50p HDR video signalov s standardom NDI ali celo s SMPTE ST 2110 z uporabo stiskanja JPEG XS.

Postavitev bazne postaje v takšni konfiguraciji je bila prototipno uporabljena na demonstracijskem dnevu podjetja Kontron v oktobru 2025, kjer je bila brezžično povezana kamera nameščena na mobilnem stabilizatorju. Ponorno stran je predstavljal produkcijski sistem delujoč po pristopu AVoIP, kamor je bila dodatno povezana še žična kamera za možnost primerjave časovnega zamika. Obe kameri sta delovali ob uporabi standarda NDI HB v ločljivosti FHD in s 50 slikami na sekundo brez prepletanja (50p) ter s SDR (8 bit), ki ustvari podatkovni pretok do okvirno 125 Mb/s [15]. Postavitev anten na modemu je bila optimizirana, saj so bile le-te pozicionirane okoli 200 cm od tal. Število udeležencev je bilo sicer mnogo manjše (med 20 in 40 oseb) kot ob prvi prototipni postavitvi. Zaradi uporabe različne opreme in okoliščin obeh postavitvev med seboj ni mogoče neposredno primerjati, kljub temu pri drugi prototipni postavitvi opreme ni prihajalo do zmanjševanja zagotovljenih podatkovnih pretokov v omrežju pod sprejemljivo mero in posledično do prekinitev signala ter potrebe po ročnem prilagajanju kvalitete oddajanih avdio-video signalov.

6. Nadaljnje delo

Nadaljnje delo bo usmerjeno v iskanje možnosti za dodatno izboljšanje zmogljivosti podatkovnih pretokov omrežja 5G v smeri od modema proti bazni postaji, tudi z vidika testne uporabe druge omrežne opreme, vključno z možnostjo uporabe frekvenčnega območja FR2.

Načrtovano je tudi testiranje prenosa AV signalov preko omrežja 5G z uporabo profesionalnega standarda SMPTE ST 2110 v kombinaciji s stiskanjem JPEG XS. Pomemben del nadaljnjega dela bo tudi vzpostavitev referenčnih produkcijskih postavitvev, namenjenih izvedbi ponovljivih in primerljivih meritev. Te bodo omogočale neposredno primerjavo med obstoječimi rešitvami, ki se uporabljajo v praksi in med predstavljenimi prototipnimi postavitvami. Izvedba takšnih meritev bo omogočila tudi objektivno preverjanje ustreznosti prototipnih postavitvev z meritvami ključnih parametrov in primerjavo z vnaprej določenimi ciljnim vrednostmi, predvsem na nivoju zakasnitev in stabilnosti povezav. Raziskave bodo vključevale tudi testiranje in meritve uporabe brezžičnih signalov v hibridnih produkcijskih sistemih, ki omogočajo sočasno uporabo različnih standardov po pristopu AVoIP in njihovo souporabo z obstoječimi namenskimi fizičnimi SDI vmesniki.

Pomemben del raziskovalnega dela bo potekal tudi v smeri preverjanja načinov za izboljšanje zanesljivosti, odpornosti in kibernetske varnosti brezžičnih produkcijskih sistemov. To bo med drugim vključevalo redundantno uporabo omrežij 5G ter ocenjevanje in optimizacijo kazalnikov kakovosti izkušnje (ang. Quality of Experience – QoE), prilagojenih za namen profesionalne televizijske produkcije v živo.

7. Literatura

- [1] „Multimedijski sistemi - učbenik“, Multimedijski sistemi - učbenik. Pridobljeno: 15. januar 2026. [Na spletu]. Dostopno na: <https://multimedija.info/ucbenik/>
- [2] „AV-over-IP vs SDI: Why the Market Is Shifting to IP and How to Prepare“, Promwad. Pridobljeno: 15. januar 2026. [Na spletu]. Dostopno na: <https://promwad.com/news/av-over-ip-vs-sdi-transition-guide>
- [3] „SMPTE STANDARD SMPTE 259M-2006 for Television — SDTV Digital Signal/Data — Serial Digital Interface“, Society of Motion Picture & Television Engineers, New York, ZDA, pomlad 2008. Pridobljeno: 15. januar 2026. [Na spletu]. Dostopno na: <https://pub.smpte.org/doc/st259/20080129-pub/>
- [4] „SMPTE ST 2110 Suite of Standards“, ST 2110 Suite of Standards. Pridobljeno: 15. januar 2026. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.smpte.org/standards/st2110>
- [5] „How JPEG XS Works – A Simple Introduction“, Pridobljeno: 15. januar 2026. [Na spletu]. Dostopno na:

- <https://www.jpegxs.com/how-jpeg-xs-works---a-simple-introduction>
- [6] „JPEG XS profiles, levels, and sublevels – Why are they important?“ Pridobljeno: 15. januar 2026. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.jpegxs.com/jpeg-xs-profiles-levels-and-sublevels---why-are-they-important>
- [7] „EBU Recommendation R37-2007 - The relative timing of the sound and vision components of a television signal“. EBU, Ženeva, Švica, februar 2007. Pridobljeno: 15. januar 2026. [Na spletu]. Dostopno na: <https://tech.ebu.ch/docs/r/r037.pdf>
- [8] „5G & Wi-Fi - indoor connectivity - benefits of 5G“, ericsson.com. Pridobljeno: 15. januar 2026. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/5g-and-wi-fi-path-toward-superior-indoor-connectivity>
- [9] „Download vs Upload Speed: What's the Difference?“ Pridobljeno: 15. januar 2026. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.virginmedia.com/the-edit/comparisons/download-speed-vs-upload-speed>
- [10] „Non-Public Networks (NPN)“, Non-Public Networks (NPN). Pridobljeno: 15. januar 2026. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.3gpp.org/technologies/npn>
- [11] „3GPP Network Slicing“. 3GPP. Pridobljeno: 15. januar 2026. [Na spletu]. Dostopno na: <https://datatracker.ietf.org/meeting/99/materials/slides-99-netslicing-georg-mayer-3gpp-network-slicing-04>
- [12] „3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone (Release 19)“. 3GPP, september 2025. [Na spletu]. Dostopno na: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.101-1/38101-1-j31.zip
- [13] „RSSI - Teltonika Networks Wiki“. Pridobljeno: 15. januar 2026. [Na spletu]. Dostopno na: <https://wiki.teltonika-networks.com/view/RSSI>
- [14] „SINR - Teltonika Networks Wiki“. Pridobljeno: 15. januar 2026. [Na spletu]. Dostopno na: <https://wiki.teltonika-networks.com/view/SINR>
- [15] „NDI High Bandwidth based on SpeedHQ2 (8bit 4:2:2)“. Pridobljeno: 15. januar 2026. [Na spletu]. Dostopno na: <https://docs.ndi.video/all/getting-started/white-paper/bandwidth/ndi-high-bandwidth-based-on-speedhq2-8bit-4-2-2>

Zahvala

Ta raziskava je podprta s strani Javne agencije za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS) v okviru raziskovalnega programa P2-0425 »Decentralizirane rešitve za digitalizacijo industrije ter pametnih mest in skupnosti«.

O avtorjih



Anže Zadravec je asistent in raziskovalec na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer deluje v Laboratoriju za multimedijo (LMMFE). Njegovo raziskovalno delo je usmerjeno v avdio-video sisteme in produkcijske arhitekture, delujoče preko omrežij IP (AVoIP). S tem področjem se ukvarja tudi v sklopu doktorskega študija Elektrotehnike. Aktivno sodeluje kot

član organizacij SMPTE in HETMA ter pri nacionalnih in mednarodnih raziskovalnih in industrijskih projektih s področja multimedije, najbolj pa ga zanima uporaba le-te na področju športa.



Andrej Kos je redni profesor na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani ter predstojnik Laboratorija za telekomunikacije (LTFE). Njegovo raziskovalno in pedagoško delo je osredotočeno na področja fiksnih in mobilnih omrežij, podatkov in kibernetske varnosti. Na Univerzi v Ljubljani (UL) vodi komisijo za inovacije, hkrati pa je predsednik sveta Agencije za komunikacijska omrežja in storitve (AKOS).



Matevž Pogačnik je redni profesor na Fakulteti za elektrotehniko, Univerze v Ljubljani in predstojnik Laboratorija za multimedijo (LMMFE). Njegovo raziskovalno področje je usmerjeno v multimedijske rešitve s tehnologijami navidezne in obogatene resničnosti, oblikovanju uporabniške izkušnje s povdankom na zagotavljanju dostopnosti za starejše in invalidne uporabnike. Je skrbnik interdisciplinarnega študijskega programa Multimedija (dodiplomski in magistrski študij)



Klemen Pečnik je raziskovalec in asistent na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani ter vodja Multimedijskega centra v Laboratoriju za multimedijo. Ukvarja se z avdio-video produkcijskimi sistemi, načrtovanjem hibridnih multimedijskih arhitektur, IP temelječih multimedijskih in oddajnih sistemov ter z rešitvami za zagotavljanje dostopnosti. Dejaven je tudi na področju mobilnosti in C-ITS, kjer se posveča tehničnim standardom, uvajanju novih storitev ter vidikom uporabniške izkušnje in zagotavljanja dostopnosti.

From Automation to Intelligence in 6G: How AI Transforms Future Mobile Systems

Janez Sterle, Luka Koršič

INTERNET INSTITUTE Ltd,
janez.sterle@iinstitute.eu

Abstract. *This paper presents MobileONE, a compact cloud-native 5G Standalone (SA) system that integrates radio access, core network functions, multi-layer observability, and AI-native operational intelligence into a single server-class platform. Unlike conventional telecom deployments that require rack-scale infrastructure and kilowatt-level power budgets, MobileONE consolidates the full 5G system—from Remote Radio Head (RRH) to 5G Core—onto a single x86 server while maintaining production-grade performance. The platform further introduces an agentic AI framework that enables autonomous diagnostics, cross-layer root cause analysis, and intent-driven operational optimization through structured interaction with live infrastructure data.*

The test and verification results indicate that AI-native operational models can significantly reduce operation complexity and energy footprint while enabling capabilities aligned with emerging 6G research directions, including autonomous network management and AI-native system architectures.

Keywords: Private 5G, 6G, Cloud-Native Systems, Agentic AI, Autonomous Networks, Energy Efficiency, Network Observability

Introduction

Mobile network deployments have traditionally relied on highly specialized, rack-scale infrastructure with substantial capital and operational expenditures. These systems typically consume several kilowatts of power and require skilled operational teams, which limits their applicability for private networks, industrial environments, and research deployments. As mobile systems evolve toward 6G, the challenge is not only to increase performance but also to improve deployability, energy efficiency, and operational autonomy.

Cloud-native architectures have significantly reduced infrastructure rigidity by virtualizing network functions and enabling elastic resource allocation. However, most current deployments still depend on large-scale hardware footprints and

manual operational workflows. At the same time, advances in large language models (LLMs) and agentic Artificial Intelligence (AI) frameworks enable a new class of operational intelligence capable of reasoning across heterogeneous data sources and executing structured actions.

This paper introduces MobileONE, a compact cloud-native 5G SA system that integrates agentic AI as a first-class operational component. The system provides dual visibility into both network-side components (Radio Access Network (RAN), Core Network (CN), Cloud infrastructure) and user-equipment (UE) perspectives through distributed monitoring agents (qMON Agents). By combining real-time observability with AI-driven reasoning and tool-based interaction, MobileONE demonstrates a practical path from automated to intelligent mobile network operations.

1. System Architecture

MobileONE implements a 3GPP-compliant 5G Standalone architecture (up to Release 17) consolidated onto a single industrial-grade x86 server. The system is organized into four primary layers:

- *5G UE with Far-Edge Layer:* Distributed industrial 5G gateways equipped with monitoring agents (qMON) performing continuous radio, performance, and other (i.e., environmental) measurements.
- *Radio Access Network Layer:* A 4×4 MIMO Remote Radio Head (RRH) operating in New Radio (NR) Band n77 (3.8–4.0 GHz), connected via CPRI fronthaul to a containerized baseband unit (BBU).
- *5G Core Network (5G CN) Layer:* Standard Service-Based Architecture (SBA) functions, including AMF, SMF, UPF, and UDR, supporting network slicing and services and subscriber management.
- *Cloud-Native Platform Layer:* A Kubernetes (K3s) environment hosting all network functions, monitoring services, and the AI framework.

All components operate on a single server equipped with 20 CPU cores, 64 GB RAM, and 1 TB of RAID storage.

Radio and Fronthaul Configuration - The RAN configuration employs TDD operation with 100 MHz bandwidth, 30 kHz subcarrier spacing, and adaptive modulation up to 256-QAM. The RRH provides up to 33 dBm per antenna port and is synchronized via GPS to ensure in-sync TDD operation. Fronthaul connectivity uses CPRI at 8 Gbps per port, achieving sub-100 μ s latency required for real-time baseband processing.

Multi-Layer Observability Model - Traditional monitoring tools typically provide visibility into either network infrastructure or UE behavior, requiring manual correlation to diagnose complex issues. MobileONE addresses this limitation through a multi-layer observability model that combines infrastructure metrics with UE-side measurements.

qMON agents are deployed on industrial 5G gateways and continuously collect metrics including: Radio parameters (RSRP, RSRQ, SINR, transmit power); Network performance (RTT, uplink and downlink throughput)

System health indicators are securely reported to a centralized backend and stored in a relational database, while time-series infrastructure metrics are collected via Prometheus exporters.

Cross-Layer Correlation - By correlating UE-side observations with gNB, core network, and server-level metrics, the system enables root cause analysis. This dual-perspective observability significantly reduces diagnostic time compared to single-layer monitoring approaches.

2. Agentic AI Framework

The operational intelligence of MobileONE is provided by an agentic AI framework based on an LLM-driven orchestrator. The AI layer interacts with the system exclusively through structured tools exposed via the Model Context Protocol (MCP), ensuring controlled and auditable access to live infrastructure data. The framework consists of:

- *AI Reasoning Layer*: LLM-based agent responsible for intent interpretation and reasoning.
- *Integration Layer*: MCP servers exposing diagnostic, monitoring, and configuration tools.
- *Data Layer*: Databases and time-series storage systems.

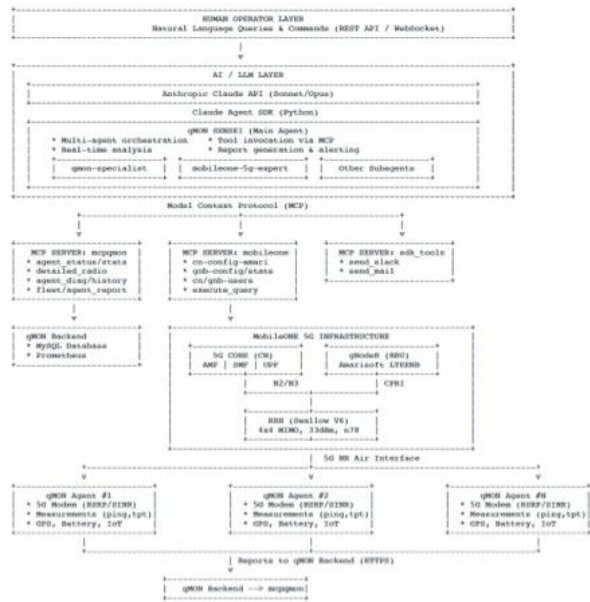


Figure 1: Architecture of a Cloud-native 5G system extended with Agentic AI capabilities.

The architecture diagram (Figure 1) illustrates all major components and their interconnections:

- *Human Operator Layer*: Entry point for natural language queries via REST API or WebSocket connections.
- *AI/LLM Layer*: Claude Agent SDK orchestrates reasoning, tool selection, and response generation. Subagents handle specialized domains.
- *MCP Integration Layer*: Three MCP servers (mcpqmon, mobileone, sdk_tools) expose tools for data access and actions.
- *Data Storage Layer*: MySQL stores qMON measurements; Prometheus stores time-series metrics from exporters.
- *5G Infrastructure Layer*: MobileONE system with BBU/Core and CPRI based RRH.
- *qMON Agent Fleet*: Monitoring agents deployed on in-house developed Industrial 5G Gateways reporting measurements to the backend.

3. Data Flow

Understanding AI data flow is critical for troubleshooting and optimizing the presented Agentic 5G system. This section describes how information moves from the human operator through AI Agent (qMON Sensei) to the underlying data sources and back. Figure 2 illustrates the complete data flow including the query processing pipeline and measurement collection from qMON agents.



Figure 2: Data flow between AI and 5G system components.

Prompt Processing Flow | When a human operator submits a natural language query (e.g., “Check 5G agent with IMSI# about the status”), qMON Sensei processes it through the following pipeline:

- (Step 1) – *Intent Parsing*: LLM analyzes the query to understand the user's intent and required information.
- (Step 2) – *Tool Selection*: Based on the intent, the agent selects appropriate MCP tools (e.g., `agent_status`, `detailed_radio`).
- (Step 3) – *MCP Invocation*: Selected tools are invoked via HTTP calls to the respective MCP servers.
- (Step 4) – *Data Retrieval*: MCP servers query their backends (MySQL, Prometheus, exposed APIs) and return results.
- (Step 5) – *Data Aggregation*: Results from multiple tools are aggregated and correlated.
- (Step 6) – *Response Generation*: LLM generates a natural language response summarizing the findings.

Measurement Collection | qMON agents continuously collect measurements according to their assigned work orders (measurement configurations). These measurements are reported to the qMON backend server via HTTPS and stored in MySQL tables including performance measurements (i.e., RTT, UL and Download Throughput), Radio measurements (Band, BW, RSRP, RSRQ, SINR, Tx Power), and others. The qMON MCP server provides read access to this data through tools like `agent_history` and `detailed_radio`.

4. Agentic AI in operation - Energy Efficiency Analysis via Autonomous AI Diagnostics

To evaluate the practical benefits of AI-native operations, an energy efficiency analysis was conducted on the deployed MobileONE system. The AI agent autonomously collected real-time metrics from multiple layers, including server power consumption, RRH energy usage, and software process utilization. The following steps summarize the process:

1. Operator submits the intent *"Analyze MobileONE system power consumption and propose strategies for power reduction"* (Figure 3), AI agent executes a structured multi-stage analysis.

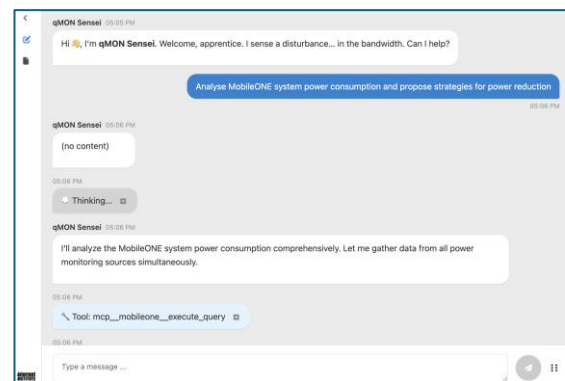


Figure 3: Initial prompt to AI Agent.

2. The AI agent first dispatches parallel MCP queries to gather real-time infrastructure metrics: server power budget via iDRAC exporter (PSU #0: 170.25W, PSU #1: 5W standby), RRH power consumption via SNMP (88W continuous despite ~5% DL utilization), and individual process power via Scaphandre (gNB: 5.17W, AMF: 0.67W, monitoring: 3.31W).
3. The LLM aggregates this data – revealing total system power of 263.25W with 66% from server overhead and 34% from RRH – and identifies key inefficiencies (Figure 4): (1) RRH operating at average 88W, (2) server consuming 170W while only 22.4% CPU utilized with 15+ cores idle, and (3) three 10G NIC ports down but still consuming standby power.

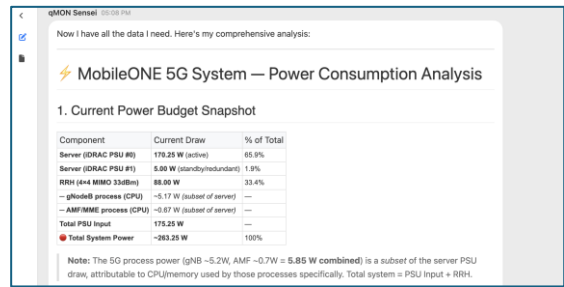


Figure 4: AI Agent response – Power consumption analysis overview.

4. The AI system then correlates this with operational context: only 2 connected UEs, ~5% DL utilization, TX power at 25 dBm (with UEs reporting CQI=15, indicating excess link margin), and 2 of 4 CPRI ports active.
5. Based on this cross-layer analysis, AI agent autonomously generates a prioritized reduction strategies (Figure 5):
- (1) immediate action – enable CPU deep C-states (15–30W savings, low risk),
 - (2) quick win – disable three unused NIC ports (6–12W savings, zero risk),
 - (3) high-impact – implement RRH DTX/symbol blanking during low-traffic periods (13–26W savings), and
 - (4) strategic—reduce TX power from 25 dBm to 20–22 dBm (8–13W savings with no QoE degradation).

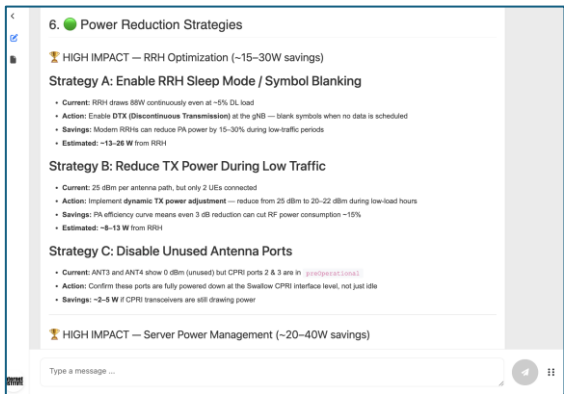


Figure 5: AI Agent response – Proposed strategies for energy saving.

The analysis revealed that the total system power consumption was 263 W, with approximately 66% attributed to server overhead and 34% to the RRH. Based on cross-layer correlation, the AI generated a prioritized optimization plan, including enabling CPU deep C-states, disabling unused network interfaces, and reducing transmit power while maintaining radio quality.

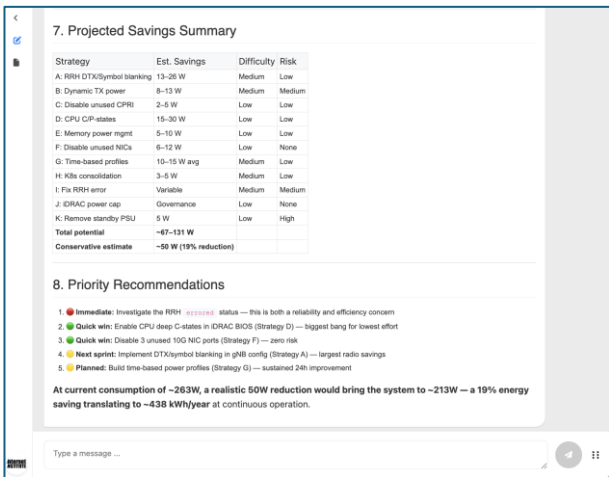


Figure 6: AI Agent response – Final summary with priority recommendations.

The proposed measures indicated a potential power reduction of approximately 50 W (19%) without degrading quality of service. This case study demonstrates the feasibility of closed-loop AI-driven optimization in operational mobile networks.

5. Discussion

The presented results indicate that compact, cloud-native mobile systems with Agentic AI capabilities can achieve performance comparable to traditional deployments while significantly reducing infrastructure footprint and operational complexity. The integration of agentic AI enables rapid diagnostics and informed optimization decisions that would otherwise require extensive manual effort.

While the current evaluation focuses on a single deployment, the architecture is designed to scale horizontally and supports future research and development into autonomous RAN optimization, intent-based network slicing, and self-healing mechanisms.

6. Conclusions and Future Work

This paper demonstrated MobileONE, a compact cloud-native 5G Standalone system enhanced with agentic AI for autonomous operations. By consolidating the full mobile network stack onto a single server and integrating AI-native observability and control, the platform addresses key challenges in deployability, energy efficiency, and operational autonomy.

Future work will focus on quantitative comparisons with conventional deployments, expanded experimental evaluation, and alignment with emerging 3GPP Release 19 AI/ML standardization efforts. The presented system

provides a practical and highly scalable research and development platform for exploring AI-driven concepts expected to shape 6G networks.

7. Acknowledgments

This research has been partially funded from the European Union's Horizon Europe projects 6GREEN (Grant agreement No 101096925) and EXIGENCE (Grant agreement No 101139120).

8. References

- [1] 3GPP TS 23.501, System Architecture for the 5G System, Release 16, 2022.
- [2] 3GPP TS 38.300, NR and NG-RAN Overall Description, Release 16, 2022.
- [3] Anthropic, Claude Agent SDK Documentation, 2025.
- [4] Anthropic, Model Context Protocol Specification, Version 1.0, 2025.
- [5] Kubernetes Authors, Production-Grade Container Orchestration, 2025.
- [6] Prometheus Authors, Monitoring System and Time-Series Database, 2025.
- [7] qMON System, <https://www.iinstitute.eu/#qmon>.
- [8] Smart Networks and Services SNS TRIALS & PILOTS BROCHURE No.1 June 2025.

9. About Authors

dr. Janez Sterle is Founder and CEO of INTERNET INSTITUTE Ltd., providing strategic and technical leadership in advanced 5G and 6G network solutions. He has expertise in cellular systems, mission-critical communications, network monitoring, and quality assurance, backed by extensive involvement in European R&I projects such as EXIGENCE, 6GREEN, 5G-LOGINNOV, and Int5Gent. dr. Sterle has led successful commercialization of telecom-grade platforms, established strategic partnerships across Europe, and actively contributes to pre-standardization and policy initiatives within 5G-PPP and SNS JU. He holds several patents in mobile systems and earned his Ph.D., M.Sc., and B.Sc. in Electrical Engineering from the University of Ljubljana, where he also worked as a researcher and lecturer.

mag. Luka Koršič is Founder and Head of Research and Development at INTERNET INSTITUTE Ltd., leading the design and deployment of cloud-native, AI-driven monitoring and 5G/6G network systems. His expertise includes Kubernetes-based infrastructures, distributed monitoring, DevOps automation, and 5G core and RAN integration. He is the chief architect of the qMON monitoring platform and the MobileONE 5G, featuring AI-powered network analysis and Model Context Protocol integrations. Luka has led technical contributions to multiple European 5G and 6G projects, including EXIGENCE, 6GREEN, EVOLVED-5G, and 5GASP, and holds an M.Sc. and B.Sc. in Electrical Engineering from the University of Ljubljana, where he previously worked as a researcher and lecturer.

Visokofrekvenčna elektronika v ekstremnem mrazu - meritve signalov GNSS na Antarktiki

Luka Zmrzlak, Aljaž Blatnik

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko

luka.zmrzlak@fe.uni-lj.si

High-Frequency Electronics in Extreme Cold: GNSS Signal Measurements in Antarctica

Abstract. Continuous monitoring of Global Navigation Satellite System (GNSS) signals in polar regions is critical for geophysical research, safe maritime navigation, and ionospheric studies. However, the deployment of instrumentation in Antarctica presents severe engineering challenges, primarily due to extremely low temperatures that compromise standard electronics, and the prohibitive cost of survey-grade receivers. This paper presents the design, validation, and deployment of a ruggedized, low-cost GNSS logging system capable of withstanding cryogenic conditions. A key innovation is the implementation of an integrated PCB heating element utilizing internal copper traces to maintain operational stability for oscillators and memory interfaces down to -80°C . The system was deployed aboard the icebreaker *Laura Bassi* for a 200-day expedition, capturing a continuous dataset of L1-band raw measurements and spectral snapshots across the Atlantic and Pacific Oceans to the Ross Sea. The analysis of the collected data reveals the presence of various radio-frequency interference types, including narrowband jamming and broadband noise, demonstrating the system's capability for spectrum surveillance in remote maritime environments.

Keywords: GNSS, Polar Electronics, PCB Thermal Regulation, Interference Detection

1. Uvod

Tehnologije globalnih navigacijskih satelitskih sistemov (GNSS) so postale nepogrešljivo orodje za spremljanje dinamike ledu, podporo varni plovbi in napredek geofizikalnih raziskav v polarnih regijah. Vendar pa ekstremni okoljski pogoji, s katerimi se soočajo odprave na visokih geografskih širinah, kjer temperature pogosto padejo pod -60°C , predstavljajo resen izziv za zanesljivost in natančnost instrumentov.

Običajne rešitve temeljijo na geodetskih sprejemnikih, ki so robustni, a izjemno dragi

(pogosto nad 15.000 €) in energetsko potratni, kar omejuje njihovo uporabo na oddaljenih lokacijah z omejenim napajanjem. Po drugi strani pa nizkocenovni komercialni GNSS moduli pogosto niso certificirani za delovanje v polarnih razmerah.

V tem prispevku predstavljamo razvoj in implementacijo namenskega sistema za beleženje signalov GNSS, ki premošča to vrzel. Sistem temelji na inovativni termalni regulaciji znotraj samega tiskanega vezja in je bil uspešno preizkušen med 200-dnevno raziskovalno odpravo ledolomilca *Laura Bassi* na Antarktiko.



Slika 1: Italijanski ledolomilec *Laura Bassi* (OGS) med pripravi na izplutje v tovrnem terminalu tržaškega pristanišča.

2. Zasnova strojne opreme za ekstremne razmere

Jedro razvitega sistema predstavlja večplastno tiskano vezje, ki gosti sprejemnik U-blox MAX-M10S. Izbran je bil zaradi svoje zmožnosti sočasnega sprejemanja več konstelacij (GPS, Galileo, BeiDou, GLONASS) na frekvenčnem pasu L1 in, kar je ključno za opazovanje motenj, zmožnosti preproste spektralne analize in detekcije motenj.

Za zagotavljanje avtonomije, ki je bila potrebna za večmesečno plovbo brez možnosti servisiranja, je sistem opremljen s tremi režami za SD kartice s skupno kapaciteto do 6 TB. Vdelana programska oprema nadzoruje zdravje pomnilniških medijev in v primeru napake samodejno preklopi na rezervno pomnilniško kartico, kar zagotavlja neprekinjen zajem podatkov.



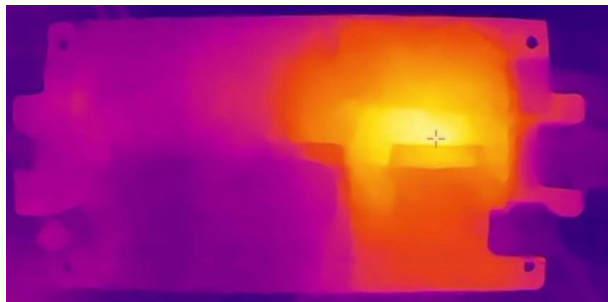
Slika 2: Zgornja stran večslojnega tiskanega vezja. Na levi je viden priključek za zunanjo anteno GNSS, spodaj so tri reže za kartice SD s skupno kapaciteto do 6 TB, desno pa super-kondenzator za avtonomno delovanje celotnega sistema do 30 s v primeru kratkotrajnega izpada zunanje napajalne napetosti (pri preklopu ladijskih sistemov na pristaniško infrastrukturo) ter konektor RJ-45 za povezavo v omrežje Starlink (oddaljena diagnostika).

Posebna pozornost je bila namenjena ohranjanju točnega časa in sinhronizaciji podatkov v primeru izpada napajanja. Namesto običajnih baterij, ki v mrazu odpovejo, je na tiskanino nameščen super-kondenzator, ki zagotavlja napajanje referenčne ure, ter prepreči nepravilen zapis sektorjev na pomnilniški medij.

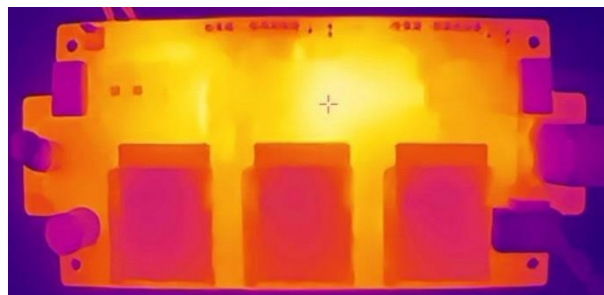
3. Inovativno termalno upravljanje

Največji izziv pri delovanju elektronike na Antarktiki niso nujno polprevodniki sami (ki pogosto delujejo do -40°C), temveč referenčni kristalni oscilatorji in mehanski kontakti (npr. SD kartice), kjer krčenje materialov in zmrzovanje vlage povzročata odpovedi.

Namesto uporabe zunanjih grelnih elementov, ki so energetsko neučinkoviti in zahtevajo kompleksno ohišje, smo razvili metodo integriranega ogrevanja večslojnega tiskanega vezja. Bakrena povezava širine 0,4 mm je speljana v serpentinasti obliki na notranjem sloju tiskanega vezja in deluje kot uporovni grelec. Gostota grelnih elementov je največja pod ključnimi komponentami (kristali, SD reže). Mikrokrmilnik bere podatke s štirih NTC termistorjev in dinamično prilagaja moč grejta (približno 4 W) za vzdrževanje temperature vezja na konstantnih $+35^{\circ}\text{C}$ (termična stabilnost tudi v primeru segrevanja raziskovalne kabine).

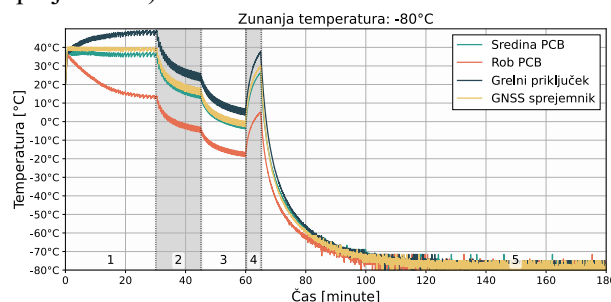


Slika 3: Termalni profil tiskanega vezja med delovanjem brez uporabe integriranega grelca. Vročo točko predstavlja linearni regulator, ki območje ogreje na približno 30°C pri sobni temperaturi 21°C .



Slika 4: Termalna slika vezja med aktivnim nadzorom temperature. Vidna je enakomerna porazdelitev toplote v notranjih slojih tiskanega vezja in orisi komponent z večjo toplotno maso, kot so reže za kartice SD, super-kondenzator in prikazovalniki LED.

Sistem je bil predhodno laboratorijsko validiran s pomočjo termično reguliranih zamrzovalnih skrinj. Pri zunanji temperaturi -18°C je sistem brez težav vzdrževal stabilno temperaturo. Pri ekstremnem testu na -80°C se je izkazalo, da je aktivno gretje nujno; ob izklopu grelca je temperatura vezja v neizoliranem ohišju padla pod kritično mejo v manj kot 15 minutah (odpoved referenčnega takta GNSS sprejemnika).



Slika 5: Stabilizacija temperature pri ekstremnem mrazu (-80°C) med preizkusom petih različnih načinov delovanja. Graf prikazuje potek temperature na štirih različnih točkah tiskanega vezja, pri čemer je najbolj kritično mesto v bližini sprejemnika GNSS in kartic SD. Območje 1 prikazuje normalen način delovanja (aktivni nadzor temperature), območje 5 pa stanje pri povsem izklopljenem grelnem elementu.

4. Odprava Laura Bassi: 200 dni na morju

Sistem je bil nameščen na italijanski ledolomilec Laura Bassi med njegovo 40. odpravo na Antarktiko. Plovba je potekala od Trsta, skozi Panamski prekop, do Nove Zelandije, nato dvakrat v Rossovo morje na Antarktiki in nazaj okoli rta Horn v Evropo.

V času odprave (oktober 2024 – april 2025) je sistem deloval brez napak. Zbranih je bilo več kot 85 milijonov navigacijskih zapisov (UBX-NAV-PVT, UBX-NAV-SAT) s frekvenco 5 Hz. Poleg tega je sprejemnik beležil parametre RF spektra (UBX-MON-RF in UBX-MON-SPAN) s frekvenco 1 Hz, kar je omogočilo edinstven vpogled v radijsko okolje na oceanih [1].

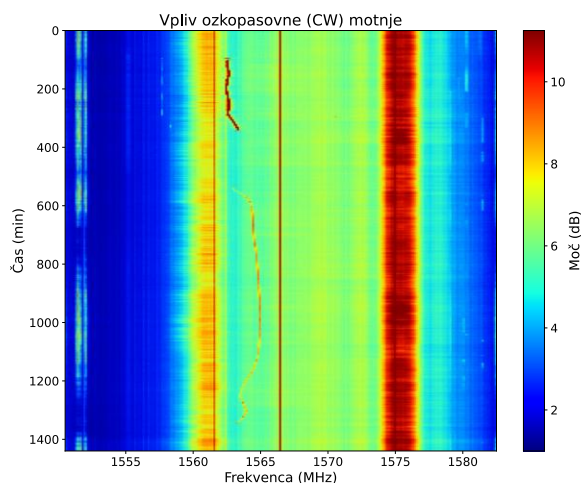


Slika 6: Namestitev zapisovalnika GNSS podatkov v ohišje IP65 znotraj neogrevane tehnične kabine nad poveljniškim mostom Laure Bassi. Spodaj sta vidna priključka za zunanje napajanje in anteno GNSS.

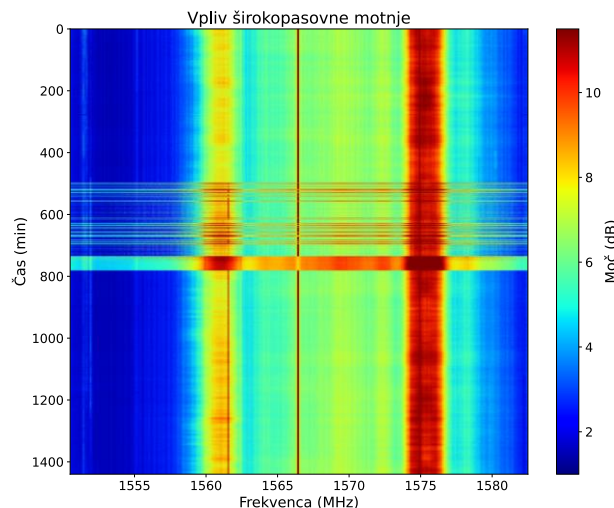
5. Rezultati: Detekcija motenj in analiza spektra

Ena izmed ključnih prednosti uporabljenega sprejemnika je zmožnost spremljanja spektra. Analiza zbranih podatkov je razkrila več različnih pojavov radio-frekvenčnih motenj:

1. **Ozkopasovne motnje (CW):** Zaznane so bile močne kontinuirane motnje, ki jih je sprejemnik uspešno zadušil z uporabo vgrajenih pasovnih sit. Na časovnih spektrogramih so te motnje vidne kot ostre linije visokih moči.
2. **Širokopasovne motnje:** V nekaterih primerih, zlasti v bližini pristanišč ali drugih plovil, je prišlo do širokopasovnih motenj, ki so dvignile nivo šuma sprejemnika, vodile nizkošumni antenski ojačevalnik v nasičenje in povzročile nestabilnost zanke samodejnega ojačanja. V takih primerih je prišlo do izgube vklenitve na posamezen sateliti in posledično do degradacije zanesljivosti navigacije.



Slika 7: Spektrogram enodnevnega zajema L1 GNSS ob vplutju v pristanišče Christchurch, Nova Zelandija. Ozkopasovna motnja je vidna med 1560 in 1565 MHz ter zaradi aktivnega programskega odstranjevanja ne povzroči odpovedi navigacijskega sistema.



Slika 8: Spektrogram širokopasovne motnje ob plutju raziskovalne ladje v priobalnem pasu Sredozemskega morja. Širokopasovna motnja se pojavi v celotnem frekvenčnem pasu in povzroči delni izpad navigacije prek sistema GPS.

Sprejemnik preklopi v način delovanja s povečanimi elektronskimi motnjami in za navigacijo uporabi preostale sisteme. Degradacija položaja je ocenjena na približno 100 m.

Podatki kažejo, da so motnje GNSS signala v pomorskem okolju pogostejše, kot se pogosto predvideva, in da nizkocenovni sprejemniki z naprednim spremljanjem spektra ponujajo stroškovno učinkovit način za detekcijo in analizo teh pojavov [1].

6. Zaključek

Razvit sistem dokazuje, da je z inovativnim inženirskim pristopom mogoče uporabiti nizkocenovne komercialne komponente za zanesljivo delovanje tudi v najbolj ekstremnih okoljih na Zemlji. Integrirano ogrevanje tiskanega vezja se je izkazalo za ključno rešitev, ki odpravlja potrebo po dragih in okornih ohišjih.

Zbrani javno dostopen podatkovni niz [1] predstavlja pomemben vir za nadaljnje raziskave na področju modeliranja napak GNSS, analize večpotja na morju in razvoja algoritmov za odpornost proti namernim motnjam.

7. Zahvala

Raziskavo je finančno podprla Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS) v okviru projektov št. V2-2342 in L7-60164.

Posebna zahvala gre Nacionalnemu inštitutu za oceanografijo in eksperimentalno geofiziko (OGS) za omogočen dostop do raziskovalne ladje Laura Bassi v tržaškem pristanišču ter njihovi tehnični in raziskovalni ekipi za vso podporo med izvajanjem meritev. Prav tako se zahvaljujemo italijanskemu nacionalnemu programu za raziskave na Antarktiki (PNRA) in ENEA za logistično podporo.

Iskreno se zahvaljujemo tudi Fakulteti za pomorstvo in promet Univerze v Ljubljani in doc. dr. Francu Dimcu,

pod katerih okriljem in strokovnim vodstvom je bil ta raziskovalni projekt uspešno zasnovan in izveden. Posebna omemba gre tudi kapitanu Valterju Subanu za prvotno pobudo za to sodelovanje.

8. Literatura

- [1] B. Bertalanič, F. Dimc, M. Bažec, in A. Blatnik, „Voyage to the Frozen Continent: A Comprehensive GNSS Dataset from a Ship’s Expedition to Antarctica“, *Sci. Data*, dec. 2025, doi: 10.1038/s41597-025-06366-x.
- [2] A. Blatnik in F. Dimc, „A Comprehensive GNSS Dataset from the 40th Laura Bassi Expedition to Antarctica“. Zenodo, 1. julij 2025. doi: 10.5281/ZENODO.15783534.

O avtorjih



Luka Zmrzlak je leta 2025 magistriral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer je za svoje magistrsko delo prejel fakultetno Prešernovo nagrado. Njegovo raziskovalno delo se osredotoča na področje naprednih radarskih tehnik, s posebnim poudarkom na razvoju protiukrepov za detekcijo in izločanje elektronskih motenj v senzorskih sistemih.

Dr. **Aljaž Blatnik** je od leta 2017 zaposlen na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer poleg pedagoškega procesa izvaja raziskave s področja visokofrekvenčne tehnike, satelitskih komunikacij, radarskih sistemov in antenskih struktur. Specializira se v razvoju namenskih visoko-tehnoloških rešitev s področja visokofrekvenčne elektronike in procesnih sistemov.

Vremenski radar FMCW

Matjaž Vidmar

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za Elektrotehniko

matjaz.vidmar@fe.uni-lj.si

Povzetek: FMCW radar je znan že skoraj stoletje oziroma izpred druge svetovne vojne. Deluje z manj kot tisočkrat nižjo vršno močjo in je bolj odporen na motnje od pulznega radarja ampak zahteva bolj komplicirano obdelavo sprejetih odmevov. Vremenski radar opazuje odboj od padavin. Nizka oddajna moč omogoča nižje motnje ostalim uporabnikom radijskega spektra s ceneno napravo. Nižje motnje in cenena naprava omogočata številne druge uporabe vremenskega radarja vključno z natančnim določanjem mesta in jakosti dodatnega slabljenja padavin v radijski zvezi.

FMCW weather radar

Abstract: The FMCW radar has been known for almost a century or since before World War II. It operates at less than a thousand times lower peak power and is more resistant to interference than pulsed radar, but requires more complicated processing of the received echoes. A weather radar observes reflections from precipitation. The low transmit power allows for lower interference to other users of the radio spectrum with a low-cost device. The lower interference and low-cost device allow for many other uses of weather radar, including precise determination of the location and strength of additional precipitation attenuation in radio communications.

1. Uvod

Zamisel za FMCW vremenski radar izhaja iz opazovanja obnašanja mikrovalovnih SSB radioamaterskih radijskih postaj z ničelno medfrekvenco po zasnovi Weaver (1956). Takšen radio deli govorni spekter na dve polovici okoli osrednje frekvence 1.8 kHz. Kakršenkoli počasi spreminjajoč odboj se preslika v pisk 1.8 kHz. Na primer uhajanje lokalnega oscilatorja, ki zaide nazaj v sprejemno anteno radijske postaje. Mahanje z roko povzroča Dopplerjev pomik odboja, da postane piskanje okoli 1.8 kHz dobro slišno (Slika 1).

Vse opisano ne razlaga opaženega pojava: določene dni sicer brezhibna radijska postaja Weaver stalno piska, kljub temu, da se v njeni bližini vsaj navidez nič ne premika. Ista radijska postaja nek drug dan ne piska več v istih pogojih?

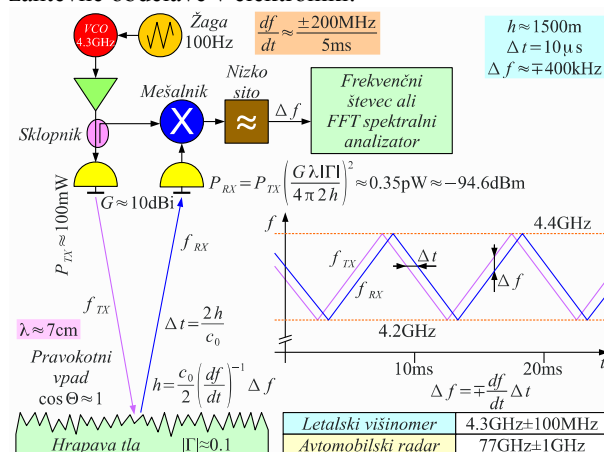


Slika 1. Radioamatersko tekmovanje na Malem Golaku.

Zelo smiselno razlago opisanega pojava sem dobil šele kasneje. Okolica radijske postaje ni povsem prazna. Odboj uhajanja lokalnega oscilatorja od dežnih kapljic se z Dopplerjevim pomikom vrača v sprejemno anteno.

2. FMCW radar

Radar potrebuje signal določene pasovne širine za izbrano ločljivost: kratke impulze za pulzni radar, frekvenčni prelet za FMCW radar, psevdonaključni šum za šumni radar ipd. FMCW radar omogoča meritev majhnih razdalj z visoko ločljivostjo za ceno bolj zahtevne obdelave v elektroniki.



Slika 2. Letalski višinomer kot zgled FMCW radarja.

Najbolj znana uporaba FMCW radarja je letalski višinomer (Slika 2). FMCW radar večinoma zahteva ločeni anteni za oddajo in sprejem za dušenje škodljivega presluha med njima. Vremenski radar zahteva nastavljanje po dveh oseh: azimutu in elevaciji. V prvem poskusu sta bila uporabljena dva piramidna

lijaka (~23dBi), ki omogočata nizek presluh med oddajo in sprejemom (Slika 3).



Slika 3. Piramidna lijaka za pas 3cm na ročnem podstavku.

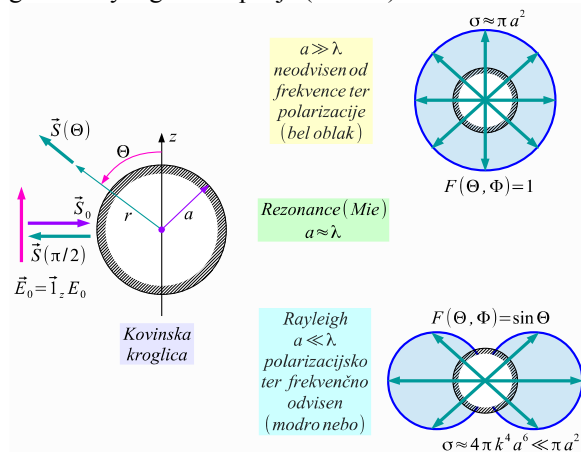
Dokončna izvedba vremenskega radarja uporablja dve parabolični zrcali premera 90cm (~37dBi ločljivosti ~1.5°) na motornem vrtiljaku KR5600 (Slika 4).



Slika 4. Parabolični zrcali TX/RX na vrtiljaku AZ/EL.

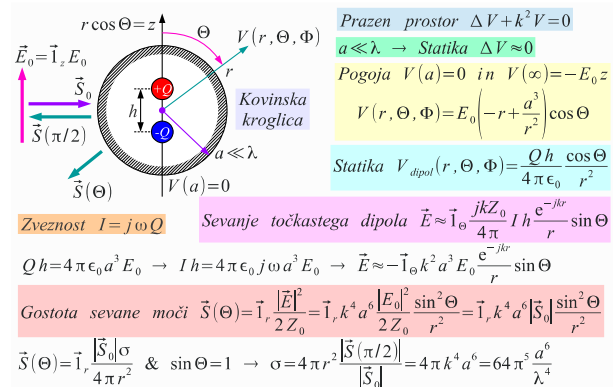
3. Odboj od padavin

Odboj valovanja od padavin je odvisen od njihove velikosti, dielektričnosti in valovne dolžine opazovanja. Dežne kapljice so dosti manjše od radijskih valov, torej gre za Rayleighjevo sipanje (Slika 5).



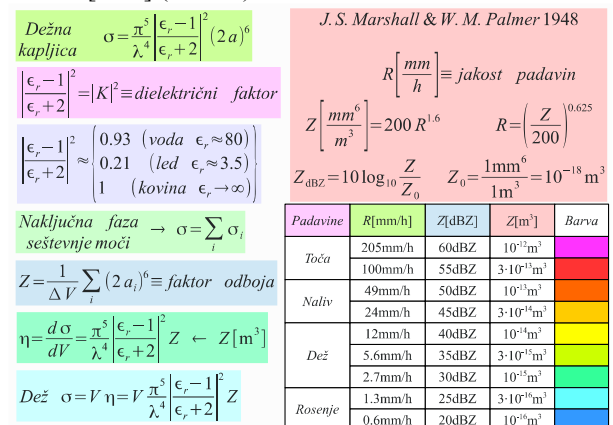
Slika 5. Odboj valovanja od padavin.

Rayleighjevo sipanje je močno odvisno od frekvence in polarizacije valovanja (Slika 6).



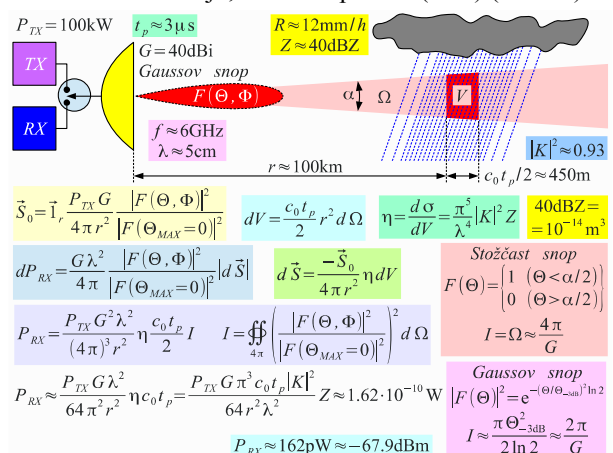
Slika 6. Rayleighjevo sipanje majhne kovinske kroglice.

Odboj od padavin je še slabotnejši, ker padavine niso kovinske, pač pa iz tekoče vode oziroma ledu. Ker imajo odboji od posameznih kapljic naključno fazo, seštevajo moči posameznih odbojev. Enačba Marshall-Palmer povezuje jakost padavin [v mm/h] in faktor odboja Z. Slednji se pogosto navaja v logaritmskih merskih enotah [dBZ] (Slika 7).



Slika 7. Rayleighjevo sipanje padavin.

Jakost signalov za zmerne padavine 40dBZ v običajnem vremenskem radarju, ki dela v pasu C (5cm) (Slika 8).



Slika 8. Jakost signalov zmernih padavin v pulznem radarju.

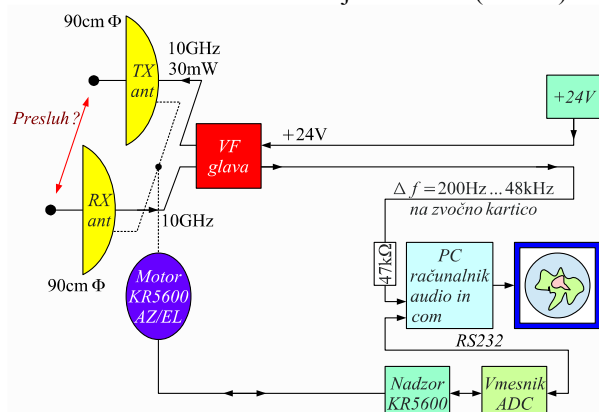
Vremenski radar v nosu letala sicer dela v pasu X (3cm), kar daje 11 dB močnejši odboj ampak krajši domet zaradi večjega slabljenja istih padavin. Frekvenčni pas vremenskega radarja torej ni poljuben. Valovne dolžine večje od 5 cm dajejo slaboten odboj od padavin.

Valovne dolžine manjše od 3 cm dajejo večje slabljenje istih padavin.

Vremenski radar, ki ni nameščen na razgledni točki na vrhu hriba, ima obzorje omejeno na ~30 km z višino padavin. Uporaba frekvenčnega pasu X (3 cm) je za takšen radar povsem smiselna. Z opisanimi antenama premera 90 cm FMCW radar dosega smiselni domet ~30 km za tarčo ~20 dBZ z oddajnikom moči komaj ~30 mW.

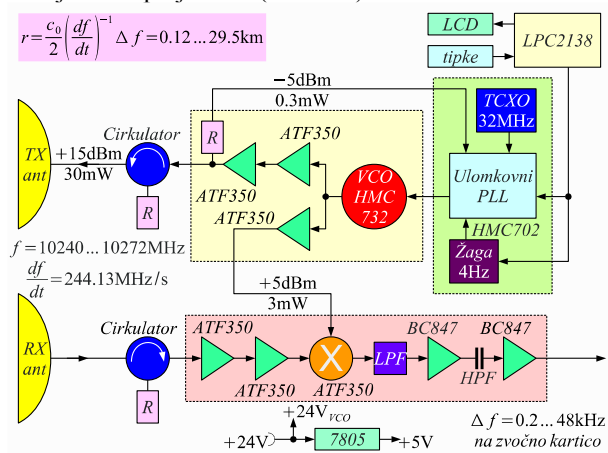
4. Izvedba vremenskega radarja

Vremenski radar FMCW vsebuje dve enoti (Slika 9).



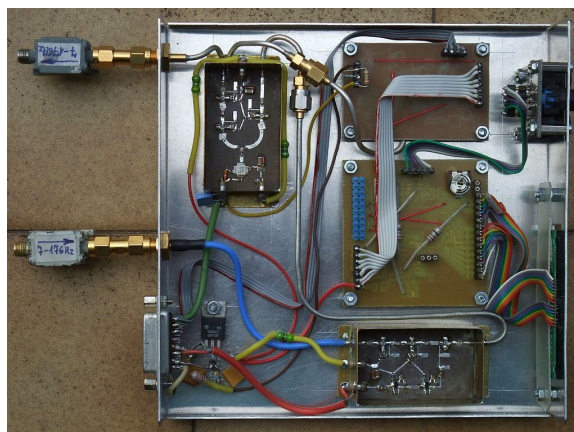
Slika 9. Zasnova vremenskega radarja FMCW.

Zunanja enota vsebuje ločeni oddajno in sprejemno anteno, vrtiljak AZ/EL KR5600 in visokofrekvenčno elektroniko. Notranja enota vsebuje osebni računalnik s pripadajočo programsko opremo, ki krmili vrtiljak KR5600 preko vmesnika COM in prejme izmerjene podatke kot nizkofrekvenčni signal 0.2...48kHz skozi zvočno kartico. Visokofrekvenčna glava vsebuje radijski oddajnik in sprejemnik (Slika 10).



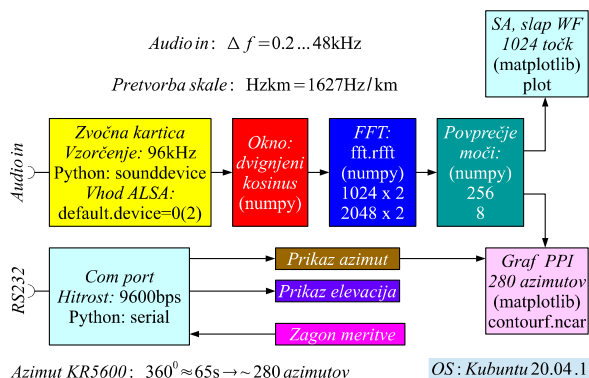
Slika 10. Visokofrekvenčna glava radarja FMCW.

Frekvenčni prelet oddajnika nadzira ulomkovni PLL. Presluh med oddajno in sprejemno anteno omejuje visokoprepustno sito v nizkofrekvenčnem ojačevalniku, ki hkrati izravnava občutljivost sprejemnika za različne oddaljene tarče. Učinek odbojev na vodih do obeh anten omejujeta dva zunanja cirkulatorja (Slika 11).



Slika 11. Izvedba visokofrekvenčne glave.

Notranja enota poskrbi za prikaz sprejetih odmevov na različne načine (Slika 12) s programsko opremo, napisano v programskem jeziku python s funkcijami družin numpy in matplotlib.



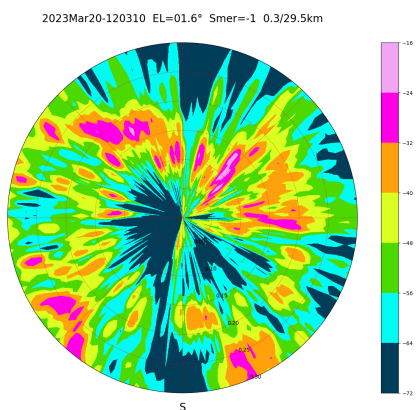
Slika 12. Obdelava signalov v notranji enoti.

Preprost nizkofrekvenčni spektralni analizator (SA) prikaže jakost odmeva kot funkcijo razdalje pri mirujočih antenah. Časovni slap (waterfall WF) prikaže spreminjanje sprejetih odmevov kot funkcijo časa. Plan-position indicator PPI ob sukanju anten prikaže jakost odmevov kot funkcijo razdalje in smeri (azimuta). Vrtiljak KR5600 pri tem določata trajanje enega polnega zasuka anten 360° po azimutu okoli 65 sekund brez vmesnega ustavljanja.

5. Mirujoče tarče na tleh

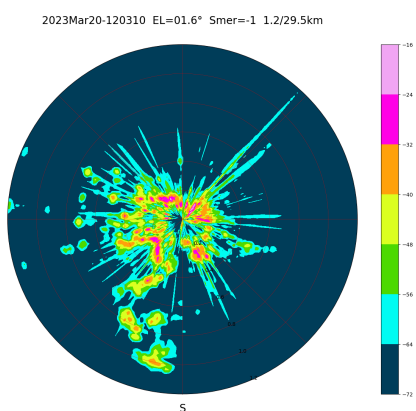
Odboji od mirujočih tarč v okolici so najbolj vidni na grafu PPI. Odmev od istih mirujočih, dobro znanih tarč je navsezadnje smiselno izmeriti za slabljenje padavin na poti do tarče in nazaj.

Čeprav radar vsakokrat meri vse tarče v območju od 0 do 29.5 km, PPI izriše odboje od nič do izbranega dometa. V območju od 0 do 300 m in nizki elevaciji anten so vidne številne hiše naselja v neposredni okolici anten (Slika 13).



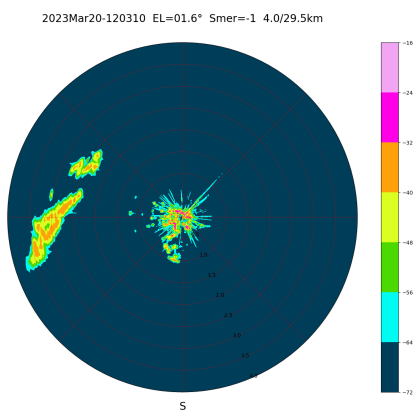
Slika 13. PPI vidnih tarč do oddaljenosti 300m.

Do nekoliko večje razdalje 1200m so vidne le večje oziroma višje zgradbe (Slika 14).



Slika 14. PPI vidnih tarč do oddaljenosti 1200m.

Do večje razdalje 4km so že vidni hribi v okolici, predvsem Kalvarija (Slika 15).



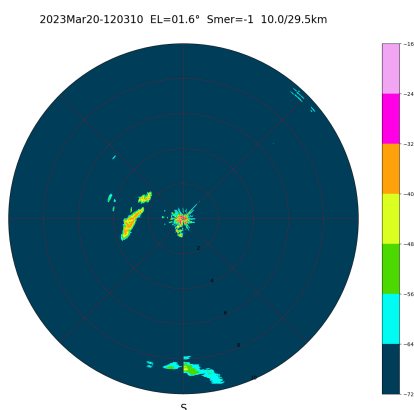
Slika 15. PPI vidnih tarč do oddaljenosti 4km.

Izmerjeni položaj mirujočih tarč ustreza zemljevidu Gorice (Slika 16).



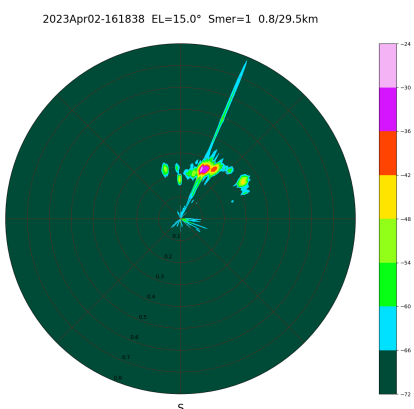
Slika 16. Zemljevid vidnih tarč v okolici.

Na še večji razdalji do 10km je vidno na jugu tudi Cerje (Slika 17).



Slika 17. PPI vidnih tarč do oddaljenosti 10km.

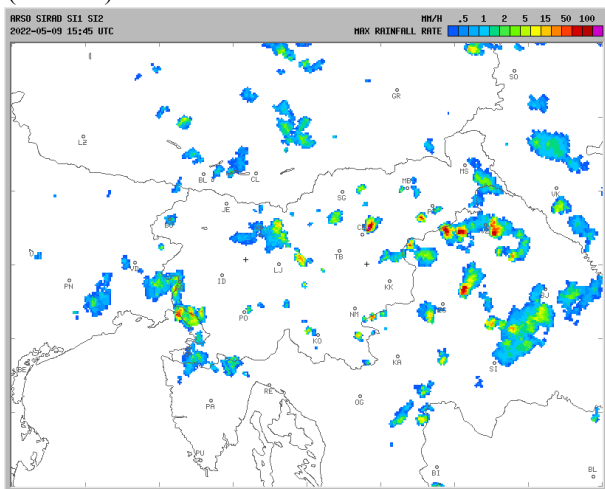
Na dani lokaciji ima radar dober pogled proti jugu in proti zahodu-severozahodu. Pri elevaciji anten 15° je v odsotnosti padavin še vedno dobro viden samostan (zvonik) v smeri sever-severovzhod (Slika 18).



Slika 18. PPI pri elevaciji 15° do oddaljenosti 800m.

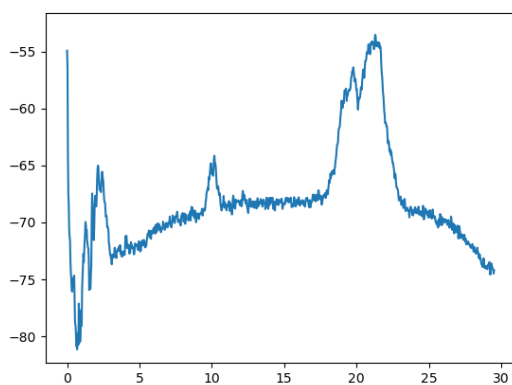
6. Opazovanje vremenskih pojavov

Radar ARSO je pokazal dež južno od Nove Gorice (Slika 19).



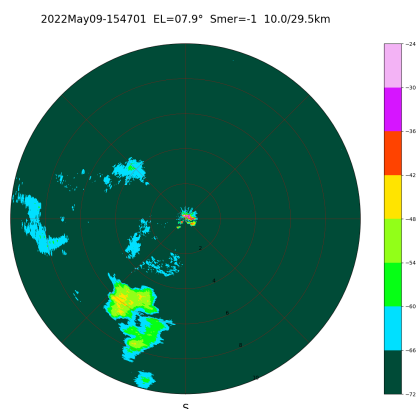
Slika 19. Slika padavin radarja ARSO.

Osnoven odboj od padavin je razviden že v frekvenčnem spektru radara FMCW (slika 20).



Slika 20. Frekvenčni spekter (SA) odboja od padavin.

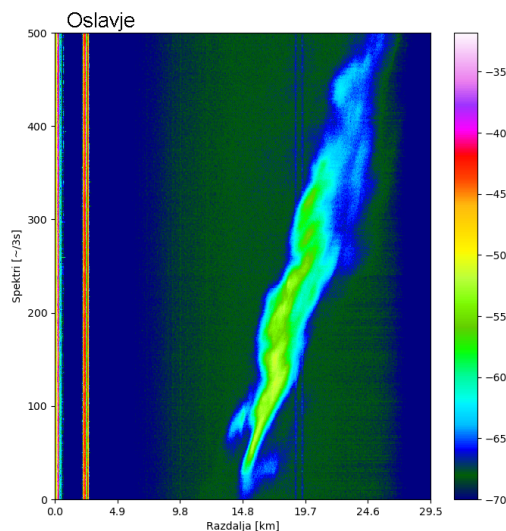
Padavine kaže tudi PPI v krogu 10km pri elevaciji skoraj 8° v izogibanju odbojem od hribov (Slika 21).



Slika 21. PPI polmera 10km istih padavin.

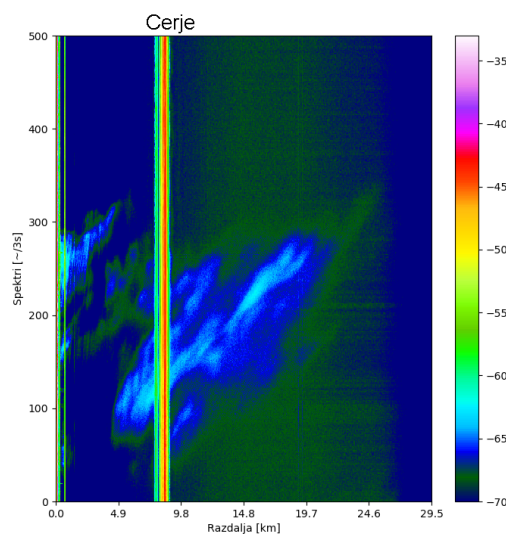
Časovni razvoj padavin lepo pokaže slap WF, ki doda novo izmerjeno vrstico vsake 3 sekund oziroma potrebuje dobre pol ure za celo sliko.

Primer časovnega razvoja padavin je skupaj s stalnim odbojem od Oslavja prikazan na Sliki 22.



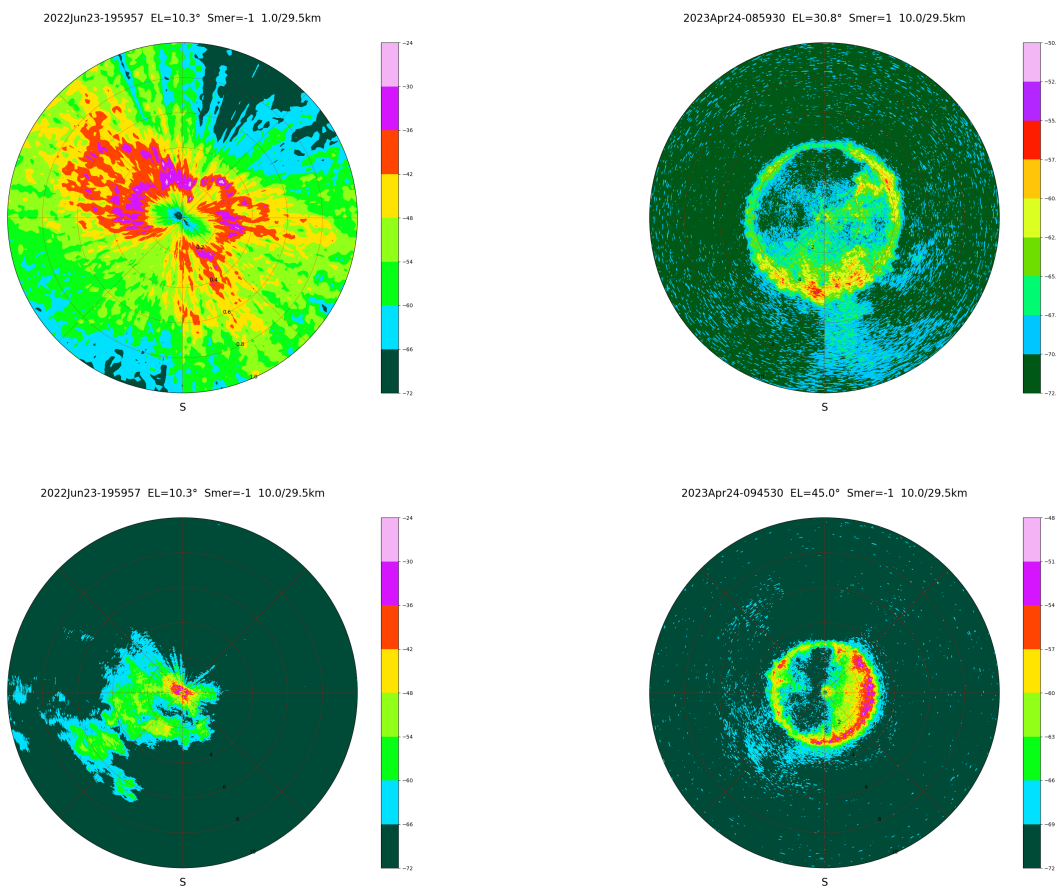
Slika 22. Razvoj padavin v smeri severozahod.

Podobno se vidi v smeri jug razvoj padavin skupaj s stalnim odbojem od Cerja (Slika 23).



Slika 23. Razvoj padavin v smeri jug.

Končno PPI padavin naravnost nad radarjem v krogu 1 km (Slika 24) oziroma 10 km (Slika 25).

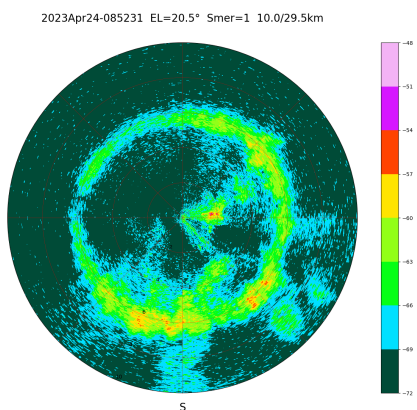


Sliki 24/25. Padavine točno nad radarjem 1 km/10 km.

Sliki 27/28. Taljenje snežink pri 30° in 45°.

7. Taljenje snežink

Vremenski radar opazi še druge naravne pojave, ki niso enostavno razložljivi. Na dan poskusa je bilo nebo v celoti prekrito. Na vseh treh slikah 26, 27 in 28 pri elevacijah 20°, 30° in 45° se pojavijo kolobarji na višini slabe 3 km, kjer se snežinke (velika površina ampak majhna dielektričnost) začnejo taliti v kapljice dežja (dosti manjša površina a velika dielektričnost). Zmes ledu in tekoče vode ima hkrati veliko površino snežink in visoko dielektričnost tekoče vode.

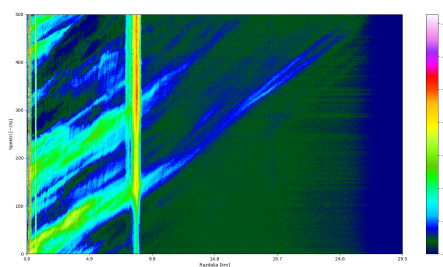


Slika 26. Taljenje snežink pri 20°.

8. Meritev slabljenja padavin

Na znanem odboju mirujoče tarče na tleh je meritev slabljenja padavin med radarjem in tarčo silno preprosta. Glede na prikazano decibelsko skalo je slabljenje v eno samo smer v resnici dvakratno v smeri do tarče in v smeri nazaj k radarju. Ozračje sestavljajo samo recipročne snovi. Slabljenja padavin za tarčo seveda ne moremo meriti.

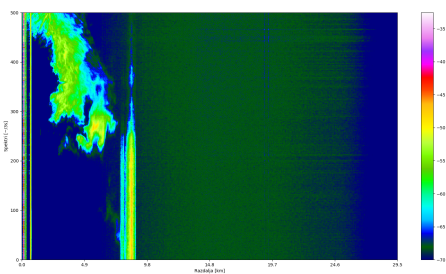
Ob začetku dežja med radarjem in fiksno tarčo začne odboj slabeti. Iz barvne lestvice ob robu lahko razberemo, koliko decibelov slabljenja prinesejo padavine v določenem trenutku (Slika 29).



Slika 29. Naraščanje slabljenja ob začetku dežja.

Slabljenje padavin lahko v frekvenčnem pasu X naraste do te mere, da odboj od fiksne tarče ni več viden.

Obratno začne jakost odboja naraščati ob koncu dežja. Ko dež izgine, se jakost odboja povrne na začetno vrednost (Slika 30).

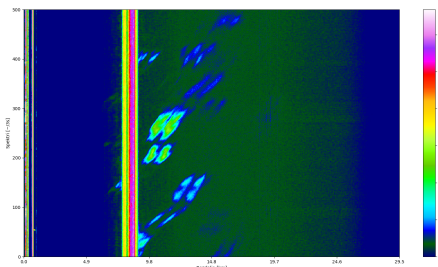


Slika 30. Upadanje slabljenja ob koncu dežja.

Opisana meritev presiha zahteva dostop z zahtevno merilno opremo na enem samem koncu merjene zveze. Na drugem koncu merjene zveze se lahko nahaja priročna (nesodelujoča) tarča.

Opisana meritev radijske zveze je v marsičem podobna meritvam z OTDR po svetlobnih vlaknih. V obeh primerih zahtevamo dostop z merilnimi inštrumenti do enega samega konca zveze in izkoriščamo priročne odboje, kar vse pocenjuje izvedbo meritev. Še več, ker radar FMCW uporablja nizke moči, lahko v ta namen izkoristimo kar isto radijsko postajo za podatkovni promet.

Slabljenja padavin za priročno tarčo sicer ne moremo meriti, pač pa lahko tam samo opazujemo padavine. Hitro premikanje v radialni smeri s hitrostjo več deset m/s podvoji sliko istega oblaka (Slika 31) zaradi izkoriščanja frekvenčnega preleta radarja FMCW v obeh smereh.



Slika 31. Dvojna slika istih oblakov.

9. literatura

Celoten opis vremenskega radarja FMCW je objavljen na spletni strani:

<https://lea.hamradio.si/~s53mv/wxradar/radar.html>

Corner Radar (CR) requires larger aperture angles of over 150 degrees at ranges of 100 to 150 m. The effectiveness of the digital signal processing plays a crucial role in determining the range. This determination is influenced by the reflectivity of the target for 77 GHz signals (Radar Cross-Section, RCS) and the RF performance of the transceiver. Weakly reflective targets such as pedestrians pose a greater challenge for the sensors than strong reflectors like cars and trucks. Therefore, a good signal-to-noise ratio is important for both sensor types for reliably separating strong and weak signals. Digital signal processing and object tracking are important functions that are carried out on the microcontroller integrated in the sensor before the data is output via a network interface, typically CAN for low data rates (object data), or 100 Mbit/s or 1 Gbit/s Ethernet (pointcloud data), Figure 2.



Figure 2. "CARKIT" Radar sensor demonstrator in the housing 50x50x30mm

3. Radar sensor implementations

The operating principle of automotive radar is mainly based on Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW). Pulse modulation, as used in aerospace and defense applications, cannot be implemented as cost- and power-efficiently as FMCW.

Other potential modulation schemes including Orthogonal Frequency-Division Multiplex (OFDM) and Phase Modulated Continuous Wave (PMCW), sometimes referred to as "digital radar", are emerging, but could not yet prove themselves as "sweet spots" between performance, cost/complexity (silicon area), power consumption and RF band coexistence [1].

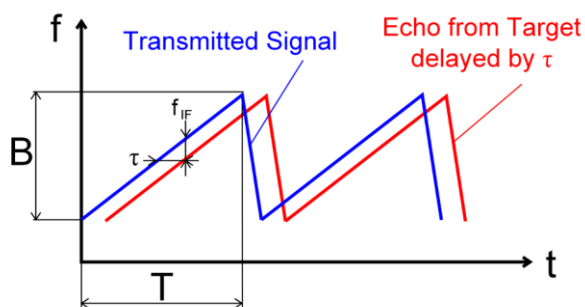


Figure 3. FMCW modulation scheme (in "chirps") results in distance-dependent frequency difference between TX and reflected RX signal

A sawtooth FM-modulated microwave signal at e.g. 77GHz (figure 3) is transmitted from the sensor to the target, reflected and then after Round-Trip-Time ($\text{RTT}=\tau$) received at the RX. Simple mixing of the two signals results in an Intermediate Frequency (IF) signal, which frequency f_{IF} is directly proportional to the FM slope ($B/T=10\ldots200 \text{ MHz}/\mu\text{s}$) and the RTT, thus distance d to the target. Typically, B is between few 100s MHz for long-range applications and up to 4 GHz for short range applications.

The resulting IF signal is typically in the range $0\ldots20 \text{ MHz}$ and contains the (a) target distance in its frequency and (b) target velocity in its phase variation over time (Doppler effect). When several TX and RX antennas are simultaneously operated in MIMO mode and separated by distances comparable to wavelength λ ($\sim 3.9 \text{ mm}$ for 77GHz), then even *Direction of Arrival (DoA)* of the reflected signal (=target lateral position) can be calculated from the relative phase differences between the signals from different antennas.

A radar sensor can be referred to as 4D radar as it simultaneously determines distance, velocity, horizontal and vertical relative position of the target in all dimensions. The range resolution is also determined by the bandwidth of the frequency ramp. To increase the angular resolution of the sensor, the antenna arrangements with multiple transmitter antennas require the individual transmitter signals to be separated/recognized for each receiver channel.

Obviously, precise frequency and phase measurements of the IF signal are operations on signal spectrum. This is why all modern radar systems digitize the IF signal with an ADC and apply FFT to transform the IF signal to frequency+phase information for further pure numerical digital signal processing.

To evaluate the range information, the real ADC time-domain samples from the chirps are first transformed with (range) FFT to a complex representation (amplitude+phase) in the frequency domain. The peaks in the amplitude spectrum reveal potential targets and must be reliably isolated from the noise floor. To evaluate the velocity of a moving target, many such chirps (512-2048) have to be repeated, then the phase value in a spectrum peak across this block of chirps has to be transformed with (Doppler) FFT and evaluated – constant phase (DC) means no relative velocity difference between the ego car and the target; any other phase change rate is directly proportional to the relative velocity and can be (a) negative for approaching targets or (b) positive for departing targets. To calculate the DoA, again FFT can be applied over the simultaneously taken samples from different RX channels – here some additional decoding will be needed in case also TX channels are phase-coded (like in Doppler-Division-Multiplex DDM scheme) to achieve full Multiple Input Multiple Output (MIMO) performance over many TX and RX channels. The size of the array (=antenna aperture) determines the theoretical resolution capability, however the number of TX and RX antennas in the array the really usable separability of the targets. Sensors can have from 4 to 32

TX and from 4 to 32 RX antennas in different horizontal and vertical arrangements, depending on the sensor specification and use cases.

All this computation is done in specialized FFT co-processors, often including other accelerating DSP features such as fast scaling, fast matrix operations, data compression etc. required for power-efficient Radar Signal Processing (RSP). Once point cloud is calculated, the individual detections are clustered and then classified as geometries and objects (pedestrian, bicycle, car, truck...) and then reported in real-time as object lists with exact positions, sizes, velocity vectors and some signal confidence estimations over network interface to the central ADAS ECU making driving decisions, Figure 4.

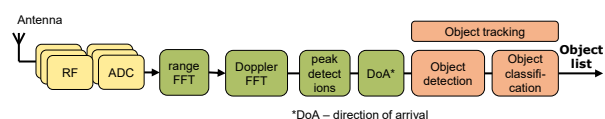


Figure 4. Analog and digital radar signal processing chain in automotive radar sensor

RSP can be implemented in the sensor ("edge" processing) or, newly, in the central ADAS Electronic Control Unit (ECU) or even in a High-Performance Computer (HPC) such as NVIDIA Drive Platform, Qualcomm Ride etc. Very recently, machine learning (ML) has found its way also into the RSP, specifically boosted by the large compute cores in the SoCs specialized for real-time inference of Neural Networks (NNs).

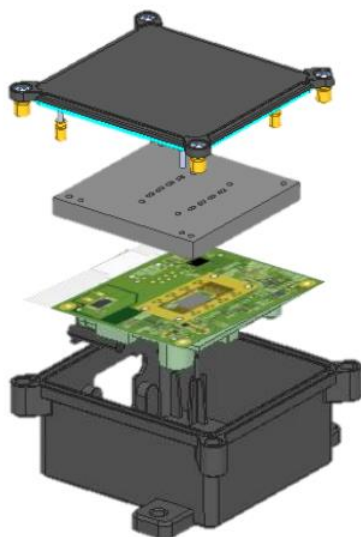


Figure 5. Sensor components: radome, waveguide antenna, PCB, housing

Physically, such a sensor is enclosed in a housing containing all electronics on a single FR4 PCB, figure 5. Antenna technology changed in the last few years – instead of PCB patch antenna, modern sensors use waveguide (WGD) antenna, providing a flat and reproducible radiation patterns over large frequency bandwidth and directly connecting waveguide-based

antenna elements to antenna feeds (radiators) on the MMIC package – resulting in 2..3 dB lower RF signal budget losses (directly increasing SNR and range) and eliminating need for expensive RF laminate materials for PCB. Such antennas can be made with plastic injection molding and metallization in high volume at low cost and required automotive quality.

The RF heart of the sensor is a multichannel RF transceiver (TRX) subsystem, today 100% integrated on a single CMOS die, in smaller sensors even together with microcontroller and signal processing accelerator + memory, figure 6.

TRX contains in its heart a high-quality Phase Locked Loop (PLL) -based Local Oscillator (LO), with very strong phase noise requirements (better than -100 dBc/Hz), ability to be highly linear FM-modulated with huge bandwidths and steep slopes providing extremely short flyback times. Fully digital PLL (DPLL) is state-of-the-art answer to such challenges [2].

PLL output drives a bank of phase shifters, one per each TX channel, which enables fine-tuned chirp-to-chirp phase modulation of each TX channel to implement TX channel phase coding. Finally, each TX channel ends with a highly power-efficient Power Amplifier (PA) directly driving Antenna Feed in Package (AFiP) port.

On the RX side there is a *homodyne zero-IF receiver*, mixing incoming reflected (and delayed by RTT) signal with the same LO signal used for transmission. Homodyne receiver provides the phase coherency property between the LO and input signal needed for velocity estimation and additional advantage of *correlated phase noise* partially cancelling in the mixer for closer targets. As in almost any other RF application, the RX chain must provide low noise figure (NF) affecting range and sensitivity for weak targets combined with excellent dynamic range to enable detection of weak targets (e.g. pedestrian) in the presence of the much stronger targets (e.g. next to a truck).

A bank of ADCs converts all RX channels in parallel, then typically decimation and sample rate conversion is done before transmission over high-speed digital interfaces (1-5 Gbit/s) such as CSI-2 or LVDS to external compute unit or data serializers for connection to central ECU. In digital core there is also a control unit, often microcontroller-based managing the timing and configuration of all blocks, providing monitoring features and implementing safety functions required by the ISO26262 automotive safety standard.

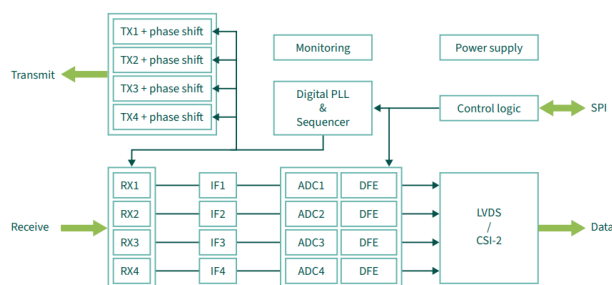


Figure 6. Block diagram of a 4 TX + 4 RX FMCW radar transceiver

4. Conclusion

ADAS systems are entering all classes of vehicles and are not constrained any more to premium cars only. Due to technological advancements in microelectronics and economy of scale it is possible to implement affordable radar sensors (despite high internal technical complexity) even for entry level cars. Together with vision systems, radar can provide reliable distance detections independently of illumination and other visibility constraining factors such as low sun, fog or heavy rain.

Radar sensors advance in RF performance and in the number of RX and TX channels, improving resolution from 10° (for 4x4 systems) down to 1° (for 16x16 systems) and beyond. Advanced signal processing, specifically provided on modern System-on-Chip (SoC) platforms with overwhelming processing power and virtually unlimited high-speed memory will bring next generation radar close to LIDAR, but at the fraction of its costs, providing higher mechanical robustness (since true-solid-state) and delivering higher sensing fidelity.

Additionally, recent advances of Machine Learning for radar will be soon applied to RSP and, as happened to computer vision 10 years ago, massively improve the confusion matrix performance (reduce the false positives) and sensor fusion between camera and radar.

5. References

- [1] C. Knill, B. Schweizer, S. Stephany, D. Werbunat, C. Waldschmidt, *FMCW-Interference of Frequency Agile OFDM Radars*, EuRAD 2020
- [2] “Infineon's new radar MMIC RASIC™ CTRX8191F enables the next generation of 4D and HD imaging radars”, <https://www.infineon.com/market-news/2024/infatv202412-035>

About author



Dr. Vjekoslav Matić is Senior Director of Technical Marketing for ADAS Radar at Infineon Technologies Austria AG. He has been heading an engineering team responsible for system & MMIC product definition and customer design-in support for radar in automotive applications, including signal processing and software development since 2012. Before that he was head of application engineering for Tire Pressure Monitoring Systems and Wireless Control product lines and program manager for automotive Remote Keyless Entry RF-CMOS transmitters, receivers, and transceivers for seven years. Before that he worked as digital designer for Dialog Semiconductor, as researcher at Joanneum Research in Graz and university assistant at the University of Zagreb. Dr Matic is a member of IEEE and holds an MS degree in electrical engineering from the University of Zagreb, Croatia, and a PhD from Graz University of Technology, Austria.

Videti nevidno: Koherentni porazdeljeni radarji za zaznavanje objektov z nizko odmevno površino

Luka Podbregar

Laboratorij za sevanje in optiko, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko

luka.podbregar@fe.uni-lj.si

Seeing the invisible: Coherent distributed radar systems for detecting objects with low radar cross section

Abstract. Modern autonomous systems rely heavily on radar technology, yet detecting objects with a low Radar Cross Section (RCS) remains a significant challenge. This paper explores the evolution of radar architectures from standard monostatic units to advanced distributed Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) radar systems. We provide a comparative analysis of non-coherent, quasi-coherent, and fully coherent approaches, demonstrating how coherent processing significantly enhances spatial and angular resolution and detection capabilities. However, implementing these systems in dynamic environments is hindered by environmental factors such as mechanical vibrations and temperature fluctuations. The paper concludes that realizing the full potential of distributed radar requires the development of robust, dynamic phase compensation methods to ensure stability in real-world applications.

1. Uvod

Radarski sistemi so danes nepogrešljiv vir informacij na številnih področjih, od vojaške in letalske industrije do avtonomne vožnje in asistenčnih storitev. Njihova ključna prednost pred optičnimi sistemi (kot so kamere in lidarji) je delovanje v vseh vremenskih razmerah. Vendar pa se s tehnološkim napredkom povečujejo tudi zahteve po zaznavanju objektov z nizko radarsko odmevno površino, kot so majhni in počasni brezpilotni letalniki ali vitki parkirni stebrički [1].

Da bi razumeli, kako lahko "vidimo nevidno", je treba razumeti evolucijo radarskih sistemov od preprostih monostatičnih do naprednih koherentnih porazdeljenih sistemov z več vhodi in več izhodi (MIMO).

2. Tipi radarskih sistemov

a) Monostatični radar

Tradicionalni pristop k daljinskem zaznavanju predstavlja monostatični radar. Pri takšnem sistemu sta oddajnik in sprejemnik nameščena na istem mestu, pogosto uporabljata tudi eno samo anteno. Čeprav so ti sistemi robustni in enostavni za implementacijo, imajo fizikalno omejitve pri zaznavanju objektov z nizko

odmevno površino. Če tarča odbije radarski signal v smer stran od vira (zaradi svoje oblike ali materiala), monostatični radar ne prejme povratnega signala in objekt ostane "neviden". Zmogljivost teh radarjev temelji predvsem na ločljivosti posamezne enote, ki pa je omejena z velikostjo antene.

b) Bistatični/multistatični radar

Naslednji korak v razvoju je ločitev oddajnika in sprejemnika. Govorimo o bistatičnih (en oddajnik, en ločen sprejemnik) ali multistatičnih sistemih (več prostorsko ločenih enot). Prostorska porazdeljenost radarskih enot omogoča zaznavanje tarč z več zornih kotov. To je ključnega pomena pri objektih z majhno radarsko odmevno površino, saj poveča verjetnost, da bo vsaj en sprejemnik zaznal odbiti signal. S tem premagamo omejitve geometrije tarče, ki bi sicer preusmerila signal stran od monostatičnega radarja, in povečamo verjetnost zaznave tarč.

c) Radarski sistem z več vhodi in več izhodi

Za izboljšanje kotne razločljivosti brez fizičnega povečevanja anten so bili razviti radarski sistemi z več vhodi in več izhodi. Ti sistemi uporabljajo več oddajnih in več sprejemnih anten znotraj ene enote. Vse sprejemne antene lahko sprejmejo odbit signal, ki je bil poslan iz katerekoli oddajne antene. Z uporabo ortogonalnih oddajnih signalov lahko MIMO radarski sistem nato loči od katere oddajne antene je bil oddan signal in posledično določi lokacijo tarče. S takim pristopom umetno povečamo odprtino radarskega sistema brez spreminjanja fizičnih dimenzij antene. To drastično izboljša kotno razločljivost in omogoča natančnejše določanje položaja objektov [2].

d) Porazdeljeni radarski sistem z več vhodi in več izhodi

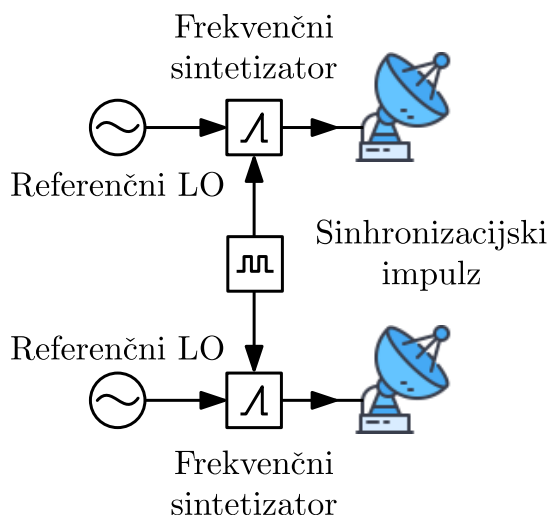
Za zagotavljanje celovite in natančne zaznave se v sodobna vozila vgrajuje vedno več radarskih enot z namenom doseganja 360° prostorske zaznave. Takšna porazdelitev je nujna, saj so prostorska razločljivost, domet in smernost antenskih snopov med seboj izključujoče se spremenljivke. Zato vsaka posamezna enota pokriva svoj sektor. V večini sodobnih radarskih sistemih te enote delujejo in obdelujejo podatke avtonomno. Rezultati obdelanih podatkov pa se združijo šele na koncu v centralni enoti. Ta pristop sicer izboljša zanesljivost in pokritost, vendar ne izkoristi fizikalnega potenciala, ki ga ponuja prostorska porazdeljenost radarskih enot.

Vrhunec trenutnega razvoja zato predstavljajo porazdeljeni sistemi s koherentno obdelavo podatkov [3]. Za razliko od preprostega združevanja že obdelanih podatkov koherentna obdelava zahteva centralizirano in sočasno obdelavo vseh sprejetih signalov. S tem sistem deluje kot en sam velik radarski sistem, kar omogoča izjemno natančno prostorsko in kotno razločevanje lokacije tarč ter detekcijo tarč z izjemno nizko odmevno površino. Vendar pa ta preskok narekuje izjemno kompleksno časovno, frekvenčno in fazno usklajitev oziroma sinhronizacijo posameznih enot radarskega sistema. Glede na pristop k reševanju tega problema in stopnjo doseženega nivoja sinhronizacije lahko sisteme razvrščamo v tri različne razrede [4].

3. Koherentni radarski sistemi

Osnovni nivo predstavljajo **nekoherentni radarski sistemi**. Pri tej zasnovi vsaka radarska enota deluje kot avtonomna naprava, ki s centralnim računalnikom deli le končne, že obdelane podatke o zaznanih tarčah, zato fazna sinhronizacija ni potrebna. Sistem je zaradi tega izjemno robusten, cenovno ugoden in odporen na okvare posameznih enot, saj izpad ene enote ne vpliva na delovanje ostalih. Vendar pa ta preprostost prinaša znatne omejitve pri zmogljivosti. Prostorska razločljivost je omejena na fizikalne zmožnosti posameznega senzorja. Prav tako ni prisotnega koherentnega ojačanja signala, kar pomeni, da objekti z nizko odmevno površino pogosto ostanejo nezaznani.

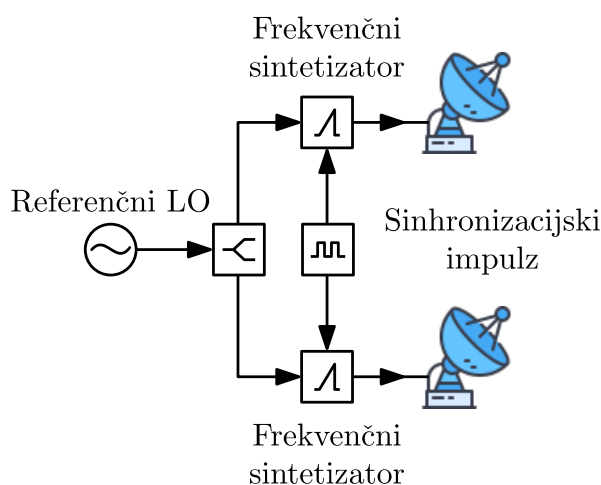
Slika 1 prikazuje blokovni načrt nekoherentnega radarskega sistema. Vsak radarski modul generira radarski signal z uporabo svojega referenčnega LO in svojega frekvenčnega sintetizatorja, ki je običajno izveden s fazno sklenjeno zanko ali kakšno podobno tehniko, kot je na primer neposredna digitalna sinteza. Slednji so lahko med seboj sinhronizirani s sinhronizacijskim impulzom.



Slika 1. Blokovni načrt nekoherentnega radarskega sistema.

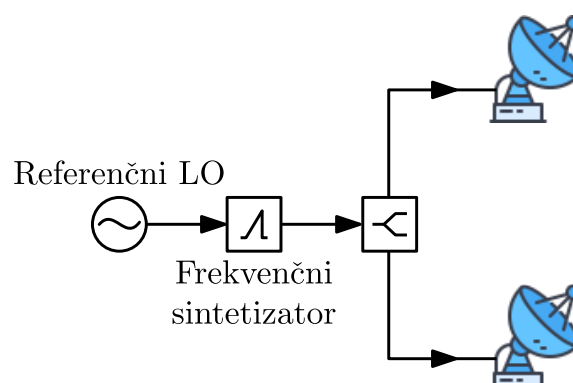
Kot tehnološki most med preprostostjo in visoko zmogljivostjo so se razvili **kvazi-koherentni radarski sistemi**, ki jih prikazuje Slika 2. Ta pristop predstavlja odgovor na fizikalne omejitve pri prenosu visokofrekvenčnih signalov. Namesto tega vsaka enota

generira svoj visokofrekvenčni radarski signal neodvisno s svojim frekvenčnim sintetizatorjem. Kvazi-koherentna sinhronizacija je dosežena preko porazdeljene nizkofrekvenčne referenčne ure LO (navadno do nekaj 100 MHz) in sinhronizacijskega impulza, ki je skupen vsem enotam. S tem se odpravi potreba po dragih visokofrekvenčnih kablji ali kompleksnih optičnih povezavah. Sistem tako postane mehansko bistveno bolj odporen na okoljske spremembe in je primeren za integracijo v dinamična okolja, kot so vozila. Pri tem pristopu se kompleksnost delno prenese na digitalno obdelavo signalov, saj so potrebni napredni algoritmi za kompenzacijo manjših frekvenčnih in faznih zdrsov v prenosu referenčne ure ter natančna začetna kalibracija.



Slika 2. Blokovni načrt kvazi-koherentnega radarskega sistema.

Na teoretičnem vrhu zmogljivosti se nahajajo popolnoma **koherentni radarski sistemi**. Njihova arhitektura temelji na fizični povezavi vseh radarskih enot s skupnim frekvenčnim sintetizatorjem, ki zagotavlja skupni visokofrekvenčni radarski signal (npr. 77 GHz). Takšna konfiguracija omogoča združevanje signalov na nivoju surovih meritev. Blokovna shema koherentnega radarskega sistema je prikazana na Sliki 3.



Slika 3. Blokovni načrt koherentnega radarskega sistema.

Ključna prednost tega pristopa je v tem, da se fazno usklajeni signali, odbiti od tarče, seštevajo, kar drastično poveča razmerje med signalom in šumom (SNR). To omogoča detekcijo objektov z izjemno nizko odmevno površino, ki bi jih nekoherentni radarski sistemi zgrešili.

Kljub vrhunskim rezultatom pa je praktična uporaba omejena zaradi občutljivosti prenosnega medija. Prenos signalov visokih frekvenc po koaksialnih kabljih je namreč izjemno dovzeten za okoljske vplive, kjer že zelo majhna temperaturna raztezanja ali vibracije porušijo fazno koherenco in degradirajo radarske meritve.

4. Zaključek in izzivi prihodnosti

Kljub teoretičnim prednostim porazdeljenih sistemov se v praksi trenutno večinoma srečujemo z rešitvami, kjer so vsi radarski čipi nameščeni na istem tiskanem vezju z zelo majhnim medsebojnim razmikom [5]. Takšna "gručasta" postavitve sicer poenostavi sinhronizacijo, a ne omogoča tiste prostorske razločljivosti in raznolikosti kotov opazovanja, ki ju nudi prava prostorska porazdelitev.

Najnovejše raziskave se zato usmerjajo v razvoj naprednih metod za prenos fazno stabilnih visokofrekvenčnih signalov [6-8]. Glavni problem namreč predstavljajo dinamični okoljski dejavniki, kot so temperaturna nihanja in mehanske vibracije, ki v dinamičnem okolju nenehno spreminjajo fizikalne lastnosti prenosnih medijev in s tem rušijo fazno koherenco.

Rešitve prihodnosti zato vključujejo metode za aktivno ali pasivno prilagajanje faze, kjer sistem v realnem času meri zakasnitve v prenosnem mediju in dinamično kompenzira nastale napake. Le z implementacijo takšnih mehanizmov bo mogoče polni potencial koherentnih porazdeljenih radarjev prenesti iz laboratorijev v dinamična okolja kot so avtomobili.

5. Literatura

- [1] X. Wang, W. Zhai, X. Zhang, X. Wang and M. G. Amin, "Enhanced Automotive Sensing Assisted by Joint Communication and Cognitive Sparse MIMO Radar," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 59, no. 5, str. 4782-4799, Oktober 2023.
- [2] F. Wang, C. Zeng, H. Li and M. A. Govoni, "Detection Performance of Distributed MIMO Radar with Asynchronous Propagation and Timing/Phase Errors," 2020 IEEE International Radar Conference (RADAR), Washington, DC, USA, 2020.
- [3] S. Sun, A. P. Petropulu and H. V. Poor, "MIMO Radar for Advanced Driver-Assistance Systems and Autonomous Driving: Advantages and Challenges," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 37, no. 4, str. 98-117, Julij 2020.
- [4] A. Dürr, D. Böhm, D. Schwarz, S. Häfner, R. Thomä and C. Waldschmidt, "Coherent Measurements of a Multistatic MIMO Radar Network With Phase Noise Optimized Non-Coherent Signal Synthesis," IEEE Journal of Microwaves, vol. 2, no. 2, str. 239-252, April 2022.
- [5] Application note AWR2243 Cascade. <https://www.ti.com/lit/an/swra574b/swra574b.pdf?ts=1748099580819>
- [6] Y. Xu, L. Yang, J. Qiu and X. Jin, "Photonic Phase-Stabled Transmission of Broadband Signals Based on Passive Compensation," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 35, no. 6, str. 279-282, Marec 2023.
- [7] J. Tratnik, U. Dragonja and B. Batagelj, "Multi-purpose constant-delay optical link," 2014 European Frequency and Time Forum (EFTF), Neuchatel, Switzerland, str. 333-335, 2014.

- [8] K. Wang, W. Wei, D. Wang, P. Wang, W. Xie in Y. Dong, "Distributed receiving system with local digitization and combination for SNR enhancement," Opt. Express, vol. 31, str. 1014-1024, 2023.

O avtorju



Luka Podbregar je leta 2020 diplomiral iz elektrotehnike na Univerzi v Ljubljani, Fakulteti za elektrotehniko, kjer je leta 2023 tudi magistriral. Od leta 2023 je zaposlen kot mladi raziskovalec v Laboratoriju za sevanje in optiko, kjer se ukvarja z raziskavami sinhronizacijskih tehnik za porazdeljene radarske sisteme.

Njegova raziskovalna področja vključujejo daljinsko zaznavanje, sinhronizacijske metode porazdeljenih radarskih sistemov in mikrovalovno fotoniko.

Radijske komunikacije z zelo nizko zakasnitvijo

Primož Lemut, Jurij Tratnik, David Malovrh, Aleš Bardorfer

Instrumentation Technologies, d.o.o., Velika pot 22, 5250 Solkan, Slovenija

primoz.lemut@i-tech.si

Ultra-Low-Latency Radio Communications

Abstract. Mobile communication users primarily demand high bandwidth and place less emphasis on transmission latency. This approach is generally acceptable for most streaming applications. However, some users require extremely low latency, where even reductions of a few hundred nanoseconds are significant. Latency is minimized by optimizing radio path lengths, limiting signal regeneration only when necessary, and using low-latency electronic circuits. Despite high-performance analog-to-digital (ADC) and digital-to-analog (DAC) converters operating at gigahertz sampling rates and programmable FPGA devices running at several hundred megahertz, most latency still originates in the signal processing chain rather than in the radio link itself. Frequency converter selection, interconnection methods, and the architecture of digital signal processing (DSP) chains largely determine the overall system latency. Additional latency reductions can be achieved by directly converting signals from multi-gigahertz frequency ranges to baseband below 500 MHz within the ADC and DAC. To fully utilize the achieved low latency in the radio and modem sections of the devices, users connect to the devices via multiple parallel optical links, for example using QSFP-DD interfaces.

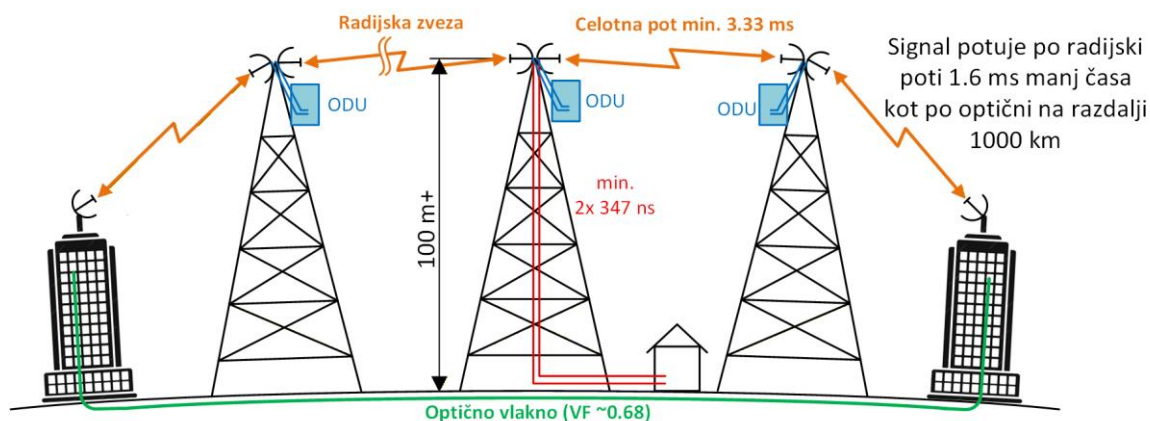
Uvod

Uporabniki radijskih in zlasti mobilnih komunikacij zahtevajo predvsem visoko pasovno širino in dajejo manj poudarka zakasnitvam pri prenosu podatkov. Tak pristop je povsem sprejemljiv za večino pretočnih vsebin. Zakasnitve v področju μ s do nekaj 10 ms so povsem sprejemljive in tudi upravljalci prenosnih omrežij nimajo velike motivacije za njihovo zmanjševanje. Še posebej, ker večji delež zakasnitev določa geografska oddaljenost in zmanjšanje zakasnitev v opremi ne prinese velike koristi. Zakasnitve obenem niso konstantne, saj so odvisne od trenutne poti, določene z usmerjanjem in od zasedenosti čakalnih vrst. Obstajajo pa uporabniki, ki potrebujejo tako konstantno kot čim nižjo zakasnitev.

1. Zakasnitev prenosne poti

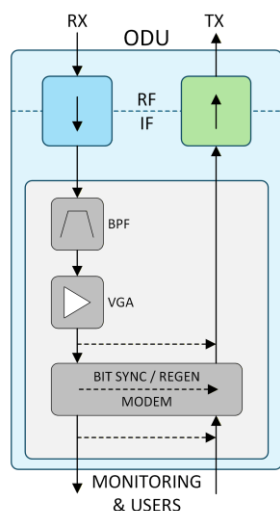
Takim uporabnikom je pomembno, da informacijo na določeni geografski razdalji prenesejo čim hitreje. Pri določenih aplikacijah šteje vsako zmanjšanje zakasnitev, pa čeprav le za nekaj 100 ns. Optično-vlakenska povezava v takšnih primerih ni najboljša izbira, saj hitrost potovanja svetlobe po vlaknu močno zaostaja v primerjavi z radijsko zvezo na enaki razdalji (Slika 1). Na primer, radijska pot je na razdalji 1000 km za okoli 1,6 ms hitrejša od enako dolgega optičnega vlakna.

Osnovna in očitna ukrepa za zmanjšanje zakasnitev pri radijskih povezavah sta skrajšanje



Slika 1. Radijska in optična pot

dolžine kabelskih povezav in uporaba kablov z visoko hitrostjo razširjanja, t.j. s pretežno zračnim dielektrikom in hitrostjo razširjanja najmanj 96 % svetlobne hitrosti. Prvi ukrep praktično pomeni, da je vsa potrebna komunikacijska elektronika nameščena na samem komunikacijskem stolpu, čim bližje antenam. Zato mora biti primerna tudi za delovanje v zahtevnejših klimatskih razmerah. Dodatni ukrep, ki korenito zmanjša zakasnitev, je izogibanje digitalni regeneraciji signala, dokler je to mogoče. Kvaliteto signala se sicer neprestano spremlja vzdolž radijske poti. Če je signal še dovolj kvaliteten, se s frekvenčnimi siti zgolj izloči morebitne motnje ter se ga takoj posreduje naprej.



Slika 2. Zunanja enota z različnimi možnostmi posredovanja

Z uporabo visokih stolpov in usmerjenih anten z večjim ojačanjem je mogoče doseči presenetljivo nizko število regeneracij tudi na daljših razdaljah. V zunanji enoti (OutDoor Unit, ODU) lahko signal s sprejema usmerimo na oddajo v različnih točkah, kot prikazuje Slika 2 s prekinjenimi puščicami. Ključno je zavedanje, da se signal pri prenosu brez regeneracije neizogibno kvari vzdolž prenosne poti, ne samo zaradi dodanega šuma in motenj, temveč

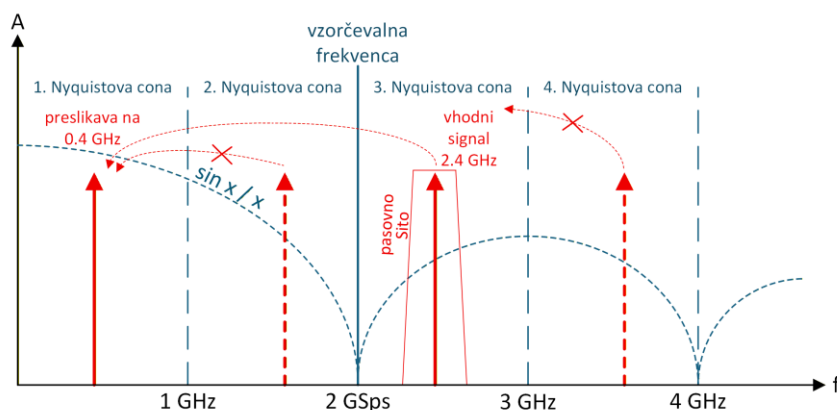
tudi zaradi akumulacije odstopanja parametrov komunikacijskih modulov. Ključni sta popačenji amplitudnega poteka in skupinske hitrosti. Ko se medsimbolna interferenca poveča nad sprejemljivo raven, je potrebna regeneracija.

2. Digitalni sprejemniki in oddajniki

Če se v vmesnih točkah radijske poti lahko izognemo regeneraciji, se v končni točki ne moremo izogniti demodulaciji. Elektronska vezja za telekomunikacijske naprave so danes večinoma zasnovana na namenskih vezjih (t.i. čipsetih). Zaradi razlogov, omenjenih v uvodu, večini načrtovalcev ni treba vložiti velikega npora v zmanjševanje zakasnitev. Veliko večji poudarek namenijo kvalitetni in ustrezni modulaciji, regeneraciji ali demodulaciji.

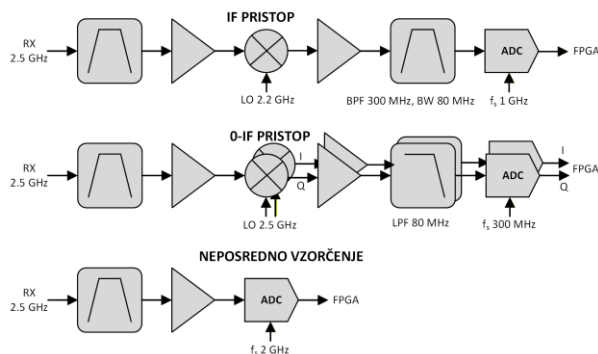
Za zmanjšanje zakasnitev moramo tako poseči po namenskih rešitvah oz. jih razviti in izdelati. Na srečo so dobro dostopni analogno-digitalni (AD) in digitalno-analogni (DA) pretvorniki z vzorčevalno frekvenco 3 GHz in več. S tako hitrimi pretvorniki lahko vzorčimo signale v prvi, drugi ali višjih Nyquistovih conah. Vzorčenje v višjih Nyquistovih conah se sicer v telekomunikacijah uporablja že vsaj dve desetletji (Slika 3). To omogočajo zadrževalno-vzorčevalna vezja (sample & hold) s pasovno širino, večjo od vzorčevalne frekvence. Tako se klasična pretvorba v nižje frekvenčno področje izvede že v samih AD in DA pretvornikih. Namesto nizko-prepustnih sit potrebujemo za izločanje signalov iz sosednjih con pasovno-prepustna sita.

Pri razvoju komunikacijskih naprav v področju nekaj GHz imamo dve možnosti izvedbe: frekvenčno pretvorbo navzdol ali navzgor s frekvenčnimi mešalniki ter vzorčenje signalov na nižjih frekvencah ali neposredno vzorčenje na osnovni frekvenci. Frekvenčna pretvorba se pri sprejemu običajno izvede na nižjo medfrekvenco ali pa v ničelno medfrekvenco. Pri tem sama frekvenčna pretvorba ne doda znatnih zakasnitev.



Slika 3. Nyquistove cone pri neposrednem vzorčenju

Večje zakasnitve nastanejo v potrebnih medfrekvenčnih sitih. Še bolj kot sama zakasnitev predstavlja težavo popačenje skupinske zakasnitve pri frekvenčnih sitih z veliko pasovno širino, na primer 85 MHz pri srednji frekvenci 300 MHz.



Slika 4. Različne izvedbe sprejemnikov

Kot prikazuje Slika 4, izbira koncepta močno vpliva na frekvenco vzorčenja. Ta je lahko za vhodni signal frekvence 2,5 GHz le 300 MHz v primeru ničelne medfrekvence, 1 GHz v primeru mešanja na nižjo medfrekvenco, ter 2 GHz v primeru neposrednega vzorčenja.

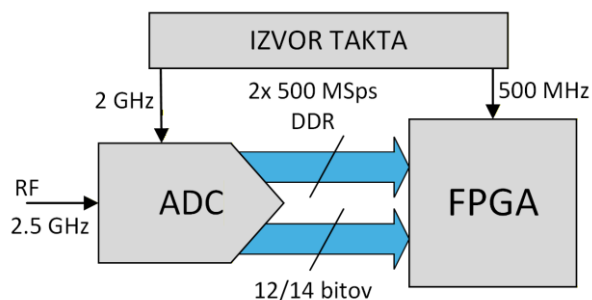
3. Izvedba preizkusnega sistema

Rešitev z neposredno pretvorbo, torej z digitalnimi pretvorniki navzdol (Digital Down-Converter, DDC) in digitalnimi pretvorniki navzgor (Digital Up-Converter, DUC), je na prvi pogled zelo privlačna. Neposredna pretvorba res znatno poenostavi napravo, vendar za ceno:

- uporabe hitrih DA in AD pretvornikov, ki so dražji,
- uporabe programabilnih vezij FPGA, ki omogočajo priključitev hitrih pretvornikov (Slika 5) [1],
- zahtevnejše obdelave signalov v vhodnih stopnjah vezij FPGA, kjer je potrebno vzporedno procesiranje,
- povečane porabe energije in s tem povezanega gretja ali hlajenja modulov.

V tem prispevku predstavljamo predvsem pretvorbo navzdol. Povsem enake zakonitosti veljajo pri pretvorbi navzgor. Nekaj razlik je le pri možnih načinih delovanja D/A pretvornikov, kot so: brez povratka na ničlo (Non-Return to Zero, NRZ), s povratkom na ničlo (Return To Zero, RTZ), radiofrekvenčni (Radio Frequency, RF) in 2x Radio Frequency (2x RF). Omenjeni načini omogočajo višje izhodne moči DA pretvornikov v višjih Nyquistovih conah.

Velja omeniti, da pri digitalni pretvorbi navzdol ali navzgor običajno nimamo popolne svobode pri izbiri frekvence vzorčevalnega takta. Pogosto je izbira vezana na simbolno hitrost prenosa. S pravimi razmerji je namreč mogoče znatno poenostaviti predvsem izvedbo demodulatorjev in s tem dodatno zmanjšati zakasnitve.



Slika 5. Povezava hitrega A/D pretvornika z FPGA

Hitri serijski FPGA vodili, kot sta serial LVDS in zlasti JESD204C, vnašata preveliko zakasnitev. Na primer, skupni čas AD in DA pretvorbe ter prenosa do FPGA po podatkih za pretvornike z JESD vodilom [2] znaša med 43 in 95 ns. Pri vodilu JESD204C so zaradi izravnav podatkov iz posameznih linij v vezjih FPGA potrebni izravnalniki FIFO (First In First Out). Potrebna globina teh izravnalnikov doda zakasnitev nekaj 100 ns. Tudi pri paralelnem prenosu, na primer na vodilu Parallel LVDS, nastane večji del zakasnitev v digitalnem delu naprave, vendar je ta vseeno manjša v primerjavi s Serial LVDS ali JESD204C vodilom.

Veliko omejitev predstavlja tudi hitrost delovanja vezij FPGA, ki redko preseže 500 MHz. V izogib tej omejitvi, je treba uporabiti več vzporednih procesnih verig. V blokih, kjer se izvaja digitalno signalno procesiranje (Digital Signal Processing, DSP), lahko izvajanje v več paralelnih verigah predstavlja velik izziv za razvijalce. V zadnjih letih ne opažamo znatnega povečevanja hitrosti delovanja vezij FPGA.

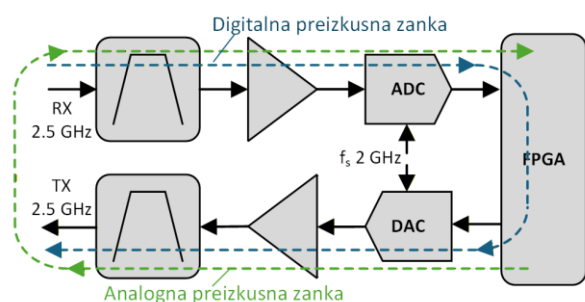
4. Rezultati preizkusov

Da bi preizkusili delovanje radijske naprave v frekvenčnem področju 2,5 GHz in s tem stranki omogočili najvišjo stopnjo fleksibilnosti, razvijamo komunikacijsko napravo z neposrednim vzorčenjem. Pri tem smo izkoristili vse možnosti zmanjšanja zakasnitve z [3]:

- izbiro vhodnih in izhodnih sit s primerno strmino bokov, zakasnitvijo in nizkim popačenjem skupinske hitrosti,
- zmanjšanjem fizične velikosti vezij,

- izbiro AD in DA pretvornikov z najkrajšim časom pretvorbe ter najkrajšim časom prenosa do vezja FPGA.

Preizkusi na prototipu naprave, zgrajene delno z namensko razvitimi vezji in delno s komercialnimi moduli so zelo obetavni s stališča zmanjšanja zakasnitve na najnižjo možno raven. S preizkusi v analognih in digitalnih preizkusnih zankah (Slika 6) smo izmerili skupno zakasnitev. Ta vključuje čas prenosa v RF verigah, čas AD in DA pretvorb ter čas prenosa do in od vezij FPGA. Izmerjena skupna zakasnitev od RF vhoda do RF izhoda v digitalni zanki pri uporabi paralelnega vodila znaša 49 ns. K temu analogna veriga doda 6 ns. Te preizkuse smo opravili brez modulatorjev in demodulatorjev, ki vnašajo dodatne zakasnitve.



Slika 6. Analogna in digitalna preizkusna zanka

S predstavljenimi pristopi, kot so uporaba pretvornikov z nizkimi časi pretvorbe, uporaba več paralelnih vodil ter delovanje vezij FPGA pri najvišjem mogočem taktu, smo v sprejemnih in oddajnih verigah zmanjšali zakasnitve na vrednosti, ki so blizu trenutnemu stanju dosegljive tehnologije. Zakasnitve so predvidljive in konstantne. Doseženi rezultati bodo zadostovali za nekaj let. Vsaka znatna izboljšava obstoječih tehnologij ali pojav novih ter pričakovanja uporabnikov, bodo zagotovo vodili v nov razvojni krog.

5. Literatura

- [1] AMD/Xilinx UltraScale™ Architecture and Product Data Sheet: Overview (v4.8), November 19, 2025 (DS890) <https://docs.amd.com/v/u/en-US/ds890-ultrascale-overview>
- [2] Texas Instruments, JESD204B Overview (slap161.pdf), 2016, <https://www.ti.com/lit/pdf/slapp161>
- [3] Interna razvojna projektna poročila, Instrumentation Technologies, d.o.o., januar 2025

O avtorjih

Mag. Primož Lemut, u.d.i.e. dela v podjetju Instrumentation Technologies, d.o.o. kot arhitekt rešitev.

Diplomiral in magistriral je na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani s področja avtomatike in industrijske elektronike. Ukvarja se z zasnovo in razvojem telekomunikacijskih in industrijskih naprav. Večina teh naprav uporablja programabilna vezja FPGA.

Dr. Jurij Tratnik, u.d.i.e. je zaposlen v podjetju Instrumentation Technologies, d.o.o. kot vodja razvojnih projektov. Diplomiral in doktoriral je na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani s področja vlakenske optike in radiofrekvenčne elektronike. Poleg projektnega vodenja aktivno sodeluje pri razvoju, testiranju in certificiranju novih elektronskih naprav.

David Malovrh, mag. e. dela v podjetju Instrumentation Technologies, d.o.o. kot razvojnik strojne opreme. Ukvarja se z načrtovanjem, testiranjem in dizajnom telekomunikacijskih ter industrijskih naprav. Zanima ga združevanje elektronskih, mehanskih in termalnih lastnosti elementov v industrijskih napravah.

Dr. Aleš Bardorfer, u.d.i.e. je zaposlen v podjetju Instrumentation Technologies, d.o.o. kot arhitekt rešitev. Diplomiral in doktoriral je na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani s področja robotike in biomedicinske tehnike. Ukvarja se z razvojem in verifikacijo digitalnih struktur v FPGA programabilnih vezjih ter programske opreme, v napravah s področja merilne tehnike, telekomunikacij in pospeševalnikov osnovnih delcev.

Popravljanje odstopanj GNSS zaradi motenj z uporabo globokih časovnih grafov

Ivana Kesić¹, Aljaž Blatnik², Carolina Fortuna¹, Blaž Bertalančič¹

¹Inštitut Jožef Stefan, ²Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani

ivanakesic001@gmail.com

Jamming Correction of GNSS Deviation with Graph Neural Networks

Abstract. *Global Navigation Satellite Systems (GNSS) face growing disruption from intentional jamming. We propose a receiver-centric deep temporal graph network method, that corrects latitude and longitude errors caused by jamming. By modeling the satellite-receiver scene as a heterogeneous star graph, our approach captures spatiotemporal correlations disrupted by interference. Evaluations on datasets with various jamming profiles (CW, 3xCW, FM) show that our proposed model significantly outperforms baseline models, reducing position error to a range of 3–8 cm under severe jamming conditions.*

Uvod

Globalni navigacijski satelitski sistemi (GNSS) so temelj kritične infrastrukture, od telekomunikacij [1] do avtonomnih sistemov [2]. Zaradi izjemno nizke moči sprejetega signala pa so ti sistemi inherentno ranljivi na motnje. Te motnje se v grobem delijo na nenamerne, ki so posledica industrijskega šuma ali radijskega onesnaženja, in na namerne, ki predstavljajo bistveno večjo grožnjo. Z razmahom cenovno dostopnih programsko določenih radijev (angl. Software-defined radio – SDR) je danes ustvarjanje kompleksnih motilnih signalov postalo trivialno [3]. Posledice tega trenda so vidne v drastičnem porastu incidentov v letu 2024, ko poročila beležijo kar petkratno povečanje obsega motenj. Ta skok je tesno povezan z zaostrovanjem geopolitičnih konfliktov in aktivnimi vojnimi žarišči, kjer se motenje GNSS uporablja kot sredstvo elektronskega bojevanja, ki pa pogosto prizadene tudi civilno letalstvo in regionalne sisteme [4].

Soočanje s temi grožnjami je razkrilo temeljno pomanjkljivost obstoječih pristopov: večina metod problem obravnava statično ali enodimenzionalno, s čimer zanemarijo dinamično naravo motenj. Obstoječe rešitve lahko razdelimo v tri glavne kategorije, od katerih ima vsaka specifične omejitve. Prva skupina so metode **detekcije**

anomalij [5][6], ki delujejo zgolj reaktivno – motnjo sicer zaznajo, a nanjo odgovorijo z izločitvijo meritev, kar vodi v odpoved storitve namesto v rešitev. Druga skupina so metode **napovedovanja položaja** [7][8], ki poskušajo rekonstruirati trajektorijo iz zgodovine, vendar so v nestacionarnem okolju nestabilne, saj se pretekle napake akumulirajo in povzročajo drsenje napovedi. Tretja in najsodobnejša skupina so metode **neposredne korekcije napak** [9][10], kjer se najpogosteje uporabljajo klasične nevronske mreže, kot je na primer konvolucijska nevronska mreža (angl. Convolutional Neural Network - CNN). Glavna šibkost teh modelov je njihova togost. Zasnovani so tako, da za delovanje vedno zahtevajo točno določeno, nespremenljivo število satelitov. Ker pa motnje povzročajo nenehno izginjanje signalov, ti modeli ne znajo obdelati nastalih "lukenj" v podatkih, ne da bi jih umetno zakrpali z izmišljenimi vrednostmi (npr. ničlami), kar pa popači realno sliko in zmanjša natančnost korekcije.

V tem prispevku predstavljamo metodo, ki problem blaženja motenj formulira kot regresijo na dinamičnih časovnih grafih. Namesto obravnave meritev kot preprostih vektorjev, naš model upošteva spreminjajočo se geometrijo konstelacije satelitov in njihovo porstorsko-časovno koherenco. To je prvi pristop, ki za korekcijo napak položaja uporablja tovrstno modeliranje, ki je naravno odporno na spreminjajoče se število satelitov GNSS.

1. Opis problema

Cilj metode je oceniti vektor odstopanja napovedanega položaja $Y_t = (\Delta lat_t, \Delta lon_t)$ na podlagi zgodovine opazovanj in s tem popraviti izmerjeni položaj, ki ga vrne sprejemnik.

Signali GNSS v pasu L1 (1575,42 MHz) so ob prihodu na Zemljo izjemno šibki in običajno pod pragom termičnega šuma sprejemnika. Sprejemnik jih rekonstruira s korelacijo in integracijo, zato vsaka dodatna radiofrekvenčna energija v tem pasu deluje kot šum, ki zniža efektivno razmerje signal-

šum (angl. Signal-to-noise ratio - SNR) in oteži vzdrževanje zaklepa na satelitih [11]. Prevladujejo trije tipi motenj; z različno zahtevnostjo:

- **Eno-frekvenčna motnja (CW):** Ozkopasovna motnja (ena spektralna komponenta). Napredni sprejemniki jo lahko delno filtrirajo.
- **Tri-frekvenčna motnja (3xCW):** Trije tesno razmaknjeni toni. Ta oblika je bistveno bolj uničujoča, saj spektralno pokrije širše območje in onemogoči sledenje večjemu številu satelitov hkrati.
- **Frekvenčno modulirana motnja (FM):** Širokopasovni signal, ki dvigne prag šuma čez celoten spekter in povzroči degradacijo vseh kanalov hkrati.

Ključna posledica teh motenj je pogosta izguba zaklepa sledilnih zank, kar vodi v hitro in nepredvidljivo spreminjanje števila aktivnih satelitov N_t . Da bi ustrezno zajeli to dinamiko, konstelacijo ob času t modeliramo kot **dinamični, heterogeni zvezdni graf** [12], $G_t = (V_t, E_t)$, ki neposredno odraža fizikalno situacijo. Množica vozlišč V_t vsebuje eno centralno vozlišče, ki predstavlja sprejemnik r , in spremenljivo število listov N_t , ki predstavljajo trenutno vidne satelite s_i . Povezave E_t obstajajo le med sateliti in sprejemnikom ter ponazarjajo prenos signala. Vsako vozlišče nosi svoje značilke; sateliti prispevajo vektorje z meritvami SNR, azimuta in elevacije, sprejemnik pa ocenjeni koordinati. Problem je tako definiran kot regresija funkcije Φ , ki zaporedje grafov preslika v končno oceno napake:

$$\hat{Y}_t = \Phi(G_{t-k}, \dots, G_t) \quad (1)$$

2. Metodologija

Predlagana metoda temelji na arhitekturi globokih grafnih nevronske mreže, specifično na plasti **HeteroGCLSTM** (Heterogeneous Graph Convolutional LSTM) [13]. Ta arhitektura je izbrana namensko, saj združuje tako prostorsko kot časovno spreminjanje struktur grafov. Proces obdelave podatkov poteka v dveh korakih. Najprej se izvede **prostorska agregacija**, kjer centralno vozlišče (sprejemnik) zbere in agregira značilke vseh trenutno vidnih satelitov. S tem korakom model zajame globalno geometrijo konstelacije in detektira prostorske vzorce motenj, na primer padec SNR na določenem sektorju neba. Temu sledi **časovna posodobitev**, kjer agregirano stanje vstopi v LSTM celico. Ta vzdržuje spomin na pretekle motnje, kar modelu omogoča razlikovanje

med kratkotrajnim šumom in trajajočim, strukturiranim motenjem. Izhodni vektor skritega stanja se na koncu preko linearnega sloja preslika v oceno napak ($\hat{\Delta lat}_t, \hat{\Delta lon}_t$). Za najboljše delovanje model za napoved trenutnega popravka uporabi sekvenco zadnjih desetih meritev, kar predstavlja optimalno ravnoesje med količino informacije in odzivnostjo modela.

Za verifikacijo metode smo izvedli obsežno evalvacijo na realnih meritvah, pridobljenih v kontroliranem okolju s sintetičnim generiranjem motenj [11]. Uporabljena sta bila dva sprejemnika za zagotavljanje strojne raznolikosti: **U-blox MAX-M10** in **Ai-Thinker GP01**. Eksperimentalni protokol je vključeval tri tipe motenj (CW, 3xCW, FM) pri šestih ravneh moči (od -45 dBm do -70 dBm). Medtem ko je bil U-blox 10 testiran z vsemi tremi tipi, je bila analiza pri sprejemniku GP01 omejena na CW in 3xCW, saj pri FM-motnjah ni podal uporabnega rezultata. Vsak scenarij je bil ponovljen 50-krat s striktnim časovnim protokolom: 100 s brez motenj, 100 s motenja, 80 s okrevanja in frekvenco vzorčenja 1 Hz. Podatke smo razdelili v razmerju 80:20 za učenje in testiranje. Uspešnost merimo s srednjo evklidsko napako (ang. Euclidean MAE), za primerjavo pa uporabljamo tri referenčne modele časovnih vrst: TSMixer, Uniform CNN in Seq2Point [14][15].

$$MAE_e = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sqrt{(\Delta lat_i - \hat{\Delta lat}_i)^2 + (\Delta lon_i - \hat{\Delta lon}_i)^2} \quad (2)$$

3. Rezultati in diskusija

Osrednji del evalvacije predstavlja primerjava natančnosti popravkov pri najzahtevnejšem scenariju, tj. pri moči motenja -45 dBm. Rezultati v Preglednici 1 prikazujejo srednjo evklidsko napako (MAE) za oba sprejemnika.

Preglednica 1: Primerjava srednje evklidske napake (MAE v cm) pri najvišji moči motenja (-45 dBm) za oba sprejemnika.

Model	U-blox 10 (cm)	GP01 (cm)
Predlagan	4,25 ± 0,31	3,78 ± 0,27
Seq2Point	5,12 ± 0,44	4,50 ± 0,19
TSMixer	5,82 ± 0,53	5,05 ± 0,87
CNN	6,78 ± 0,82	8,26 ± 1,08

Pregled rezultatov potrjuje superiornost predlagane grafske arhitekture, saj metoda konsistentno dosega najnižjo stopnjo napake. Medtem ko referenčni modeli pri kompleksnih motnjah pogosto kažejo večja odstopanja, predlagana metoda uspešno kompenzira napake. To razliko gre pripisati predvsem omejitvam klasičnih modelov časovnih vrst, ki ne omogoča ustreznega modeliranja nenadnih izpadov satelitov.

Podrobnejša analiza rezultatov razkriva zanimiv vpogled v fizikalno naravo interakcije med motnjo in strojno opremo. Pri cenejšem sprejemniku GP01 je opazna drastična razlika med vplivom ozkopasovnega motenja (CW) in večtonskega motenja (3xCW), kjer napaka naraste s 3,64 cm na 7,74 cm. Še bolj zgovoren je podatek o odsotnosti rezultatov za GP01 pri FM-motnji. Ta sprejemnik namreč pod vplivom širokopasovnega FM signala, ki dvigne prag šuma čez celoten spekter, popolnoma odpove in preneha podajati napoved položaja. To predstavlja fizikalno omejitev predlagane metode korekcije: model ne more popraviti položaja, če ga sprejemnik sploh ne izračuna. Nasprotno pa se sprejemnik U-blox 10 zaradi robustnejše zasnove s tem učinkom bolje spopada in podaja rešitev tudi pri FM-motnjah, kjer predlagan model uspešno zmanjša napako na 4,82 cm.

Da bi preverili delovanje v realističnih pogojih, kjer tip in moč motnje nista vnaprej znana, smo

20 cm tudi v ekstremnem primeru, ko za učenje uporabimo le 10 % celotne podatkovne množice. V enakih pogojih referenčni modeli popolnoma odpovejo.

4. Zaključek

V delu smo predstavili globoko časovno grafno nevronske mreže, ki blaženje motenj GNSS inovativno formulira kot problem regresije na dinamičnih grafih. Skozi obsežno evalvacijo na dveh sprejemnikih in različnih tipih motenj se je izkazalo, da predlagana metoda konsistentno prekaša močne referenčne modele časovnih vrst. Ta prednost ostaja stabilna tako pri posameznih scenarijih kot na mešanih naborih podatkov, najbolj izrazita pa je v pogojih močne interference, kjer model izkazuje visoko odpornost na disrupcijo signalov. Poleg visoke natančnosti metoda izkazuje odlično podatkovno učinkovitost, saj ostaja konkurenčna tudi pri omejeni količini učnih podatkov, ter uspešno generalizacijo med različnimi napravami. Dodatni testi so pokazali, da model deluje robustno tudi v primerih, ko se sooči s tipi motenj, ki jih med fazo učenja ni videl. Rezultati skupno potrjujejo, da modeliranje z dinamičnimi grafi predstavlja novo in močno paradigmo za odpravljanje motenj, ki ponuja natančne in stabilne ocene napak, primerne za uporabo v realnem času.

Preglednica 2: Primerjava natančnosti modelov na mešanem naboru podatkov.

Sprejemnik	Motnja	Predlagan model	Seq2Point	TSMixer	CNN
U-blox 10	CW	4,41 cm	6,60 cm	7,17 cm	8,82 cm
	3xCW	4,84 cm	5,52 cm	6,38 cm	5,99 cm
	FM	4,82 cm	7,13 cm	9,48 cm	12,33 cm
GP01	CW	3,64 cm	5,03 cm	5,70 cm	6,47 cm
	3xCW	7,74 cm	10,45 cm	11,40 cm	11,29 cm

izvedli dodatno evalvacijo na mešanem naboru podatkov, ki združuje vse tipe motenj pri vseh močeh (-45 do -70 dBm). Rezultati so predstavljeni v Preglednici 2. Tudi v tem scenariju predlagana metoda ohranja prevlado z minimalno napako 4,25 cm pri U-blox 10 in 3,78 cm pri GP01. Za primerjavo, najbolj uspešen referenčni model *Seq2Point* v povprečju zaostaja za približno 20 %. Ta rezultat je ključen, saj dokazuje, da je grafni model sposoben generalizacije in se ne "nauči" le na specifičen tip motnje, temveč se uspešno prilagaja stohastični naravi različnih interferenc v realnem času.

Poleg absolutne natančnosti se prednost grafonega pristopa kaže tudi v izjemni podatkovni učinkovitosti. Analiza občutljivosti je pokazala, da predlagan model ohranja stabilnost z napako okoli

5. Literatura

- [1] J. Li, K. K. Nagalapur, E. Stare, S. Dwivedi, S. A. Ashraf, P.-E. Eriksson, U. Engström, W.-H. Lee, and T. Lohmar, "5g new radio for public safety mission critical communications," IEEE Communications Standards Magazine, vol. 6, no. 4, pp. 48–55, 2023.
- [2] L. Xiong, R. Kang, J. Zhao, P. Zhang, M. Xu, R. Ju, C. Ye, and T. Feng, "G-vido: A vehicle dynamics and intermittent gnss-aided visualinertial state estimator for autonomous driving," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 23, no. 8, pp. 11845–11861, 2021.
- [3] M. García-Bermúdez, J. Solé-Lliveras, and M. A. Azpúrua, "Characterization of illegally marketed gnss jammers," in 2025 ESA Workshop on Aerospace EMC (Aerospace EMC). IEEE, 2025, pp. 1–6.
- [4] G. Workgroup, "Gps spoofing: Final report of the gps spoofing workgroup," GPS Spoofing WorkGroup: London, UK, 2024.

- [5] H. Li, Y. Xie, X. Meng, S. Wu, J. Xu, and X. Wang, "A novel method for anomaly detection and correction of gnss time series," *Measurement Science and Technology*, vol. 36, no. 1, p. 016330, 2024.
- [6] Q. Liu, C. Gao, R. Shang, Z. Peng, R. Zhang, L. Gan, and W. Gao, "Nlos signal detection and correction for smartphone using convolutional neural network and variational mode decomposition in urban environment," *GPS Solutions*, vol. 27, no. 1, p. 31, 2023.
- [7] Y. Zhou, X. He, S. Wang, S. Hu, X. Sun, and J. Huang, "Hybrid gnss time-series prediction method based on ensemble empirical mode decomposition with long short-term memory," *Discover Applied Sciences*, vol. 7, no. 1, p. 61, 2025.
- [8] H. Chen et al., "An improved vmd-lstm model for time-varying gnss time series prediction with temporally correlated noise [j]. *remote sens.* 15 (14)," 2023.
- [9] C. Zhu, X. Xu, Y. Na, C. Ji, D. Wu, and K. Wei, "Enhancing gnss positioning using transformer-based correction network," in *Proceedings of the 37th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2024)*, 2024, pp. 1300–1310.
- [10] A. Mohanty and G. Gao, "Learning gnss positioning corrections for smartphones using graph convolution neural networks," *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*, vol. 70, no. 4, 2023.
- [11] A. Blatnik and B. Batagelj, "Evaluating gnss receiver resilience: A study on simulation environment repeatability," *Electronics*, vol. 14, no. 9, p. 1797, 2025.
- [12] S. M. Kazemi, R. Goel, K. Jain, I. Kobzyev, A. Sethi, P. Forsyth, and P. Poupart, "Representation learning for dynamic graphs: A survey," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 21, no. 70, pp. 1–73, 2020.
- [13] B. Rozemberczki, P. Scherer, Y. He, G. Panagopoulos, A. Riedel, M. Astefanoaei, O. Kiss, F. Beres, G. Lopez, N. Collignon et al., "Pytorch geometric temporal: Spatiotemporal signal processing with neural machine learning models," in *Proceedings of the 30th ACM international conference on information & knowledge management*, 2021, pp. 4564–4573.
- [14] S.-A. Chen, C.-L. Li, N. Yoder, S. O. Arik, and T. Pfister, "Tsmixer: An all-mlp architecture for time series forecasting," *arXiv preprint arXiv:2303.06053*, 2023.
- [15] C. Zhang, M. Zhong, Z. Wang, N. Goddard, and C. Sutton, "Sequenceto-point learning with neural networks for non-intrusive load monitoring," in *Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence*, vol. 32, no. 1, 2018.

O avtorju



Ivana Kesić je absolventka magistrskega študijskega programa Elektrotehnika, smer Informacijsko komunikacijske tehnologije (IKT), na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Od leta 2023. dela kot študentka na Inštitutu Jožef Stefan, v laboratoriju SensorLab na

Odseku za komunikacijske sisteme. Njena raziskovalna področja vključujejo analizo časovnih vrst z uporabo grafovskih metodologij in grafovskih nevronske mreže.

Self-Steerable Antennas for E-band point to point links

Luka Naglič¹, Robert Vilhar¹, Fabio Rosato²

¹Aviat Networks, ²Fabbrica Italiana Antenne Faini Telecommunications Systems

luka.naglic@aviatnetworks.com

Samonastavljive antene za področje mm-valov

Povzetek. Izjemno ozek glavni snop ($\sim 0,5^\circ$) paraboličnih anten z visokim dobitkom (>50 dBi), ki se običajno uporabljajo v točkovnih povezavah v E band frekvenčnem območju (71–86 GHz, mm valovi), predstavlja velik izziv pri praktični izvedbi takšnih povezav. V praksi se pogosto zgodi, da operater izbere neustrezno nosilno konstrukcijo za anteno s tako ozkim sevalnim diagramom. V takih primerih je povezava izjemno občutljiva na stabilnost mehanskih struktur. Najpogostejša problema, ki se pojavita zaradi neprimerne konstrukcije, sta:

- hitre vibracije antene, ki jih povzroča veter,
- počasni mehanski premiki zaradi vpliva toplotnih raztezkov.

Oba pojava lahko povzročita odmik antene od optimalne usmeritve, kar vodi do opaznega poslabšanja kakovosti radijske zveze ali celo do občasnih prekinitev. V članku predstavljamo ključne izzive pri usmeritvi zveze, s katerimi se operaterji srečujejo na terenu, osnovno zasnovo mehansko samonastavljive antene, ki jo razvija Faini Telecommunication Systems, ter opis delovanja in testiranja.

1. Introduction

As microwave backhaul advances into the millimeter wave domain, E-band (70/80 GHz) systems are seeing broad global adoption to deliver multi gigabit capacities. Operating at these frequencies, however, introduces a central engineering challenge: propagation loss rises sharply, which is typically countered with large aperture, high gain antennas. While this restores link budget, it also produces extremely narrow beams, making precise alignment difficult and leaving links vulnerable to minor mast movements such as sway, vibration, or twisting that can push the boresight off target and degrade link performance. Ensuring continuous, reliable connectivity under these conditions has become a critical limitation for modern high frequency networks.

E-band's popularity continues to grow (with forecasts projecting a substantial share of new deployments in the next few years), yet it brings inherent challenges versus lower frequencies: lower practical transmit powers, more noise sensitive receivers, and higher path attenuation between transmitter and receiver and higher rain attenuation. Together, these effects increase the premium on pointing accuracy and dynamic alignment in the field. These realities set the stage for steerable E-band antennas, solutions that actively maintain boresight under real world disturbances to protect throughput and availability without sacrificing the spectral efficiencies that make E band attractive in the first place.

2. Eband link performance

Aviat Networks E-band radio is high capacity all outdoor radio designed for 70/80 GHz point to point links. It operates with wide channel bandwidths up to 2 GHz, using adaptive modulation from QPSK to 256QAM, enabling fiber-like throughputs (up to 20Gbps) ideal for dense 5G backhaul networks.



Figure 1: Aviat E-band radio

Mechanical sensitivity. E-band links impose significantly stricter mechanical stability requirements than 6-23 GHz systems. Although a 60 cm E-band dish is physically small, it is electrically large - comparable to a ~ 6 m dish at 8 GHz - and exhibits a $\sim 0.5^\circ$ 3 dB beamwidth. Consequently, even minimal structural motion or thermal distortion can cause sizeable RSL variations.

Environmental forces introduce several types of dynamic or static displacements.

Wind induced vibration produces rapid angular changes in the 1–10 Hz range, causing fast fading in the link budget. These oscillations are too rapid to be compensated by conventional alignment mechanisms and therefore must be minimized through mechanical stiffness and proper mounting orientation.

Wind induced sway, while slower (0.1–1 Hz), still creates periodic deflections of the antenna boresight, manifesting as slow fading and fluctuation in RSL. This type of movement is particularly noticeable on taller, lighter towers and poles where lateral flexibility is unavoidable. Both vibration and sway effects can combine, creating complex motion patterns that challenge link stability, especially on high capacitance, low margin links.

In addition to wind forces, **thermal deformation**, commonly referred to as the *sunflower effect*, presents a predictable, cyclical misalignment mechanism.

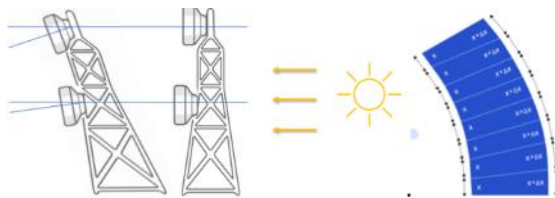


Figure 2: Tower deformations due to thermal expansions

As sunlight warms the structural elements of a tower unevenly, differential thermal expansion causes the supporting members to bend. The result is a gradual shift of the antenna pointing direction throughout the day, producing a characteristic daily RSL pattern shown below:

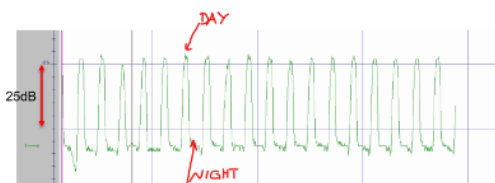


Figure 3: Day-to-day RSL variation due to sunflower effect

Permanent structural deformation or long-term loading introduces **static misalignment**, which shifts the antenna boresight by a fixed offset. This leads to a persistent reduction in received power and thus permanently reduces fade margin.

3. Self-steerable antenna idea

Cassegrain antenna forms its radiated beam through a two-stage reflection: the feed illuminates a hyperbolic sub-reflector, which in turn creates a virtual focus for the main paraboloidal reflector. When the feed, sub-reflector, and main reflector are

perfectly aligned, the resulting wavefront incident on the paraboloid is symmetric, and the antenna produces a well collimated beam with maximum gain and minimal sidelobes.

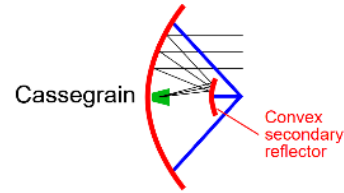


Figure 4: Basic principle of Cassegrain parabolic antenna

To compensate for errors introduced by environmental changes presented in previous chapter, the sub-reflector can be displaced laterally by a controlled mechanism. Moving the sub-reflector slightly off the optical axis alters the phase distribution across the wavefront it redirects toward the main dish. This intentional asymmetry imposes a predictable phase gradient across the aperture, steering the main beam in the opposite direction of the sub-reflector offset. Sub-reflector motion provides a highly effective fine pointing method because small physical adjustments result in amplified angular correction at the radiated beam, allowing the antenna to maintain proper alignment without physically moving the entire structure.

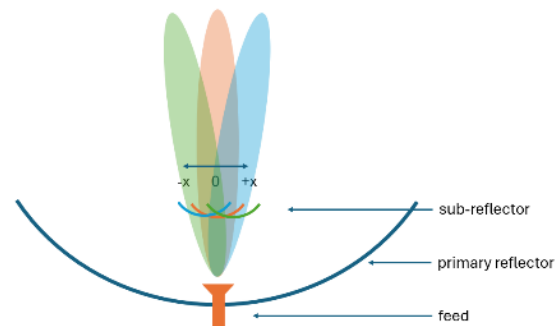


Figure 5: Beam steering by sub-reflector adjustments

4. Testing of prototype antenna

FIA-Faini Telecommunications Systems developed a working prototype steerable XPIC antenna for multiband configuration (combining 80GHz and 18GHz band). Antenna is Cassegrain type with mechanically moving sub-reflector and accelerometer. Antenna is controlled by in-house developed electronics and algorithms.

The antenna supports autonomous steering, by reading data from gyroscope/accelerometer sensors and receiving the RSL provided by the radio unit.

The controller continuously monitors RSL and accelerometer data. If vertical tilt is detected, the antenna executes fast elevation correction based on the accelerometer, then optionally executes RSL

based fine alignment. RSL triggered tuning is activated when the live RSL drops more than predefined value from baseline for more than a specified delay (few seconds). The algorithm probes center, right, up, left, down in small steps (resolution better than 0.1°), evaluates five measurements, and iteratively shifts toward the strongest point.

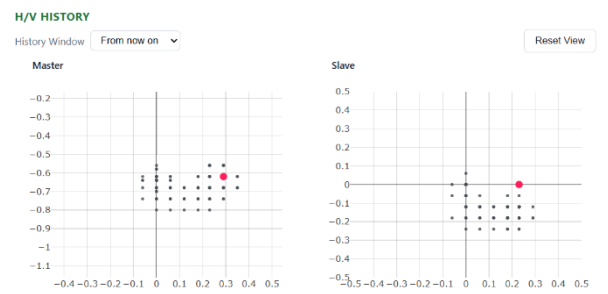


Figure 6: History of antenna corrections attempts

The Antenna can operate as a stand-alone product, having on board the logic to manage the priority of adjustment of the two antennas of the link, and to discriminate if RSL reduction is caused by propagation fading or actual misalignment, setting the steering activation accordingly.

The antenna can be remotely monitored and controlled, allowing the setting of a specific position of the beam, different operating modes, reading the status of the system, updating the firmware.

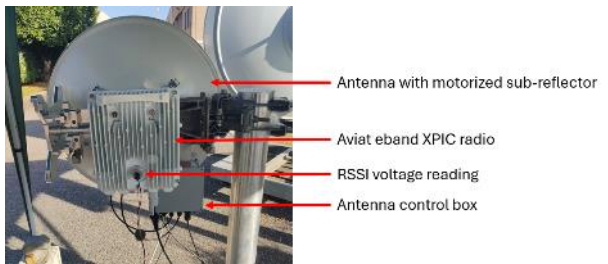


Figure 7: Aviat radio on demo link with Faini steerable antenna

A dedicated demo GUI was developed to perform installation steps, enable/disable tracking modes, adjust parameters, and monitor antenna states in real time. Logged data include: RSL, baseline, accelerometer values, antenna positions, action history, and 24-hour traces at 1 s resolution.

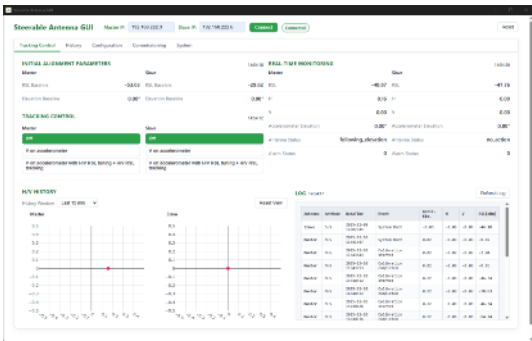


Figure 8: Main screen of steerable antenna GUI

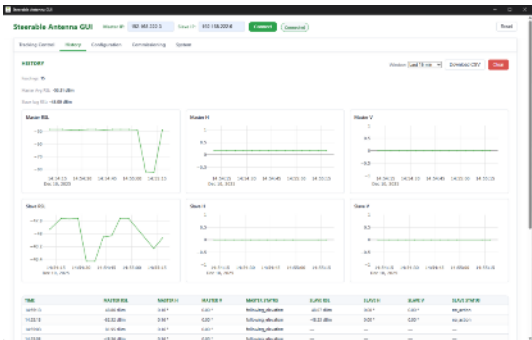


Figure 9: History charts of antenna activity on the GUI

5. Conclusion

The prototype steerable dual reflector antenna demonstrates that its sub-reflector control can reliably compensate for slow structural drift, such as the daily sunflower effect, maintaining correct alignment and high link performance.

Testing also shows that there is room for refinement, particularly in handling RSL measurement stability, tuning timing parameters, and improving responsiveness under more dynamic conditions. With further optimization, the system can evolve into a robust, fully mature solution for stabilizing E-band backhaul links in real world environments.

6. References

[1] Internal Aviat and FIA-Faini documentation
[2] Sam Agneessens, *Sway compensation antennas, your E-band friend, with benefits.* (Article)
[3] Balanis, C. A., *Antenna Theory: Analysis and Design*, (Book)

7. Acknowledgment

We extend our appreciation to FAI - Faini Telecommunications Systems for designing and developing the innovative steerable dual reflector antenna that formed the foundation of this work. Their invitation to participate as an active collaborator provided invaluable access to the

prototype, engineering insights, and hands-on testing opportunities. The close cooperation, open technical exchange, and strong commitment from the Faini team greatly contributed to the progress and outcomes of this project.

About author



Luka Naglič is an experienced RF and System Design Engineer with over a decade in the telecommunications industry, specializing in microwave radio systems. His work spans RF PCB design, system-level integration, advanced modem configurations (MIMO, XPIC, MRC), and detailed RF measurements, with a strong focus on efficient spectrum usage. He holds an M.Sc. in Optical, Satellite, and Radio Technologies from the University of Ljubljana.

Merjenje razdalje na osnovi faze sprejetega signal v napravah IoT

Tomaž Javornik, Grega Morano, Andrej Hrovat

Institut "Jožef Stefan", Odsek za komunikacijske sisteme, Ljubljana, Slovenija

tomaz.javornik@ijs.si, grega.morano@ijs.si, andrej.hrovat@ijs.si

Phase-Based Ranging in IoT Devices

Abstract. *Accurate location of radio devices typically relies on estimating the distance between nodes. In low-cost devices commonly used in Internet of Things (IoT) applications, distance is usually inferred from the received signal strength indicator (RSSI) and a path-loss model. Due to unreliable path-loss models, noise, interference, and the quantization of received power measurements, the accuracy of distance estimation is limited, which in turn leads to poor localization performance. In this paper, we present the integration of a phase-based ranging method into devices compliant with the IEEE 802.15.4 standard and its Time-Slotted Channel Hopping (TSCH) protocol, enabling distance estimation with every transmitted packet. By employing compressed sensing techniques, we significantly reduced the number of required measurements, thereby shortening the measurement time and reducing both radio resource usage and device energy consumption. The proposed methods were implemented on low-cost IoT platforms and evaluated through extensive measurements in real-world radio environments.*

1. Uvod

Lega/položaj radijskih naprav je vse bolj pomembna informacija tako za ponudnike lokacijsko odvisnih storitev, kot tudi za same omrežne operaterje za optimizacijo radijskih omrežji. Postopek določanja položaja/lege objekta ali vozlišča imenujemo lokalizacija. Vozlišče, za katero skušamo oceniti lego/položaj je tarča. Izraz lega oziroma lokacija bomo v tem prispevku uporabljali za splošen opis položaja, na primer objekt je v sobi, na hribu ali blizu nebotičnika, medtem ko bo položaj objekta pomenil opis lege vozlišča v koordinatnem sistemu, na primer s kartezičnimi koordinatami (x , y , z).

Postopke lokalizacije sistematično razvrstimo glede na vlogo tarče pri oceni lege/položaja, opis ocenjenega položaja z izbranim globalnim koordinatnim sistemom, arhitekture algoritmov, sodelovanje med tarčami, veličine uporabljene za oceno položaja in prenosno-komunikacijsko tehnologijo. Če pri izračunu položaja tarča nima aktivne vloge, govorimo o pasivnih lokalizacijskih postopkih. Če pa tarča uporablja energijo za določanje svojega položaja, na primer oddaja radijski signal, ga sprejema ali izračunava svojo lokacijo, govorimo o aktivnih lokalizacijskih metodah. Položaj tarče določimo glede na sosednja vozlišča, ki sodelujejo v postopku lokalizacije. Če v postopku lokalizacije sodelujejo vozlišča katerih položaj je poznan, imenovana sidrna

vozlišča, potem lokalizacije metode razvrstimo v skupino lokalizacijskih metod s sidri. Če položaj nobenega izmed vozlišč v omrežju ni znan, se pravi so vsa vozlišča tarče, postopki določanja lokacije izračunajo položaj vozlišč v svojem koordinatnem sistemu. Take metode pa razvrstimo v lokalizacijske metode brez sider. Če tarče medsebojno sodelujejo pri ocenjevanje lokacije so lokalizacijski algoritmi kooperativnih, če pa tarče sodelujejo le z sidrnimi vozlišči pa nekooperativni. Za oceno položaja lahko uporabimo različne fizikalne veličine, na primer svetlobo, zvok ali radijsko valovanje. Čeprav je radijsko valovanje prevladujoča tehnologija za prenos informacij, se lahko uporablja tudi za določanje razdalje med napravama. Medtem ko klasični lokalizacijski algoritmi položaj določajo s pomočjo ocenjene razdalje ali smeri (azimut, elevacija) do sosednjih vozlišč, novejši algoritmi temeljijo na različnih izmerjenih radijskih parametrih, kot je na primer nivo sprejetega radijskega signala. Vendar pa večjo natančnost lokacije dosežemo z algoritmi, ki temeljijo na dobro ocenjeni razdalji med vozlišči, oziroma kotom sprejetega signala.

Natančna ocena razdalje med vozlišči, ki je hitra in energijsko učinkovita, je osnovi pogoj za natančno določanje položaja položaja tarče, še posebno v radijskih vozliščih, ki imajo na razpolago omejeno količino energije, kot so na primer radijske naprave interneta stvari. Prispevek najprej podaja pregled osnovnih tehnik merjenja razdalje s pomočjo radijskih signalov. Sledi predlog merjenja razdalje s primerjavo faze oddanega in sprejetega radijskega signala in integracijo metode v komunikacijske tehnologije interneta stvari. Na koncu prikazemo še rezultate meritev v nekaterih radijskih okoljih.

2. Radijsko merjenje razdalje

Vse radijske tehnologije med delovanjem izmerijo nivo sprejetega signala, do katerega lahko dostopamo preko programskih vmesnikov. Osnova informacija, ki je na razpolago, je nivo sprejetega signala skupaj s šumom in interferenco, poznana pod imenom moč sprejetega signala (ang. received signal strength indicator, RSSI). V bolj naprednih radijskih tehnologijah imamo dostop tudi do podatka referenčna sprejeta moč signala (ang. reference signal received power, RSPR), ki je ocena sprejete moči oddajane iz izbrane bazne postaje. Podatki o ocenjeni moči so običajno na razpolago v kvantizirani obliki z resolucijo od 0.5 dBm do 2.0 dBm. Če poznamo model izgube poti lahko iz sprejetega signala določimo razdaljo med oddajnikom ni sprejemnikom. Za primer širjenja

signala v praznem prostoru:

$$d_m = \frac{c}{4\pi f_{Hz}} 10^{\frac{P_{Tx} - P_{Rx} + G_{Tx} + G_{Rx}}{10n}}, \quad (1)$$

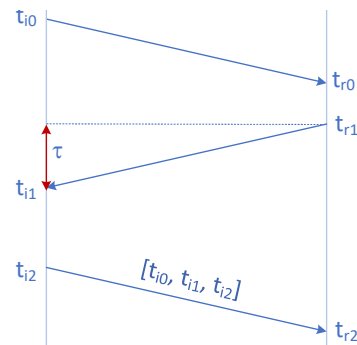
kjer so moči (P_{Tx}, P_{Rx}) podane v dBm, ojačanja (G_{Tx}, G_{Rx}) dBi, frekvenca f_{Hz} v Hz. Za razširjanje signala v praznem prostoru je vrednost n enaka 2. Gornja enačba lepo razkrije slabosti opisane metode. Če predpostavimo, da oddajamo signal v frekvenčnem področju 2.4 GHz in narobe ocenimo parametre modela izgub na poti n , recimo na $n = 1.8$, to privede do napake $\Delta d \approx 6m$ pri dejanski razdalji $d = 10m$. Podoben, vendar nekoliko manjši doprinos k oceni napačne razdalje ima tudi za 1 dBm napačen podatek o moči sprejetega signala, ki pri dejanski razdalji 10 m znaša 1 m. Omenjene absolutne napake pa rastejo z razdaljo med oddajnikom in sprejemnikom. Na primer 1 dBm napaka pri izmerjeni sprejeti moči signala na dejanski razdalji 100 m znaša že 10 m. Glede na zgoraj povedano, kljub dostopnosti informacije o nivoju sprejetega nivoja radijskega signala ter ne-spreminjanje komunikacijskega protokola, metoda zaradi nezanesljivosti modela izgube poti, kjer n lahko zavzame vrednosti med 1 in celo preko 4, metoda ni najbolj primerna za ocenjevanje razdalje.

Drugi pristop, ki se pogosto uporablja za ocenjevanje razdalje, je čas potovanja signala med oddajnikom in sprejemnikom (ang. time of arrival, ToA). Metoda najprej oceni čas, v katerem signal prepotuje pot od oddajnika do sprejemnika in le tega pomnoži s hitrostjo potovanja radijskega signala, to je s svetlobno hitrostjo c . Vsaka napaka pri oceni časa potovanja signala privede do napake ocenjene razdalje (na primer 1 ns privede do napake 30 cm), kar pomeni, da morata biti uri v oddajniku in sprejemniku čim bolj sinhronizirani. Za sinhronizacijo radijskih naprav se pogosto uporabljajo sistemi globalnega določanja položaja (ang. global positioning system, GPS). Z laboratorijskimi sprejemniki GPS lahko dosežemo točnost reda velikosti 1 ns, medtem ko je natančnost industrijskih sprejemnikov GPS v redu velikosti 10 ns. Z njimi torej dosežemo točnost meritev v metriskem območju. Metoda ni primerna za naprave IoT, saj so sprejemniki GPS dragi, obenem pa tudi njihova poraba energije ni zanemarljiva.

Problemu sinhronizacije oddajnika in sprejemnika se lahko izognemo z metodo merjenja razdalje v obe smeri (ang. two-way ranging). Metoda je prikazana na Sliki 1. Pobudnik meritve (ang. initiator) pošlje signal ob času t_{i0} do reflektorja (ang. reflector). Reflektor izmeri prihod paketa skladno s svojo uro t_{r0} ter nanj odgovori ob času t_{r1} . Pobudnik sprejme odgovor ob času t_{i1} in nanj ponovno odgovori ob času t_{i2} . Pobudnik v odgovor doda tudi vse svoje izmerjene čase, kar reflektorju omogoči izračun časa preleta (ang. time-of-flight, ToF) po naslednji enačbi:

$$4\tau = (t_{i1} - t_{i0}) - (t_{r1} - t_{r0}) + (t_{r2} - t_{r1}) - (t_{i2} - t_{i1}), \quad (2)$$

Z opisano metodo merjenja razdalje v obe smeri se izognemo sinhronizacijski napaki pri različnem merjenju časa na napravah, vendar je natančnost metode vseeno omejena z natančnostjo meritve časa. Nizko energijske naprave interneta stvari s frekvencami sistemske ure pod 100 MHz lahko v idealnih pogojih merijo čas izven 10 ns, kar se prevede v natančnost merjenja razdalje na 3 m. Čeprav tovrstna metoda izboljša zmožnost določanje razdalje v primerjavi s prejeto močjo signala, je napaka določanja položaja še vedno prevelika za aplikacije interneta stvari.



Slika 1: Dvosmerno merjenje razdalje.

3. Merjenje razdalje z uporabo niza faznih razlik

Časovna informacija o prejetem radijskem signalu ni kodirana le v trenutku prihoda valovne fronte, ampak tudi v nihajih njegove valovne oblike. V tem pogledu je faza prejetega signala preprosto druga predstavitev časa prihoda (ToA). Pri gigaherčnih frekvencah, na primer, ena fazna rotacija 2π traja približno eno nanosekundo. Ker sodobni radijski oddajniki in sprejemniki lahko določijo fazo sprejetega signala z natančnostjo pod eno stopinjo, se to prevede v zmožnost centimetrskega določanja razdalje, kar presega zmožnosti merjenja časa na ravni paketov z nizkocenovno IoT strojno opremo.

Fazo prejetega signala $\phi(f, d)$ lahko izmerimo tako, da prejet signal (tipično sinusne oblike s frekvenco f) primerjamo z referenčnim sinusnim signalom. Ker oddan signal vsebuje naključni fazni zamik ϕ_{off} , so izmerjene vrednosti faze zamaknjene za neznano vrednost: $\phi(f, d) = \frac{2\pi df}{c} + \phi_{off} + (2\pi N)$. Pogosta rešitev je uporaba dvosmernega merjenja razdalje, pri kateri reflektor signal odmevno vrne pobudniku, fazni odmik pa se lahko tako računsko izniči z razliko:

$$\Phi(f, d) = \phi_I(f, d) - \phi_R(f, d) = \frac{4\pi df}{c} + (2\pi N). \quad (3)$$

Dvosmerna rešitev dodatno odpravi tudi problem sinhronizacije ure, podobno kot pri ocenjevanju ToF, zaradi česar omenjeni pristop določanja razdalje tudi ne zahteva sinhronizacije vozlišč. Vendar ena sama nosilna frekvenca ne more enolično določiti razdalje med dvema vozliščema, ker je faza periodična z valovno

dolžino: ista vrednost faze se ponovi vsakih $\lambda = c/f$ metrov. Z uporabo tehnologij v območju 2.4 GHz smo tako omejeni na zmožnost ocenjevanja razdalje v dosegu 12.5 cm. Doseg lahko povečamo, če izkoristimo linearno naraščanje faze signala s frekvenco in izmerimo razliko faz $\Delta\Phi$ med dvema sosednjima frekvencama, ki se razlikujeta za frekvenčni korak $\Delta f = f_1 - f_0$:

$$\Delta\Phi = \Phi(f_1, d) - \Phi(f_0, d), \quad (4)$$

S kombinacijo (3) in (4) lahko dobimo enoznačno oceno razdalje :

$$d = \frac{c}{4\pi} \frac{\Delta\Phi}{\Delta f} + \left(\frac{c}{2\Delta f} N \right). \quad (5)$$

Teoretični doseg metode je odvisen od frekvenčnega koraka Δf , in pri frekvenčnem koraku 1 MHz znaša 150 m, kar pa je sprejemljiva vrednost za večino scenarijev interneta stvari. Opisan pristop merjenja razdalje je znan kot tehnika fazne razlike na več nosilnih frekvencah (ang. multi carrier phase difference, MCPD) in je bil septembra 2024 sprejet v standard tehnologije Bluetooth 6.0.

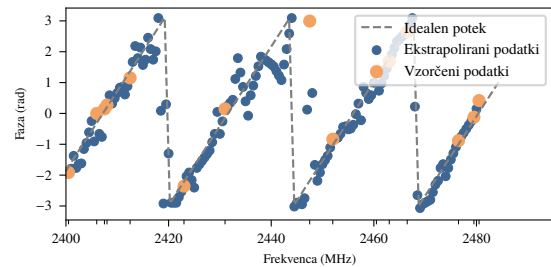
Zaradi motenj v radijskem kanalu, dodanega belega šuma in širjenja radijskega signala po več poteh, ocena prirastka faze $\Delta\Phi$ samo iz dveh meritev ni zanesljiva, zato jo izvajamo na več zaporednih frekvencah, ter iz skupine meritev najdemo naklon fazne razlike, ter iz njega ocenimo razdaljo. Bluetooth standard predlaga meritev faze na vseh komunikacijskih frekvenčnih kanalih, kar pa zmanjšuje čas, ki je na voljo za komunikacijo. Za skrajšanja časa potrebnega za lokalizacijo, lahko uporabimo metodo stisnjenega vzorčenja zasnovano na principu Golombovega ravnila. Golombovo ravnilo je metoda iz teorije števil, ki omogoča da z množico izbranih celih števil in njihovo razliko dobimo vsa cela števila do izbranega največjega celega števila. Na primer, če izberemo množico števil $\{0, 1, 4, 6\}$ lahko z njimi izrazimo vsa cela števila med 0 in 6 ($6 - 4 = 2$, $4 - 1 = 3$ in $6 - 1 = 5$). Če prevedemo to na meritve fazne razlike $\Delta\Phi$, tako z meritvami $\Delta\Phi$ pri frekvencah f_0 , $f_0 + \Delta f$, $f_0 + 4 * \Delta f$ in $f_0 + 6 * \Delta f$ izračunamo vrednosti fazne razlike tudi za vrednosti frekvenc $f_0 + 2 * \Delta f$, $f_0 + 3 * \Delta f$ in $f_0 + 5 * \Delta f$. Pri večjem številu meritev je zmanjšanje števila meritev še bolj očitno, na primer s 16 meritvami $\Delta\Phi$ lahko izračunamo 177 vrednosti $\Delta\Phi$. Seveda se ob tem poveča tudi nivo šuma v ocenjenem poteku faze.

Slika 2 prikazuje primer delovanja izmerjenega niza faz in nakazuje na sledeče izzive:

1. Oddajnik in sprejemnik morata imeti frekvenčno in fazno sinhronizirana nosilna signala.
2. Za dober linearni približek rabimo veliko število meritev. Ker IoT naprave običajno ne podpirajo sočasnega oddajanja/sprejemanja sinusnega signala na več frekvencah/kanalih, metoda zahteva uporabo večih časovnih rež, kar privede do zakasnitev pri merjenju razdalje, zmanjšanju kapacitete sistema in dodatnih, sistematičnih faznih napak zaradi razlike

med nosilnima frekvencama vozlišč.

3. Širjenje radijskega signala po več poteh povzroči nelinearnost pri naraščanju faze sprejetega signala, kar povzroči napake pri oceni razdalje.
4. Odvijanje faze je izredno pomembno za pravilno oceno razdalje. Ob visokem nivoju šuma in več-potnem širjenju radijskega signala lahko privede do napačnih rezultatov.

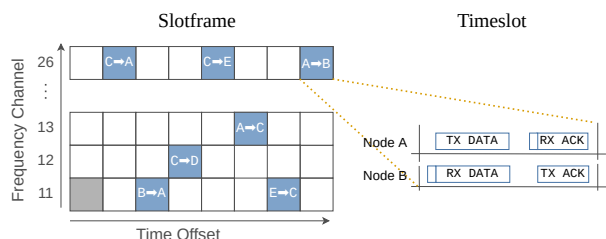


Slika 2: Merjenje razdalje s primerjavo faz niza oddanih in sprejetih signalov.

4. Integracija merjenja razdalje v komunikacijske tehnologije interneta stvari

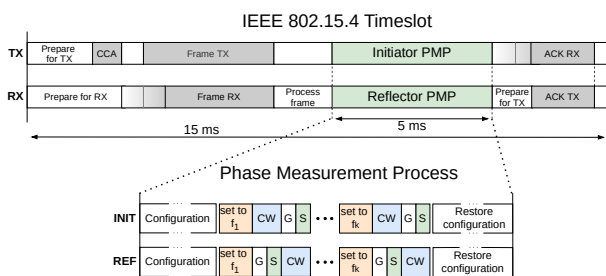
Opisna metoda je zaradi dosega primerna za merjenje razdalj v stavbah in industrijskem okolju, kjer komunikacije med vozlišči pogosto temelji na standardu IEEE 802.15.4 [1], ki določa fizični sloj komunikacijskega protokola za brezžična komunikacijska omrežja z nizkimi prenosnimi hitrostmi v frekvenčnih pasovih ISM in sicer 868 MHz, 900 MHz in 2.4 GHz. Standard IEEE 802.15.4 služi kot osnova protokolov IoT kot so Zigbee, WirelessHART, MiWi, ISA100.11a, Thread, itd. Za oceno razdalje je zanimiv frekvenčni pas ISM 2.4 GHz, kjer standard določa 16 radijskih kanalov frekvenčne širine 2 MHz razmaknjenih za 5 MHz. Ker je frekvenčno področje ISM uporablja vrsta komunikacijskih tehnologij, v industrijskem okolju pa so vir motenj tudi ne-radijska industrijska postrojenja, so standard IEEE 802.15.4 nadgradili z protokolom dostopa do medija (MAC protokola) imenovanega protokol preskakovanja kanala s časovno režo (ang. time slotted channel hopping, TSCH). Protokol prikazuje Slika 3. Časovna reža (ang. timeslot) traja 10 ms. Komunikacija v eni časovni reži je dvosmerna. Najprej se izvrši prenos podatkov med napravama, temu pa sledi prenos povratne informacije, to je potrdite sprejema podatkov (ang. acknowledgement, ACK). Komunikacija med dvema napravama pa poteka na različnih frekvenčnih kanalih. Vrstni red preskakovanja kanalov je določen s protokolom na podlagi liste dovoljenih kanalov, trenutne absolutne številke časovne reže od vzpostavitve omrežja in zamika, ki je enolično določen za vsako povezavo v omrežju.

V standardu IEEE 802.15.4 TSCH seveda ni predvideno merjenje razdalje s pomočjo faznih razlik. V predlagani



Slika 3: Protokol TSCH.

nadgradnji protokola TSCH smo merjenje fazne razlike dodali pred potrditvenim paketom ACK, kot prikazuje Slika 4. Časovno okno merjenja faze je označeno s PMP. V predlagani rešitvi v prvem delu pobudnik sprejema signal, v drugem delu okna ga pa oddaja. V potrditvenem paketu ACK pa reflektor svoje meritve pošlje pobudniku. Tako je v predlagani izvedbi v potrditvenem paketu ACK na voljo manj podatkovnega prostora. V omrežnem skladu mora tudi izvesti več sprememb. Vendar pa se pri tem pristopu podatki izmenjujejo med napravama brez dodatnega prometa. Meritve iz obeh naprav so na voljo pobudniku v eni časovni reži, kar ima za posledico visoko odzivnost in visoko hitrosti osveževanja. Če želimo ohraniti dolžino okna 10 ms se seveda količina prenesenih podatkov o časovni reži zmanjša. Dodatna časovna okna, v katerih ni oddajanja/sprejemanja radijskega signal so v protokol uvedena za čas, ko strojna oprema porabi za prehod iz sprejema v oddajo in vpis/branje izmerjenih podatkov v registre dostopne preko aplikacijskih vmesnikov.

Slika 4: Umestitev merjenja $\Delta\Phi$ v protokol TSCH.

5. Implementacija in primeri uporabe

Postopek merjenja razdalje in spremenjen protokol smo implementirali v protokolnem skladu operacijskega sistema Contiki-NG. Uporabili smo brezžična senzorska vozlišča VESNA [2], opremljena z oddajniki-sprejemniki AT86RF233. Čeprav je časovna reža podaljšana iz 10 ms na 20 ms, lahko naprave z vsakim oddanim paketom določijo medsebojno razdaljo. Za določitev razdalje smo uporabili algoritem ESSR [2], ki določi razdaljo tako da išče maksimalno ujemanje med izmerjeno fazno razliko in idealnim potekom faze pri nerazvitem poteku fazne razlike. Delovaje algoritma smo preizkusili v treh okoljih, zunaj v parku, pri direktni vidljivosti med vozliščema brez močnih odbojev signala, na hodniku, kjer se sig-

Table 1: Napaka ocenjene razdalje v metrih.

	max	med	MAE	σ
Pisarna	0.505	0.341	0.327	0.070
Hodnik	0.479	0.174	0.245	0.084
Park	0.134	0.061	0.054	0.061

nal odbija od tal stropa in sten, in pisarni, v kateri so stenah obešene kovinske table, ki močno odbijajo signal skoraj brez slabljenja signala. Rezultati za pet zaporednih meritev na eni lokaciji so zbrani v Tabeli 1. Točnost razdalje je odvisna od okolja. V parku, kjer ni odbojev dosežemo natančnost nekaj cm, medtem pa v okoljih z veliko odboji in motilni signal na primer Wi-Fi in Bluetooth se napačnost precej zmanjša.

6. Zaključek

V prispevku predstavljamo integracijo metode merjenja razdalje na osnovi faze sprejetega signala v naprave, zasnovane po standardu IEEE 802.15.4 TSCH. Z uporabo tehnik stisnjenega vzorčenja smo bistveno zmanjšali število meritev, s čimer smo skrajšali čas merjenja ter zmanjšali porabo radijskih virov in energije. Predlagane metode smo implementirali na cenovno dostopnih platformah IoT in njihovo delovanje ovrednotili z obsežnimi meritvami v realnih radijskih okoljih. Predstavljena metoda se lahko uporabi tudi v tehnologiji Bluetooth.

Literatura

- [1] "IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks," *IEEE Std 802.15.4-2015 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011)*, pp. 1–709, 2016.
- [2] G. Morano, K. Guan, A. Hrovat, and T. Javornik, "Phase-based distance estimation integrated with ieee 802.15.4 tsch communication," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 11, no. 7, pp. 11 460–11 470, 2024.

Avtorji



Tomaž Javornik je raziskovalni svetnik na odseku za komunikacijske sisteme na Institutu "Jožef Stefan" v Ljubljani in izredni profesor na Mednarodni podiplomski šoli Jožefa Stefana.



Grega Morano je raziskovalni asistent na odseku za komunikacijske sisteme na Institutu "Jožef Stefan" v Ljubljani in doktorski študent na Mednarodni podiplomski šoli Jožefa Stefana.



Andrej Hrovat je višji raziskovalni sodelavec na odseku za komunikacijske sisteme na Institutu "Jožef Stefan" v Ljubljani in izredni profesor na Mednarodni podiplomski šoli Jožefa Stefana.

Valovodi z zračno režo in njihova praktična uporaba

Martin Petek

Politecnico di Torino

martin.petek@polito.it

Gap Waveguides and Their Practical Use

Abstract. Gap waveguides provide an effective solution for high-frequency electromagnetic guiding by enabling wave confinement without electrical contact between metallic surfaces. This work presents an overview of gap waveguide technology, including the underlying physical principles and common practical implementations. Groove and ridge gap waveguides are discussed, together with electromagnetic bandgap realizations based on pin-type and hole-type periodic structures. For pins, design guidelines are outlined, and dispersion-based analysis is highlighted as an efficient tool for unit-cell optimization compared to full-wave simulations. The proposed methodology is validated using full-wave simulations, where scattering parameters and field distributions demonstrate effective confinement within the waveguide channel over the 20–30 GHz frequency range.

1. Uvod

Sodobni komunikacijski sistemi se vse bolj pomikajo proti višjim delovnim frekvencam, kar je posledica potrebe po večji pasovni širini in večjih podatkovnih hitrostih. Ta trend postavlja stroge zahteve pred antenske tehnologije ter spodbuja razvoj novih vodilnih in sevalnih struktur, ki so sposobne ohraniti nizke izgube in visoko zmogljivost v milimetrskem in subteraherčnem frekvenčnem območju. Med nedavno uvedenimi rešitvami se je tehnologija valovodov z zračno režo uveljavila kot obetavna alternativa klasičnim kovinskim valovodom [1], [2]. V nasprotju s tradicionalnimi valovodi zračnoredni valovodi omogočajo vodenje elektromagnetnih valov znotraj vodilnega kanala brez potrebe po električnem stiku med kovinskimi površinami. To zadrževanje polja se doseže z obdajanjem območja propagacije s periodičnimi strukturami, ki ustvarijo elektromagnetno prepovedano pasovno območje, s čimer se prepreči uhajanje valovanja [3]. Od svoje uvedbe so valovodi z zračno režo deležni velike pozornosti in so se široko uveljavili v visokofrekvenčnih aplikacijah. Zlasti so našli obsežno uporabo v antenskem inženirstvu, vključno z izvedbo visoko zmogljivih rešetkastih antenskih polj z režami v valovodu.

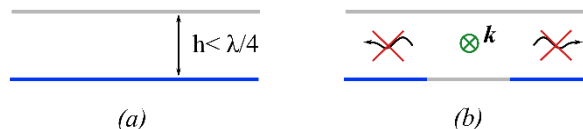
Valovod z zračno režo je mogoče realizirati z različnimi tehnološkimi pristopi, odvisno od ciljne aplikacije, frekvenčnega območja in proizvodnih omejitev. Med najpogostejšimi izvedbami so popolnoma

kovinske konfiguracije, večslojne strukture ter rešitve, osnovane na tehnologiji tiskanih vezij. V vseh primerih vodilni mehanizem temelji na periodičnih elementih, ki so zasnovani tako, da zavirajo vzporedne ploščne načine in ustvarijo učinkovito elektromagnetno prepovedano pasovno območje. Geometrija in razporeditev teh periodičnih elementov se lahko prilagodi specifičnim zahtevam načrtovanja. Na splošno se uporabljata dve glavni kategoriji periodičnih struktur: strukture s stebrički [3], pogosto imenovane »bed-of-nails«, ter geometrije z luknjami [4], ki so običajno realizirane kot periodične perforacije v kovinskih ploščah. Poleg teh osnovnih konfiguracij so bile predlagane tudi hibridne oziroma sestavljene periodične strukture, ki združujejo različne tipe elementov z namenom dodatnega izboljšanja pasovne širine, izotropnosti ali proizvodne prilagodljivosti.

V tem delu preučujemo in primerjamo delovanje valovodov z zračno režo, izvedenimi s stebrički in luknjami. Podamo tudi začetne točke za praktično načrtovanje zračnorednih valovodov s stebrički in v simulacijah preverimo njihovo delovanje.

— Popolni električni prevodnik

— Popolni magnetni prevodnik



Slika 1. (a) Dve paralelni plošči PEC in PMC in (b) Osnovni model valovoda z zračno režo.

2. Fizikalno ozadje

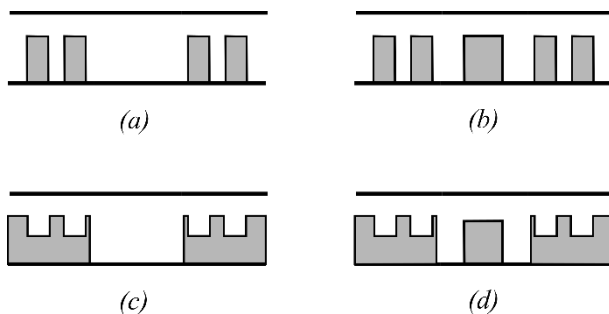
Pogosta izhodiščna točka za razlago delovnega principa valovodov z zračno režo je idealiziran model, ki ga sestavlja popolni električni prevodnik (PEC), ki tvori zgornjo ploščo, in popolni magnetni prevodnik (PMC), ki tvori spodnjo ploščo, kot prikazano na Sliki 1(a). V takšni konfiguraciji je vrednost propagacijske konstante kompleksna, kadar je razdalja med obema ploščama (višina zračne reže) manjša od četrte valovne dolžine [1]. Posledično so elektromagnetni valovi v tem primeru dušeni in širjenje znotraj območja vzporednih plošč je onemogočeno.

Če pa se lokaliziran del spodnje površine spremeni iz PMC v PEC, je v tem območju mogoče vzpostaviti razširjanje valov. Širjenje je tako omejeno na ta kanal tipa PEC–PEC, medtem ko okoliška območja PMC–PEC ostanejo pod mejno frekvenco, kar učinkovito preprečuje bočno uhajanje polja in omogoča nadzorovano vodenje elektromagnetnega vala. Ker materiali PMC v naravi ne obstajajo, je rešitev v inženirskem načrtovanju

periodične strukture, ki doseže enakovreden učinek. Posamezen periodični element se imenuje osnovna celica.

Ena najpogostejše uporabljenih vrst osnovnih celic v tehnologiji valovodov z zračno režo – in tudi tista, ki je bila prvotno predlagana za njihovo realizacijo – temelji na periodičnih elementih v obliki stebričkov. V tej konfiguraciji so kovinski stebrički nameščeni na spodnji plošči. Med njimi se oblikuje valovodni kanal, po katerem se lahko vodi želeni valovodni način. Na sliki 2(a) je prikazan tako imenovani utorni valovod z zračno režo, ki predstavlja analog klasičnega pravokotnega kovinskega valovoda. Sorodna konfiguracija je grebenski valovod z zračno režo, realiziran s stebrički, katerega osnovna geometrija je prikazana na sliki 2(b).

Poleg izvedb na osnovi stebričkov je mogoče valovode z zračno režo izvesti tudi z uporabo periodičnih struktur tipa odprtini. V tem primeru periodična rešetka odprtini nadomesti stebričke in ustvari elektromagnetno prepovedano pasovno območje. Reprezentativen primer utornega valovoda z zračno režo, izvedenega z odprtinami, je prikazan na sliki 2(c), medtem ko je ustrezeni grebenski valovod z zračno režo, realiziran z luknjami, prikazan na sliki 2(d). V praksi valovodi z zračno režo na osnovi lukenj delujejo z minimalno možno režo (z drugimi besedami, zgornja plošča je v stiku s spodnjo). Njihovo načrtovanje zahteva dodatno pozornost pri praktični izvedbi, zlasti za preprečevanje pretvorbe načinov ali Braggovega sipanja, kot je opisano v [6].

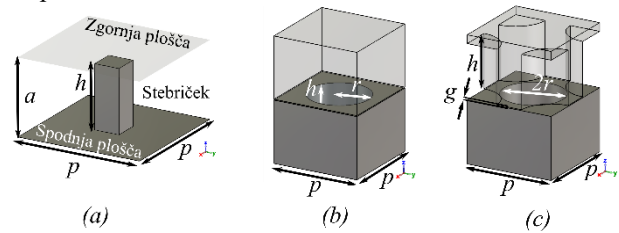


Slika 2: Različni tipi zračnorežnih valovodov. Izvedba s stebrički: (a) utorni in (b) grebenski. Izvedba z luknjami: (c) utorni in (d) grebenski.

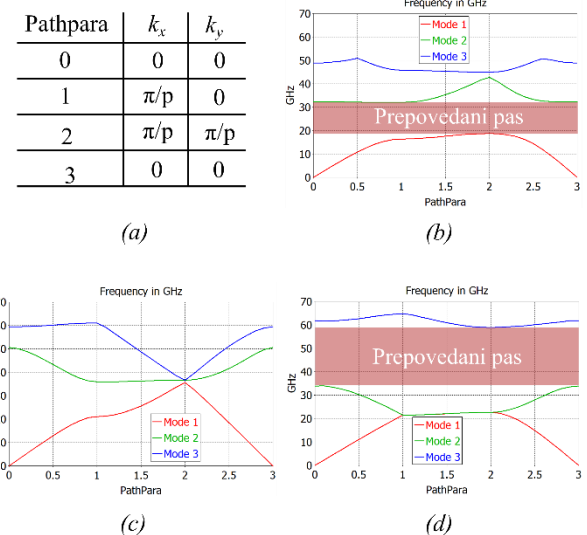
3. Pogoste vrste osnovnih celic

Na sliki 3 so prikazane tri vrste osnovnih celic, analizirane v tem delu. Zaradi boljše preglednosti zgornja plošča na slikah ni prikazana. Slika 3(a) prikazuje kvadratni stebriček ter njegove določilne geometrijske parametre: razdaljo med zgornjo in spodnjo ploščo a , višino stebrička h , njegovo širino w in periodo p . Slika 3(b) prikazuje periodično strukturo z luknjami krožne oblike, ki so izvrtane zgolj v spodnji plošči. Druga vrsta luknjaste strukture je prikazana na sliki 3(c). Ta struktura ima drsno simetrijo, kar pomeni da ima poleg lukenj v spodnji plošči tudi luknje v zgornji plošči, ki so umeščene v središča oglišč kvadrata (gleddajoč od zgoraj) [4]. Tako je nespremenljiva glede na premik za polovico periode v smereh x in y ter zrcaljenje, kar je ključna lastnost drsne simetrije. Obe strukturi z luknjami imata globino luknje

h , razmik med zgornjo in spodnjo ploščo g ter polmerom odprtine r .



Slika 3. Različne osnove celice: (a) stebriček, (b) luknje in (c) drsno-simetrične luknje.



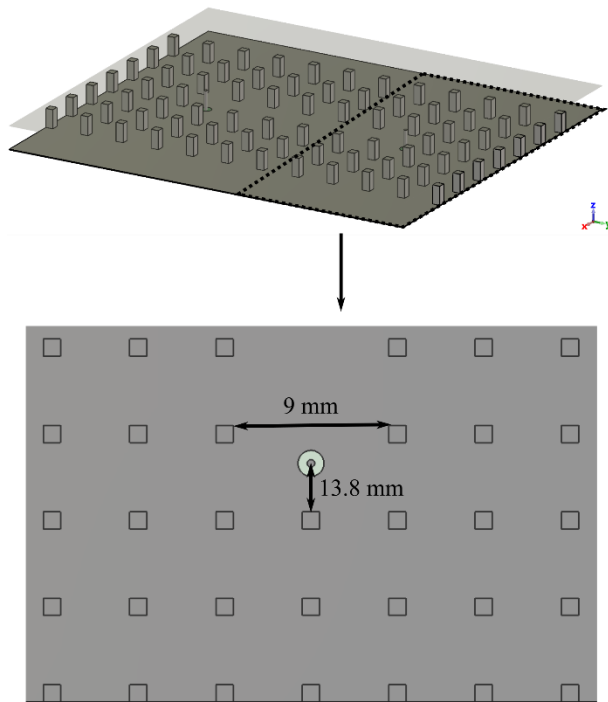
Slika 4. (a) Definicija parametra pathpara (a) in (b) disperzijski diagram strukture s stebrički, (c) uknjami in (d) drsno simetrični luknjami.

V nadaljevanju obravnavamo začetno oceno delovanja posameznih osnovnih celic. Ta se običajno izvede z uporabo periodičnega reševalnika lastnih vrednosti. Tak reševalnik določi vse možne rodove elektromagnetnega polja, ki brez zunanjega vzbujanja zadoščajo Maxwellovim enačbam. Rezultati so prikazani v disperzijskem diagramu, kjer je na navpični osi frekvenca, na vodoravni osi pa valovni vektor. Ker gre za periodične strukture, je treba predpisati komponente valovnega vektorja, za katere se iščejo rešitve. Za strukture z dvema ravninama zrcalne simetrije in s 90-stopinjsko rotacijsko simetrijo je pot v prostoru valovnega vektorja prikazana na sliki 4(a). V ta namen uvedemo parameter *Pathpara*, ki hkrati določa obe komponenti valovnega vektorja. Podrobnejše smernice za ustrezno definicijo poti valovnega vektorja so podane v [6].

Disperzijski diagram za strukturo s stebrički pri $w = 1$ mm, $h = 2,5$ mm, $p = 5$ mm in $a = 3$ mm je prikazan na sliki 4(b). Pri načrtovanju valovodov z zračno režo je najpomembnejša značilka delovanja tako imenovano celotno elektromagnetno prepovedano pasovno območje, tj. pas frekvenc, v katerem ne obstajajo nobene dovoljene rešitve. Če se ta osnovna celica uporabi v konfiguraciji, prikazani na sliki 2(a), je elektromagnetno valovanje omejeno na valovodni kanal v frekvenčnem pasu med 18,8 in 31,9 GHz. Na splošno se strukture s stebrički

izkažejo za zelo učinkovite in zagotavljajo visoko dušenje v prepovedanem pasu, ki se ga naprimer lahko izračuna z metodami predstavljenimi v [7].

Rezultati za strukturo z odprtini, prikazano na sliki 3(b), pri $p = 5$ mm, $h = 3$ mm, $r = 1,75$ mm in $g = 50$ μ m so podani na sliki 4(c). Opažamo, da je delovanje te strukture nezadovoljivo, saj je njeno prepovedano območje preozko, zaradi česar ni primerna za uporabo v valovodih z zračno režo. To pomanjkljivost je mogoče odpraviti z dodatnimi luknjami v zgornji plošči, tako da struktura postane drsno simetrična. Za enake vrednosti geometrijskih parametrov je pripadajoči disperzijski diagram prikazan na sliki 4(d). Ta osnovna celica izkazuje izrazito prepovedano pasovno območje med 34 in 58,8 GHz.



Slika 5. 3D pogled valovoda z zračno režo in vzbujevalne strukture.

4. Izvedba valovoda

V nadaljevanju predstavimo praktični postopek načrtovanja za primer struktur s stebrički. Kot začetno izhodišče za ciljno frekvenco f najprej izračunamo pripadajočo valovno dolžino λ . Za strukture s stebrički lahko začetne vrednosti geometrijskih parametrov izberemo kot:

$$h_{\text{začetni}} = \frac{\lambda}{4} \quad (1)$$

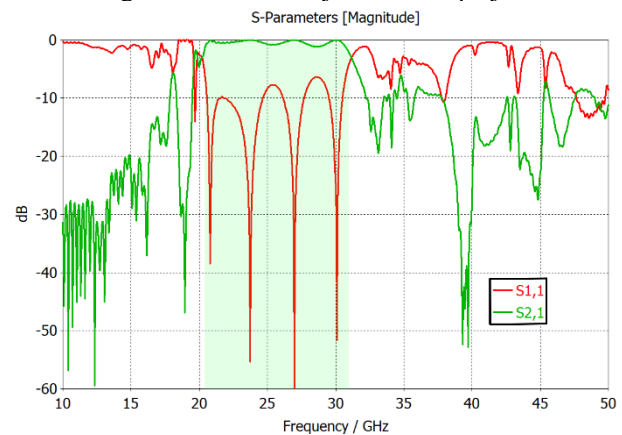
$$p_{\text{začetni}} = \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

Vrednosti, podane v enačbah (1) in (2), predstavljajo zgolj grobo izhodišče. Nato se parametri prilagajajo tako, da se sredina elektromagnetnega prepovedanega pasu ujema s ciljno frekvenco. Širino valovodnega kanala lahko v začetni fazi izberemo enako standardni širini ustreznega klasičnega valovoda.

Ko je osnovna celica ustrezno načrtovana in je njeno elektromagnetno prepovedano pasovno območje primerno, sledi simulacija celotne vodilne strukture z polnovalovnim reševalnikom. Na tej stopnji je treba

posebno pozornost nameniti vzbujujanju valovodnega kanala, da se zagotovi primerno uglasitev. Strategija vzbujujanja je odvisna od konkretne vrste valovoda z zračno režo in od geometrije vodilnega kanala.

Primer strukture valovoda z zračno režo je prikazan na sliki 5. V tej zasnovi so na vsaki strani valovodnega kanala uporabljene tri vrste periodičnih elementov v obliki stebričkov. V večini praktičnih primerov je takšno število vrst zadostno za zagotovitev močne elektromagnetne omejitve polja in



Slika 6. Simulacija S-parametrov strukture iz slike 5.

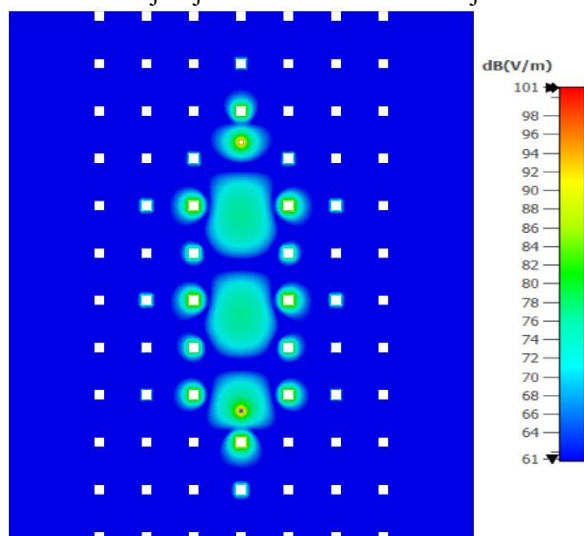
učinkovito dušenje bočnega uhajanja. Struktura je vzbujevalna s preprostim prehodom iz koaksialnega voda v valovod z zračno režo, pri katerem je notranji vodnik koaksialnega priključka neposredno povezan z zgornjo kovinsko ploščo. Vzbujevalni element je nameščen na optimirani razdalji od zadnje stene valovoda z zračno režo, da se doseže čim boljše impedančno prilagajanje in minimalni odboji v interesnem frekvenčnem pasu.

Izračunani sipalni parametri predlagane strukture so prikazani na sliki 6. Označeno frekvenčno območje ustreza obratovalnemu pasu valovoda z zračno režo, ki leži znotraj prepovedanega pasu okoliške periodične strukture. V tem frekvenčnem območju prenosni koeficient S_{21} ostaja razmeroma visok, kar kaže na učinkovito širjenje elektromagnetnega vala vzdolž predvidenega vodilnega kanala, medtem ko je elektromagnetno uhajanje učinkovito zavrto. Izven tega pasu se opazi izrazito poslabšanje prenosa zaradi odsotnosti ustrezne elektromagnetne omejitve. To se tudi vidi v primerjavi absolutne vrednosti elektromagnetnega polja. V sliki 7 je predstavljen pri 22.5 GHz, kar je znotraj prepovedanega pasu. V sliki 8 je predstavljen pri 50 GHz. Pri zadnjem polje očitno uhaja iz kanala, kar se tudi vidi v S-parametrih na sliki 6.

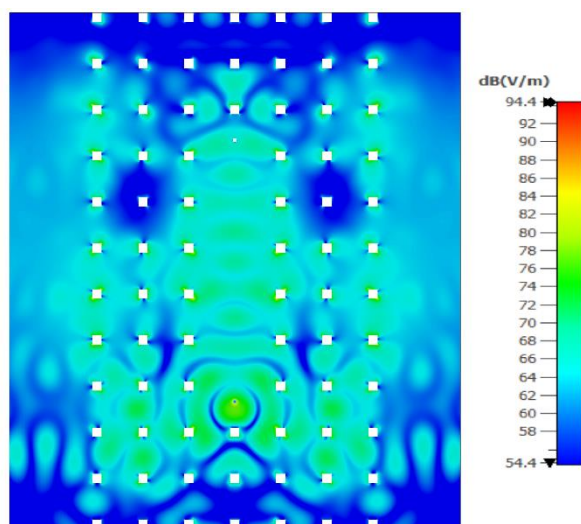
Odbojni koeficient S_{11} je v glavnem določen z lastnostmi prehoda iz konektorja v valovod. Nadaljnje zmanjšanje odbojev in izboljšanje celotnega prilagajanja bi bilo mogoče doseči z natančnejšo optimizacijo geometrije napajalnega elementa, vključno z njegovim položajem, dimenzijami in obliko prehoda.

Nazadnje velja poudariti, da je spreminjanje ali optimizacija parametrov osnovne celice neposredno na ravni celotne polnovalovne strukture, prikazane na sliki 6, računsko lahko precej zamudno. Kot ponazoritveni primer velja, da polnovalovni izračun sipalnih parametrov, prikazanih na sliki 6, na prenosnem

računalniku s 16 GB delovnega pomnilnika in procesorjem Intel i7-1165G7 pri 2,8 GHz zahteva približno 243 s (približno 4 minute). Nasprotno pa izračun ene same točke v disperzijskem diagramu z uporabo lastnovrednostnega reševalnika zahteva le približno 7 s. Ker se v večini primerov lege (vrednosti pathpara) robov prepovedanega pasu ob manjših geometrijskih spremembah ne spreminjajo, je pogosto dovolj izračunati zgolj minimalno in maksimalno frekvenc. To pomeni, da je optimizacijo osnovne celice mogoče izvesti z lastnovrednostnim reševalnikom, ki izračuna le dve pathpara vrednosti disperzijskega diagrama. Posledično se skupni čas simulacije lahko zmanjša iz več minut na nekaj sekund. V obravnavanem primeru na primer s 4 minut na 14 s, kar predstavlja bistveno izboljšanje učinkovitosti načrtovanja.



Slika 7. Simulacija električnega polja pri 22.5 GHz.



Slika 8. Simulacija električnega polja pri 50 GHz.

5. Zaključek

V tem delu smo predstavili valovode z zračno režo različnih izvedb. Predstavili smo preprost postopek za načrtovanje in demonstrirali preprečevanje uhajanja elektromagnetnih valov znotraj načrtovanega pasu.

6. Literatura

- [1] P. -S. Kildal, E. Alfonso, A. Valero-Nogueira and E. Rajo-Iglesias, "Local Metamaterial-Based Waveguides in Gaps Between Parallel Metal Plates," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 84-87, 2009
- [2] P. -S. Kildal, "Three metamaterial-based gap waveguides between parallel metal plates for mm/submm waves," 2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation, Berlin, Germany, 2009, pp. 28-32.
- [3] E. Rajo-Iglesias and P.-S. Kildal, "Numerical studies of bandwidth of parallel-plate cut-off realised by a bed of nails, corrugations and mushroom-type electromagnetic bandgap for use in gap waveguides," *IET Microw., Antennas Propag.*, vol. 5, no. 3, pp. 282–289, Feb. 2011.
- [4] M. Ebrahimpouri, E. Rajo-Iglesias, Z. Šipuš, and O. Quevedo-Teruel, "Cost-effective gap waveguide technology based on glide-symmetric holey EBG structures," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 66, no. 2, pp. 927–934, Feb. 2018.
- [5] D. Zarifi, A. Farahbakhsh, A. U. Zaman, and P.-S. Kildal, "A high gain ridge gap waveguide fed slot antenna array for 60 GHz applications," in *Proc. 10th Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP)*, Davos, Switzerland, Apr. 2016, Art. no. 7481703.
- [6] J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn, and R. D. Meade, "Photonic Crystals: Molding the Flow of Light," 2nd ed. Princeton, NJ, USA: Princeton Univ. Press, 2008.
- [7] M. Petek, J. A. T. Vázquez, G. Valerio, F. Mesa, O. Quevedo-Teruel and F. Vipiana, "On the Brillouin Zones of Glide-Symmetric Structures," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2025

O avtorju



Martin Petek je leta 2017 diplomiral iz elektrotehnike na Univerzi v Ljubljani, Slovenija, leta 2020 pa je magistriral iz elektrofizike na KTH Royal Institute of Technology v Stockholmu na Švedskem. Leta 2025 je končal doktorski študij na Oddelku za elektroniko in telekomunikacije (DET) na Politecnico di Torino v Torinu v Italiji, kjer je trenutno zaposlen kot postdoktorski raziskovalec. Trenutno raziskuje različne numerične tehnike za periodične strukture in višje simetrije v elektromagnetiki.

Detekcija in sledenje v radarskih sistemih

Leon Kocjančič

Hensoldt, United Kingdom

leon.kocjancic@hensoldt.net

Detection and Tracking in Radar Systems

Abstract. This paper outlines the fundamental radar detection theory in the context of surface search radars for naval applications. An emphasis is given to the sea clutter modelling and its practical mitigation utilising moving target indication (MTI) approach. The paper concludes with a review of track-before-detect (TBD) techniques which address the main limitation of MTI systems.

1. Uvod

Prispevek obravnava osnove detekcije v sodobnih 2-dimenzionalnih radarskih sistemih v kontekstu površinskih sistemov za ladijske platforme. Bolj podrobno je predstavljena teorija modeliranja morske površine ter njen vpliv na zaznavo v obliki šuma okolja. Sodobni navigacijski radarski sistemi, ki so povsem koherentni, za izboljšanje zaznave uporabljajo Dopplerjev pomik. Ker je Dopplerjev pomik odvisen zgolj od radialne komponente hitrosti se za zaznavo mirujočih ali tangentno pomikajočih se tarč uporablja posebne izvedbe algoritmov sledenja pred detekcijo (ang. track-before-detect). Tovrstni algoritmi za sledenje so računsko zelo zahtevni, kar narekuje uporabo bolj učinkovitih algoritmov kontrole lažnega alarma (ang. false alarm rate) pred samo izvedbo sledenja.

2. Površinski radarski sistemi

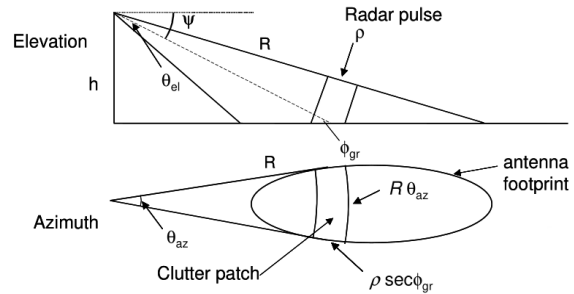
Površinski radarski sistemi so 2-dimenzionalni sistemi, ki se na ladijskih platformah uporabljajo predvsem za navigacijo. Za njihovo certifikacijo skrbi Mednarodna pomorska organizacija (ang. International Maritime Organisation ali IMO).

Najpogostejše so opremljeni z valovodno režasto anteno, ki oddaja glavni snop v obliki pahljače. Horizontalna širina snopa je tipično cca. 1° in vertikalna pa od 15° do 20° . Tako antena ohrani visoko resolucijo v smeri azimuta, hkrati pa detekcija ni občutljiva na rotacijo platforme okrog prečne osi. Slika 1 prikazuje osvetlitev površine, ki jo povzroči snop antene, in jo izrazimo kot

$$A_c = \alpha \rho R \theta_{az} \sec(\phi_{gr}) \quad (1)$$

kjer α predstavlja faktor oblike radarskega pulza in oblike osvetlitve, ρ je resolucija v dimenziji dolžine, R je

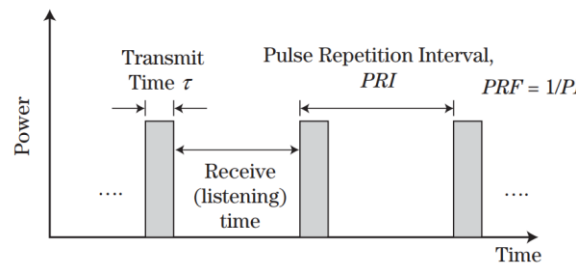
dolžina, θ_{az} je resolucija v dimenziji azimuta in ϕ_{gr} je vpadni kot osvetlitve (ang. grazing angle).



Slika 1: Projekcija snopa antene na površino, vir: S. Greco.

Radar tipično oddaja koherentne pulze s ponavljajočim intervalom PRI, torej je frekvenca vzorčenja okolja določena kot $PRF = 1/PRI$ (ang. pulse repetition interval, pulse repetition frequency), kar prikazuje slika 2. Maksimalna razdalja znotraj katere lahko nedvoumno lociramo tarčo je

$$R_{max} \leq \frac{c \cdot PRI}{2} = \frac{c}{2 \cdot PRF} \quad (2)$$



Slika 2: Prikaz koherentnih radarskih pulzov z enakomernimi intervali, vir: [1].

Za frekvenco vzorčenja okolja velja Nyquistov teorem, torej je največji Dopplerjev pomik, ki ga lahko nedvoumno določimo

$$PRF_{min} = 2f_{d,max} = \frac{4V_{r,max}}{\lambda} \quad (3)$$

kjer $f_{d,max}$ predstavlja Dopplerjev pomik. Dodatna karakteristika, ki je pomembna za detekcijo, je število vzorcev tarče, oziroma koliko pulzov je med rotacijo antene zadelo tarčo. To izrazimo kot

$$n = \frac{T}{PRI} = \frac{\theta_{az} \cdot 60 \cdot PRF}{360^\circ} \quad (4)$$

Torej so osnovne nastavitve pulznega koherentnega radarja zaradi frekvence vzorčenja kompromis med maksimalno nedvoumno dolžino zaznave ter

maksimalno nedvoumno hitrostjo tarče. Dodaten kompromis predstavljata horizontalna širina snopa antene ter hitrost vrtenja antene. Večja hitrost vrtenja antene omogoča hitrejšo osveževanje slike, kar izboljša zanesljivost sledenja, po drugi strani pa ožji snop antene in hitrejša rotacija zmanjšujeta število vzorcev tarče, kar poslabša frekvenčno resolucijo sistema.

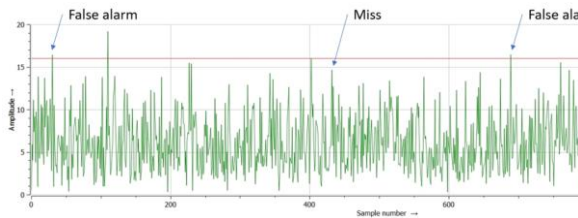
Za monostatični sistem lahko zastavimo preprosto enačbo sprejete moči radarskega signala

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma F^4}{(4\pi)^3 R^4} \quad (5)$$

kjer je P_t oddajna moč (tipično med 100W in 300W), G so sistemske ojačitve ter ojačitev antene, σ je radarski presek tarče in F je faktor propagacije. Nekoliko razširjena enačba se v računalniških modelih uporablja za predikcijo zmogljivosti določenega radarskega sistema, kjer v izračun vstopa kot razmerje signala in šuma. Kot primer bomo v naslednjem odstavku podali izračun verjetnosti detekcije, kakršen je implementiran v programskem paketu Computer-Aided Radar Performance Evaluation Tool (CARPET), ki se v industriji uporablja za predikcijo detekcije [2].

3. Osnove detekcije

V tem poglavju si bomo ogledali izračun detekcije amplitude na podlagi enojne radarske osvežitve slike, t.j. enkratne rotacije antene. Radarska slika je sestavljena iz posameznih radarskih celic, kjer moramo za vsako celico opraviti statistični test prisotnosti tarče. Vsaka celica bo vsebovala termalni šum ter verjetno tudi šum okolja (ang. clutter), kar je v literaturi določeno kot nulta hipoteza [2]. V kolikor je tarča prisotna, bo radarska celica vsebovala tudi odboj od tarče, statistično gledano je to alternativna hipoteza. Predpostavimo tudi možnost, da bo odboj od okolice (t.j. šum okolja) včasih dosegel moč odboja od tarče, kar bomo poimenovali kot lažni alarm (ang. false alarm), prikazano na sliki 3.



Slika 3: Amplituda sprejetega radarskega signala, ki prikazuje lažni alarm ter zgrešeno tarčo, vir: TNO.

Torej, ob znani gostoti verjetnosti šuma ter tarče želimo poiskati verjetnost detekcije, tako da bo verjetnost lažnega alarma konstantna, tipično $P_{fa} = 10^{-4}$.

Lažni alarm bomo definirali po Marcumu, torej čas lažnega alarma t_{fa} ustreza časovnemu intervalu, v katerem je verjetnost lažne detekcije 0.5. Verjetnost lažnega alarma je inverzna konstanti lažnega alarma

$$P_{fa} = \frac{1}{N_{fa}} \quad (6)$$

kjer je konstanta lažnega alarma določena kot

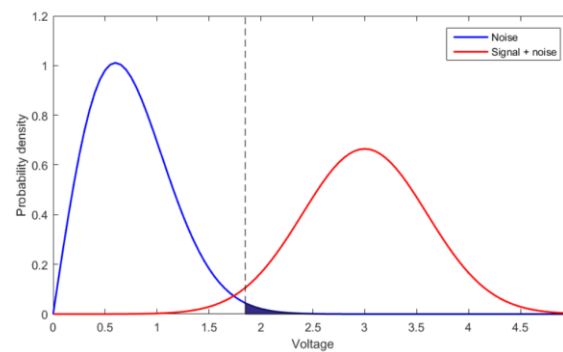
$$N_{fa} = PRF \cdot N_{rq} \cdot t_{fa} \quad (7)$$

Drugi faktor predstavlja število neodvisnih radarskih celic v dimenziji dolžine, kar izračunamo kot

$$N_{rq} = \frac{R_{max}}{\tau_{res}} = \frac{R}{c/(2B)} \quad (8)$$

kjer B predstavlja pasovno širino linearno moduliranega radarskega signala.

V splošnem bo detekcija odvisna od razmerja signala in šuma (SNR) ter od gostote verjetnosti šuma in signala za posamezne vrednosti amplitud. Nivo detekcije, kot prikazuje Slika 4 s prekinjeno vertikalno črto, bomo določili tako, da ustreza verjetnosti lažnega alarma (na sliki označen s temno barvo).



Slika 4: Gostota verjetnosti amplitude signala ter šuma, vir: TNO.

Za kvadratni komponenti I in Q bomo v tem preprostem primeru predpostavili normalno porazdelitev, kar definira skupni model termalnega šuma ter šuma okolja. Amplitudo v tem primeru izračunamo kot

$$a = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (9)$$

kar je naključna spremenljivka z Rayleigh gostoto verjetnosti

$$f(a; \sigma) = \frac{a}{\sigma^2} e^{-a^2/(2\sigma^2)}, a \geq 0 \quad (10)$$

kjer σ^2 predstavlja varianco amplitude kvadraturnih signalov. Za porazdelitev faze uporabimo uniformno verjetnostno gostoto

$$f(\phi) = \frac{1}{2\pi}, 0 < \phi \leq 2\pi \quad (11)$$

Kumulativna porazdelitev Rayleigh gostote verjetnosti je

$$F(a; \sigma) = 1 - e^{-a^2/(2\sigma^2)}, a \geq 0 \quad (12)$$

Za določen nivo detekcije Y_b in določeno število integriranih radarskih pulzov, ki so v primeru šuma nekoherentni, je verjetnost lažnega alarma določena kot

$$P_{fa} = 1 - \Gamma(N_b, Y_b) \quad (13)$$

kjer je nepopolna gama funkcija definirana kot

$$\Gamma(N, Y) = \int_0^Y \frac{e^{-u} u^{N-1}}{\Gamma(N)} du, N > 0$$

$$\Gamma(N, Y) = 1, N = 0$$
(14)

S podanimi enačbami smo definirali nivo detekcije, ki je potreben za doseganje v naprej določenega lažnega alarma. Nivo detekcije lahko sedaj uporabimo, da izračunamo verjetnost detekcije tarče, v kolikor je gostota verjetnosti odbojev od tarče znana. V radarskih sistemih se najpogosteje uporabljajo definicije fluktuacije amplitude signala odbitega od tarče, ki jih je definiral Swerling. Swerling 0 predstavlja tarčo brez fluktuacije. Swerling 1 in 2 predstavljata tarčo brez dominantnega RCS odboja ter brez fluktuacije v prvem in fluktuacijo med pulzi v drugem primeru. Swerling 3 in 4 predstavljata tarčo z dominantnim RCS odbojem ter brez fluktuacije v prvem in fluktuacijo med pulzi v drugem primeru. Uporabili bomo sledeče pomožne funkcije

$$\begin{aligned} a &= 1/(1 + x) \\ b &= 1/(1 + N_b x) \\ c &= 1/(1 + x/2) \\ d &= 1/(1 + N_b x/2) \end{aligned}$$
(15)

kjer x predstavlja povprečno oz. pričakovano razmerje signala in šuma

$$x = \frac{P_t}{P_n + P_{cs} + P_{vc} + P_j}$$
(16)

indeks n zaznamuje termalni šum, cs je površinski šum okolja (valovanje morja ali razgibanost terena), vc je volumetrični šum okolja (npr. dež) in j je rezultat namernih motenj (ang. jamming). V primeru Swerling 0 in $Y_b \geq N_b(x + 1)$ je verjetnost detekcije

$$P_d = e^{N_b x} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{N_b x k}{k!} [1 - \Gamma(N_b + k, Y_b)]$$
(17)

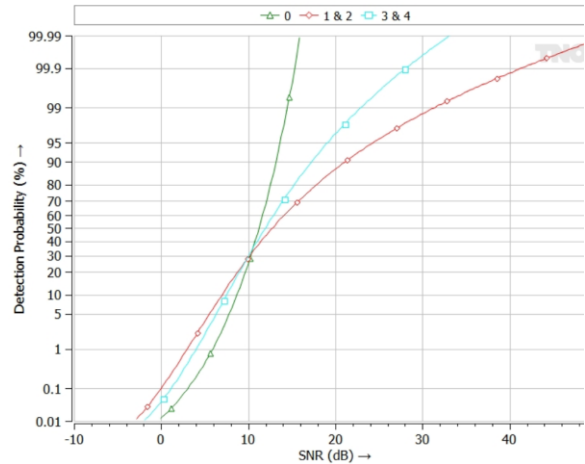
Preostale primere fluktuacije bomo izpustili, so pa bralcu na voljo v [2]. V primeru sprejema samo enega pulza, se formule verjetnosti poenostavijo. Za Swerling 1 in 2

$$P_d = \exp\left(\frac{\ln P_{fa}}{1+x}\right)$$
(18)

in za Swerling 3 in 4

$$P_d = \left(1 - \frac{2 \ln P_{fa}}{1+x}\right) \cdot \exp\left(\frac{2 \ln P_{fa}}{1+x}\right)$$
(19)

Verjetnosti detekcije za vse Swerling primere pri integraciji enega pulza in $P_{fa} = 10^{-6}$ so prikazane na Sliki 5.

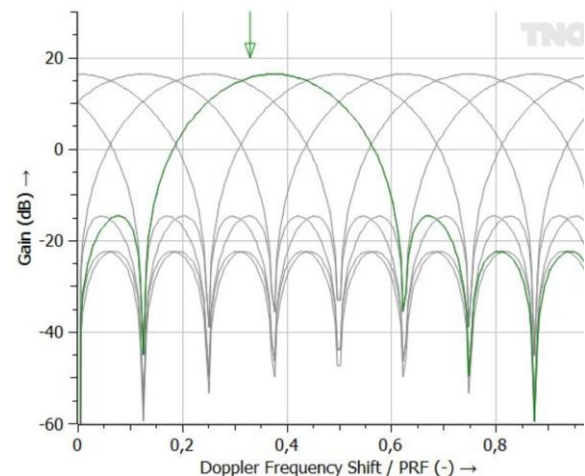


Slika 5: Verjetnost detekcije tarče pri integraciji enega pulza, vir: TNO.

Tipični MTI radar najprej prejeti IQ signal filtrira v n diskretnih frekvenčnih kanalov, kjer število kanalov pogojuje formula (4). Tako bodo signali, ki pripadajo določenemu frekvenčnemu kanalu ustrezali Doppler pomiku tarče in šuma okolice s hitrostjo v_r , približno omejeni kot

$$-\frac{\lambda \cdot PRF}{4} < v_r < \frac{\lambda \cdot PRF}{4}$$
(20)

Upoštevati pa moramo, da frekvenčni kanali nimajo stopničaste spektralne gostote, ampak bo prisotno uhajanje energije med posameznimi kanali, kot to prikazuje Slika 6 za 8-kanalni filter. Dodatno moramo pri tem upoštevati model spektralne porazdelitve šuma okolja, kjer se najpogosteje uporablja normalna porazdelitev v frekvenčnem prostoru. Po frekvenčni ločitvi MTI radar opravi postopek detekcije neodvisno na vsakem posameznem kanalu, na izhodu so nato frekvenčni kanali združeni v radarsko sliko.



Slika 6: Tipični 8 kanalni frekvenčni filter, vir: TNO.

4. Statistični modeli morja

Za doseganje robustne kontrole lažnega alarma se Rayleigh gostota verjetnosti (oz. eksponentna za kvadratni detektor) izkaže kot nezadosten model odbojnosti površine morja. Predvsem je težava v tem, da

so večje amplitude utežene s premajhno verjetnostjo, kar prikazuje Slika 7. V praksi je to rezultat vzvalovanega morja z lomljenjem valov, ki se na radarju pokažejo kot lažne tarče. Za pulzne in sintetične radarje je v praksi za moč odbojev najpogostejše uporabljena K-gostota verjetnosti, ki je sestavljena iz dveh delov [3]. Prvi del modelira teksturo morja oz. večje valove in je opisan z gama gostoto verjetnosti

$$P(x) = \frac{b^v}{\Gamma(v)} x^{v-1} e^{-bx}, v, b > 0 \quad (21)$$

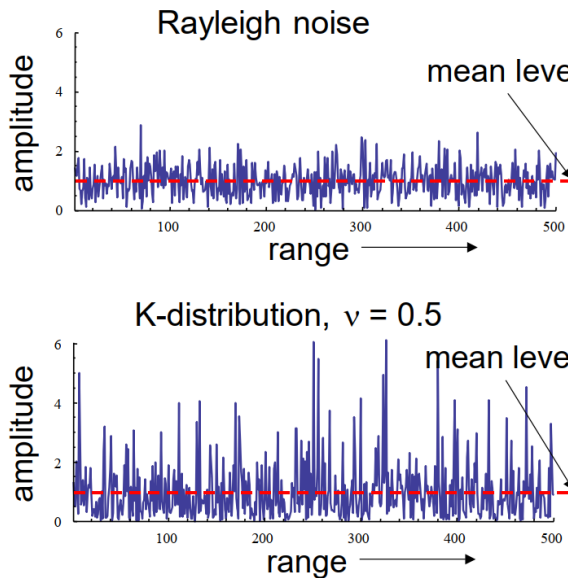
s parametroma oblike, v , in veličine, b . Drugi del sestavljene gostote verjetnosti predstavlja manjše kapilarne valove, ki so superpozicionirani na teksturo. Končno verjetnost izračunamo kot verjetnost kapilarnih valov pogojeno na verjetnost teksture, ki določa srednjo vrednost kapilarnih valov, torej

$$P(Z) = \int_0^\infty P(Z | x) P(x) dx \quad (22)$$

V praksi se moč termalnega šuma pogosto ignorira, kar poenostavi končno enačbo kot

$$P(Z) = \frac{2}{Z} (bZ)^{(M+v)/2} \frac{1}{\Gamma(M)\Gamma(v)} K_{v-M}(2\sqrt{bZ}) \quad (23)$$

kjer je K modificirana Bessel funkcija in M število nekoreliranih pulzov.



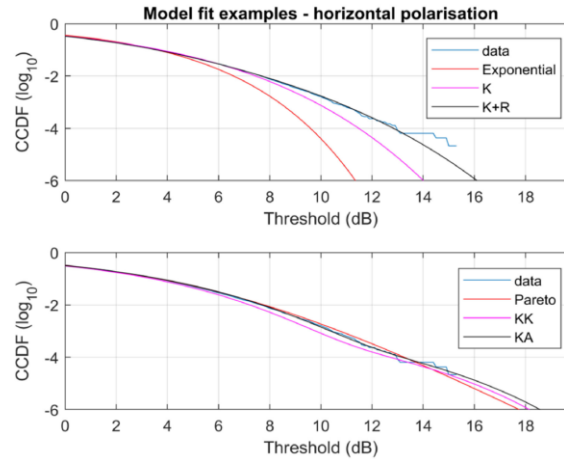
Slika 7: Primerjava Rayleigh in K realizacije gostote verjetnosti, vir: S. Watts.

Za najboljše ujemanje modela z meritvami, se za modeliranje termalnega šuma doda dodatno K-distribucijo, kar tvori KK-distribucijo kot

$$P(x) = (1 - k)P_x(x; v_1, b_1) + kP_x(x; v_2, b_2) \quad (24)$$

kjer sta K-distribuciji uteženi s faktorjem in imata različna parametra oblike in veličine (za oboje je potrebna estimacija ali dodaten model). Ujemanje modela z meritvami je prikazano na Sliki 8, kjer je CCDF

komplementarna kumulativna gostota verjetnosti, oz. P_{fa} v logaritemski skali.



Slika 8: Ujemanje modelov morske površine z meritvami, vir: [3].

K-distribucija ne modelira srednje vrednosti odbojev morja (določena je z v in b), zgolj njeno porazdelitev. Za izračun srednje vrednosti potrebujemo dodatne modele površinskega radarskega preseka morske površine, σ_0 , kjer se v praksi najpogostejše uporabljajo Nathanson ter GIT modeli. Srednjo vrednost moči, ki se uporabi v enačbi (16) izračunamo kot

$$P_{sc} = \sigma_0 \cdot A_c \quad (25)$$

kjer površino osvetlitve morske gladine izračunamo po enačbi (2). Na tem mestu velja poudariti, da ni nujno, da so radarske celice povsem neodvisne, saj v veliki večini primerov prostorska dekorelacija valov znaša od nekaj m do 100 m.

5. Sledenje tarč in zaključek

V tem poglavju bomo na hitro orisali težavo sledenja tarč. In sicer, koherentni radarji uspešno detektirajo tarče z Dopplerjevim pomikom, ki se ne prekriva s spektralnim odzivom šuma okolja. V primeru počasnih tarč in tarč, ki potujejo v tangentialni smeri, pa radialne komponente hitrosti ni in tarča se lahko skriva v šumu okolja. Oz. povedano drugače, razmerje med signalom tarče in termalnim šumom ter šumom okolja je premajhno za zanesljivo detekcijo, glej enačbo (16). V tovrstnih scenarijih lahko uporabimo integracijo signala ob vsaki rotaciji antene (ang. scan-to-scan), kar pa je primerno zgolj za stacionarne tarče.

V primeru pomikajočih se tarč pa potrebujemo posebne algoritme za sledenje z večkratno statistično hipotezo (ang. multi-hypothesis trackers), ki delujejo v razmerju povišane verjetnosti lažnega alarma. V tem primeru bo algoritem sledenja tarčo zaznal takrat, ko bo skupna verjetnost detekcij vzdolž v naprej predvidene trajektorije dovolj visoka, torej se bo sledenje izvajalo pred detekcijo (ang. track-before-detect). V praksi navadni Kalmanovi filtri ne zadostujejo in se za tovrstne aplikacije uporabljajo filtri z delci (ang. particle filters), ki verjetnosti reprezentirajo numerično [4].

Literatura

- [1] M. A. Richards, *Principles of Modern Radar*, 2010.
- [2] A. Theil, *CARPET Version 3, User's Manual*, 2022.
- [3] L. Rosenberg, S. Watts, *Modeling the Statistics of Microwave Radar Sea Clutter*, 2019.
- [4] M. Mallick, *Integrated Tracking, Classification, and Sensor Management*, 2014.

O avtorju

Leon Kocjančič je gimnazijo zaključil v Kopru ter diplomiral iz avtomatike in robotike na Fakulteti za elektrotehniko, Univerze v Ljubljani. Diplomsko delo je na področju anten opravil pri Prof. Vidmarju. Raziskovalno delo je opravljal v Laboratoriju za sevanje in optiko ter nato odšel v UK, kjer je na Univerzi Cranfield in Vojaški Akademiji v UK doktoriral s področja procesiranja signalov. Zaposlen je v raziskovalnem in razvojnem oddelku angleške podružnice Hensoldt v Londonu, katera razvija radarje pod blagovno znamko Kelvin Hughes.

Basics of Digital Modulations and How to measure them

Stanislaw Jasinski

Rigol Technologies Eu GmbH

stanislaw.jasinski@rigol.com

Digital Modulations and How to measure them

Abstract. Digital modulation techniques form the foundation of modern wireless communication systems, enabling efficient transmission of information over limited spectral resources. This paper reviews the fundamental digital modulation schemes such as ASK, FSK, PSK, and QAM, with emphasis on their representation using in-phase (I) and quadrature (Q) components. Building on this theoretical background, practical measurement techniques using Vector Signal Analysis (VSA) are presented. Special focus is placed on real-time spectrum analyzers from the RIGOL RSA series, demonstrating how parameters such as constellation diagrams, Error Vector Magnitude (EVM), frequency offset, IQ imbalance, and Bit Error Ratio (BER) can be evaluated.

1. Introduction

Digital modulation is a key enabler of modern radio communication systems, including cellular networks, wireless LANs, satellite links, and Internet of Things (IoT) applications.

2. Digital modulation fundamental

In digital modulation, discrete symbols are mapped onto a carrier signal by varying its amplitude, frequency, or phase. Amplitude Shift Keying (ASK) encodes data by changing amplitude levels, while Frequency Shift Keying (FSK) uses discrete frequency deviations. Phase Shift Keying (PSK) represents data through phase changes, and Quadrature Amplitude Modulation (QAM) combines amplitude and phase variations to achieve high spectral efficiency.

Modern RF systems typically use an in-phase (I) and quadrature (Q) representation. Each symbol corresponds to a point in the I/Q plane, forming a constellation diagram. This representation is central to both signal generation and demodulation and provides a natural framework for vector-based measurements.

3. Measurement challenges

Digitally modulated RF signals are affected by numerous impairments, including additive noise, frequency offset,

phase noise, IQ gain and phase imbalance, and nonlinear distortion introduced by RF front-end components. These effects cause constellation spreading and rotation, resulting in degraded modulation accuracy and increased error rates.

Traditional spectrum analysis alone is insufficient to fully describe these effects, as it does not capture phase information. Consequently, vector-based measurement techniques are required to quantitatively assess digital modulation quality.

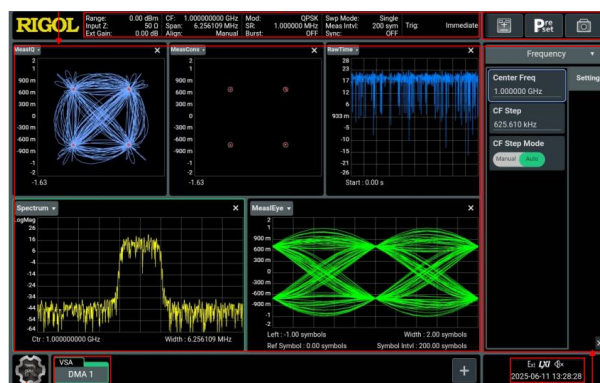


Figure 1.: QPSK constellation measured with RIGOL RSA6000 spectrum analyzer operating in VSA mode.

4. Vector Signal Analysis with RIGOL

Vector Signal Analysis (VSA) demodulates the received RF signal into its baseband I and Q components and compares the measured signal against an ideal reference. The RIGOL RSA6000 series real-time spectrum analyzers support VSA as an optional measurement mode, covering frequencies up to 26.5 GHz with real-time analysis bandwidths up to 200 MHz.

Thanks to their real-time architecture, RSA6000 analyzers are particularly well suited for wideband and burst-type signals. The VSA interface allows simultaneous display of constellation diagrams, time-domain IQ waveforms, spectra, eye diagrams, and comprehensive error summaries.

5. Key Measurement Parameters

The constellation diagram provides an immediate visual indication of modulation accuracy. Error Vector Magnitude (EVM) is a widely used quantitative metric expressing the deviation of measured symbols from their ideal positions. Additional parameters such as frequency offset, IQ imbalance, phase error, and Bit Error Ratio

(BER) enable detailed root-cause analysis of transmitter and receiver impairments.

The RSA6000 VSA option supports common modulation formats including ASK, FSK, PSK, MSK, and QAM, as well as predefined wireless standards. This makes the platform suitable for both education and advanced research applications.

6. Conclusions

Digital modulation techniques are fundamental to modern wireless communication systems and require advanced measurement methods for proper verification. By combining real-time spectrum analysis with integrated Vector Signal Analysis, the RIGOL RSA6000 series provides an effective platform for analyzing complex digitally modulated signals.

The presented measurement approach bridges theoretical modulation concepts with practical RF measurements, making it highly relevant for students, researchers, and practicing engineers.)

About author

Stanislaw Jasinski is a Regional Sales and Technical Manager at RIGOL Technologies Europe.

The need for 6G

Srdan Knežević

Ericsson Slovenija

srdjan.knezevic@ericsson.com

Abstract. *The telecommunications industry is currently engaged in the continuous evolution of 5G Advanced while simultaneously initiating the formal roadmap for the sixth generation of mobile connectivity (6G), designated as IMT-2030. This article explores the technical evolution, standardization timelines, and the fundamental »why« behind the next generation of mobile connectivity. While previous generations focused mostly on raw speed and capacity, 6G is being designed as an AI-native ecosystem that bridges the gap between the physical and digital worlds. The evolution focuses on transforming networks into AI-native ecosystems designed to support the emerging demands of Artificial General Intelligence (AGI) and humanoid robotics. Key technical pillars include Integrated Sensing and Communication (ISAC) enabling networks to perceive their physical environment and the development of Zero-Energy Devices that harvest ambient power. However, the Telco industry faces significant hurdles, including high infrastructure costs and a »monetization gap« where 5G (and 5G Advanced) has yet to deliver its promised »killer apps«. Ultimately, the document argues that the surge in Artificial General Intelligence (AGI) and humanoid robotics will be the primary driver for 6G. To remain relevant against competition from satellite and cloud providers, the telecommunications sector must shift its focus from simple data transport to becoming a foundation for global, real-time machine intelligence.*

1. Introduction

By being invited to the 27th Seminar on Radio Communications, my initial thought was: »What topic would be both relevant and valuable to this audience and that is relatively new?« By thinking about the questions that we as Ericsson encountered and addressed over the past few months, I found that several recurring and often technically provocative or even contradictory questions emerged:

- Is it true that only »even G's« are the right ones?
- Is the Telco world dead and about to be replaced by new players?
- By seeing what is happening with 5G, do we need any new G?

While those of us in the Telco world struggle with flat revenues, declining ARPU trends, and the challenge of justifying investments in a new technology due to a lack of killer applications (or even compelling use cases), we are simultaneously witnessing an unparalleled increase in hyperscaler demand and investments in potential use cases related to AGI and even superintelligence.

To be even more complicated, while the whole world is buzzing around that AI development is doing (or will do) major breakthrough in a matter of few weeks or months, the Telco sector remains governed by highly structured and cyclical processes: a new Generation every ten years, a WRC (World Radiocommunication Conference) every four years, each release lasting 18 to 24 months, plenaries held four times a year, working groups meeting every two months, and every feature progressing through three stages (Requirements, Architecture, Protocols and Coding). A cyclic process that moves at snail speed compared to AI cheetah speed in development cycles.

At first glance, it may seem the world is advancing at light speed, leaving Telco behind. Is that truly the case? Have we missed something and become the dinosaurs of our era, holding onto the glory days of Erlangs, Mbps, and dreams of latency above 10ms? Is it possible that 5G or 5G Advanced is or will be sufficient to meet the demands of AI without the need for a new »G«? In writing this document and preparing for my presentation, I intend to explore some of the many challenges ahead for »6G« and everyone in the radiocommunications world.

This document is structured around three main chapters. The first examines the standardization timeline, the second explores the key driving forces behind 6G and the third, which is the core of the document, explores the opportunities, threats, and uncertainties that 6G brings..

2. It all starts with standardization

Following a well-established and structured process, as with previous mobile generations, 6G standardization efforts have thus far centered on identifying the value 6G should deliver both by

enhancing future network connectivity and by enabling new use cases.

At the end of 2023, 3GPP formally committed to developing the sixth-generation mobile system. This commitment was reinforced in March 2024, when a detailed timeline for 6G standardization was established at the 3GPP meetings in Maastricht, the Netherlands.

During the June 2025 3GPP meetings in Prague, the leading members of the ICT industry came together to scope and initiate the 6G technology studies.

3. ITU key points and timelines

The International Telecommunication Union (ITU) is instrumental in the standardization process by defining the criteria for classifying a system as an International Mobile Telecommunications (IMT) technology. IMT classification is important as it provides access to a large set of frequency bands that are globally or regionally recognized as IMT bands. This is an important step toward establishing a global commercial ecosystem for 6G.

ITU designates 6G as IMT-2030, 5G as IMT-2020, 3G as IMT-2000, and 4G as IMT-Advanced. To define IMT-2030, the ITU has organized its efforts into a series of tasks, with some already completed and others soon to commence. The following figure provides a high-level overview of the steps ITU will take to establish IMT-2030.



Figure 1. ITU timeline for IMT-2030

The first step was the completion of the two deliverables, “The Future Technology Trends” [1] and the “Framework for IMT-2030 and Beyond” [2].

From 2024 to the end of 2026, ITU will work on defining technical performance requirements and the corresponding performance evaluation methodologies for IMT-2030. The requirements will be functional, that is, the system should support a certain function, or quantitative, where under given conditions, the system should be able to deliver, for example, a certain spectral efficiency, latency, and positioning accuracy.

After the requirements work is complete, the process of submitting technologies for IMT-2030 will begin in 2027 and run through the beginning of 2029. 3GPP will, for this purpose, submit self-evaluations of 6G to ITU by the end of 2028 or early 2029.

The final step which involves ITU’s decision to designate a technology as IMT-2030, is estimated to be completed by 2030. Later, it will be possible to update the submission in early 2030 with the latest versions of the specifications. This timeline will allow commercial 6G deployments to see the light of day in 2030.

4. Timeframe of 3GPP evolution to 6G

As of 2023, 3GPP has committed to developing 6G specifications [3]. To solidify the commitment, during the March 2024 meetings, 3GPP took a major step by agreeing on a timeline for 6G [4]. Here, we will look more closely at the timeline for this project and provide a high-level breakdown of the tasks involved.

The 3GPP timing together with additional Ericsson’s views on it is illustrated in Figure “3GPP timing”.

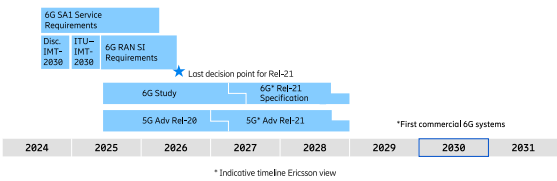


Figure 2. 3GPP timing.

3GPP work is typically done in releases, and work on Release 19 began at the beginning of 2024 [5]. At the end of each release, 3GPP updates its specifications to reflect the work done during the release.

For a new generation (“G”), the scope of work is so extensive that it spans multiple releases. 5G development began with Release 14, with the first specifications finalized in Release 15. 6G work in 3GPP started in 2024 during Release 19 with requirements-related activities, and according to Ericsson, the first specifications are expected to be completed by the end of 2028 in Release 21. The 3GPP-endorsed timeline aims to enable initial commercial systems to be available by 2030, in alignment with the ITU timeline.

It is important to note that while 3GPP is developing 6G, the evolution of 5G Advanced will continue over several releases, introducing new technologies to serve the global market until 2030 and beyond. The ongoing advancement of 5G Advanced will not only support current market needs but also ensure a smooth transition to 6G.

5. 6G pillars also known as “Usage scenarios of IMT-2030”

The initial and most critical step in gathering 6G requirements is to identify the wide range of new use cases that the next generation will enable. By

categorizing the numerous anticipated use case candidates, the 6G requirements have been organized into the following silos [6]:

- a) Ubiquitous intelligence
- b) Ubiquitous computing
- c) Immersive multimedia and multi-sensory interactions
- d) Digital twin and virtual world
- e) Smart industrial applications
- f) Digital health and well-being
- g) Ubiquitous connectivity
- h) Integration of sensing and communication
- i) Sustainability

Based on these defined silos, the Framework Recommendation proposes how to evolve IMT-2020 usage scenarios into six distinct IMT-2030 use case pillars, as illustrated in the figure "6G main use case pillars and overarching aspects of IMT-2030," which also presents four overarching aspects in a wheel-shaped diagram.



Figure 3. 6G main use case pillars and overarching aspects of IMT-2030

1) **Immersive communication:** As the successor to 5G's eMBB, Immersive Communication enables a new era of interactive digital reality. It bridges the gap between users and machine interfaces through ultra-high-definition video and responsive, real-time engagement. It is worth noting that the ITU-R formally defines this specific scenario in the IMT-2030 Framework (M.2160). Or in ordinal words, imagine a reality where human, physical and cyber world interact in a real time.

2) **Hyper reliable and low-latency communication:** In 6G, Hyper-Reliable and Low-Latency Communication (HRLLC) is the direct evolution of 5G's URLLC. While 5G introduced "mission-critical" connectivity, 6G HRLLC is designed for fundamentally different type of connectivity (ten times improvement by having user plane latency around 0.1 ms and reliability 99.99999%). The network provides 6G interface

that allows thousand of robots to move in perfect microsecond synchronization.

The key enablers for HRLLC are:

- AI-Driven Predictive Scheduling
- Multi-connectivity by using Sub-6Ghz with THz (terahertz, submillimeter radiation)
- Large Subcarrier Spacing (SCS): Consequently to THz spectrum availability, by using much wider subcarriers (e.g., 480 kHz or 960 kHz compared to 5G's 30/60 kHz), 6G can transmit data symbols much faster, physically shrinking the time it takes to send a packet over the air

3) **Massive communication:** The primary goal of the 6G Massive communication scenario is to handle 100x increase in the number of connected devices per square kilometer. The most radical shift in the 6G Massive Communication cycle is the move toward Zero-Energy Devices. 3GPP is currently studying how to support sensors that harvest energy from the environment (solar, vibration, or the radio waves themselves).

The key enablers for the massive communications are:

- a. Cell-Free Massive MIMO: Instead of a device connecting to one "cell," it is served by a "cloud" of distributed antennas. This is essential for managing the interference caused by such high device density
- b. Lean Signaling: 6G is designing "simplified" protocols. For a sensor that only sends 10 bits of data once a day, the 6G network removes almost all the "handshake" overhead to save energy and bandwidth

4) **Ubiquitous connectivity:** This usage scenario is intended to enhance connectivity by solving the "coverage gap" that has persisted through every previous generation of mobile technology. In comparison to 5G, while 5G was primarily a terrestrial (ground-based) technology, 6G is being designed from "Day 1" as a 3D network to provide internet access anywhere on the planet.

The key enablers for the ubiquitous connectivity are:

- a. GNSS-Independent Operation: Allowing devices to connect and synchronize with the network even if GPS/GNSS is unavailable or spoofed
- b. Regenerative Satellites: Instead of satellites acting as simple "mirrors" (Transparent mode), 6G satellites will have on-board processing (acting like a flying base station) to reduce latency and improve efficiency
- c. Spectrum Sharing: Developing technology that allows satellites and ground towers to use the same

frequency bands without interfering with each other.

5) Integrated AI and communication: This use case pillar is the brain of IMT-2030 proposed hexagon. While 5G is using (or has a plan to use) AI to manage the network, 6G makes AI a native service that users, devices and robots can utilize in real-time. The biggest changes in 6G will happen (or going to happen) by making air interface (the way radio waves carry bits) to be AI-native. The AI-native interface will offer features like:

- Learned Waveforms:** Instead of using a fixed mathematical formula to send signals, the base station and the phone "negotiate" an AI-optimized waveform that works best for that specific room, weather, or interference level.
- CSI Compression:** Using AI to compress the "Channel State Information" (the map of how a signal bounces off walls). This significantly reduces the overhead data, leaving more room for actual user content.

The key enablers for the integrated AI and communication are:

- Lifecycle Management (LCM):** Rules for how the network "updates" an AI model on a phone or base station, ensuring the AI doesn't become "stale" or inaccurate.
- Distributed Inference:** The ability to split one giant AI task into ten small pieces and run them across ten different nearby devices/nodes simultaneously.
- Operational Fallback:** A safety requirement ensuring that if the "AI" part of the 6G network fails, the system can automatically switch back to traditional, non-AI logic so connectivity isn't lost.

6) Integrated sensing and communication (ISAC): This pillar is perhaps the most transformative pillar. ISAC is turning the mobile network into a "six sense" network for society. It allows the network to "see" and "feel" the physical world using radio waves, even if the objects being sensed are not connected to the internet. By analyzing the reflections, scattering, and time-of-flight of radio signals, a 6G base station functions like a high-resolution radar and perceives its environment. The intention is that 6G by using higher frequencies can achieve millimeter sensing accuracy.

The key enablers for the integrated AI and communication are:

- Waveform Co-design:** Designing a single "pulse" that is good for carrying high-speed 6G data and good for acting as a radar ping.

b. **Interference Cancellation:** The "echo" is often millions of times weaker than the original signal. 6G nodes must use advanced AI to filter out the noise and find the tiny reflection of a person or a car.

c. **Privacy by Design** (as an enabler and as a biggest challenge): Since ISAC can "see" through walls and track people without their consent, 3GPP is establishing strict "Sensing-as-a-Service" (SaaS) protocols to ensure sensing data is encrypted and only used for authorized purposes (e.g., safety, not surveillance).

6. Capability Wheel

In order to fulfil the six usage pillars of IMT-2030, various technical aspects and performance requirements need to be considered. The 6G Framework Recommendation (ITU-R M.2160) defines the blueprint about what what actually the technology must deliver. The figure below often called as "Palette Diagram" present the "Capability Wheel" [6].

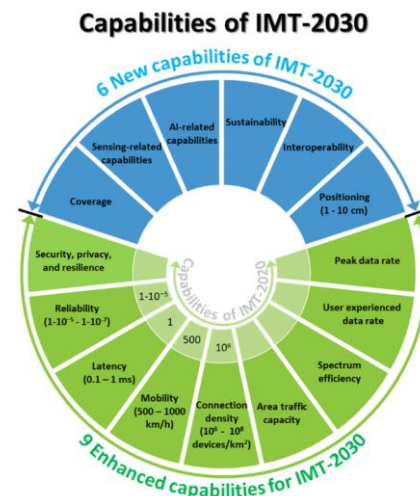


Figure 4. Capability Wheel of IMT-2030

The Capability wheel contains 15 Key Performance Indicators (KPI's) that are split to 9 enhanced capabilities (by evolving from 5G) and 6 new capabilities that are entirely new metrics that were not part of the 5G (and were explained in previous chapter). Enhanced capabilities comparison is shown in Figure 5.

Capability	6G Target (IMT-2030)	Improvement vs. 5G
Peak Data Rate	50 – 200 Gbps (up to 1 Tbps)	10x – 50x higher
User Experienced Data Rate	300 – 500 Mbps	3x – 5x higher
Spectrum Efficiency	1.5x – 3x better than 5G	Incremental gain
Area Traffic Capacity	30 – 50 Mbps/m2	Massive density boost
Connection Density	10 ⁷ – 10 ⁸ devices/km2	10x – 100x more devices
Mobility	500 – 1,000 km/h	Support for hyper-loop/fast air travel
Latency (Air Interface)	0.1 – 1 ms	10x lower
Reliability	10 ⁻⁷ – 10 ⁻⁹ error rate	"Seven to Nine Nines"
Security & Resilience	Enhanced trust and self-healing	Qualitative leap in cyber-safety

Figure 5. The 9 Enhanced Capabilities (Evolving from 5G)

7. Is it too early to build a hype around 6G?

I started this document by referring to technology cycles and scepticism around the current situation. 5G promised a lot, but there are several barriers to entry that cause the 5G slump:

- The Indoor Problem: High-frequency 5G is blocked by modern "green" building glass and thick concrete.
- The Monetization Gap: Telecoms spent billions on spectrum licenses but struggled to find "killer apps" that consumers would pay extra for (beyond faster Instagram loading).
- Complexity of Private 5G: Enterprises found that setting up a private 5G network was significantly more complex and expensive than managing a standard Wi-Fi 6/7 network.

It has been already seven years from the official 5G first release and in those seven years we saw Gartner hype cycles such as "innovation trigger" (zero latency and fiber like wireless speeds), "peak of inflated expectations" (remote surgery, autonomous car swarms and death of Wi-Fi) and "trough of disillusionment" (coverage, high infrastructure costs, lack of "killer" application) while hoping to see the "slope of enlightenment" and use cases in usage. Maybe you recall that even the opening ceremony of the Winter Olympic Games includes a scene of remote surgery.

5G started with the "Hype" Milestone (Rel-15) that promised the "Magic Triangle" containing speed (eMBB), low latency (URLLC) and moto "everything that benefits from a connection will be connected" (massive IoT). The next two releases (Rel-16 and Rel-17) actually provided the technical specifications for the industrial and IoT features on which the initial 5G marketing was based. The delay in feature introduction from Rel-15 to Re-17 is most likely the main reason why many 5G "hypes" took years to materialize or have not materialized. If we put in equation a hurry with 5G introduction by inventing a hybrid mode called Non-Standalone 5G (NSA), we can also say that the 5G failed because promises relied on a version of 5G (Standalone (SA) mmWave) that is technically difficult and expensive to deploy at scale.

Is 6G cursed by an old saying, "once bitten, twice shy", based on 5G experience, or maybe 6G is all that 5G promised to be?

The 6G "innovation trigger" phase most likely ended with the founding of the 6G NextG alliance, white papers, and lab demos. If we believe in Gartner's phases, we should be in the "peak of inflated expectations" phase by believing that AI

will drive and solve most of our challenges. The promise is that 6G will be 100 times faster than 5G. The reality is that for such speed, we need a spectrum that a single sheet of paper or even fog can block. Not to mention the massive engineering hurdle of achieving such data speeds in an energy-sustainable way. Just for a feel, based on current knowledge and technology, the classical mobile battery would dry out in a minute to provide energy to achieve 1 Tbps.

A similar challenge follows "holographic communication" promises. The computational power and display technology for mobile holograms don't yet exist at a scale that will enable a massive breakthrough in the next decade.

The answer to the question "Is it too early to build a hype around 6G?" would be straightforward and simple if we were to consider only technical specs, such as more spectrum, higher peak rates, lower latency, and densification. The answer would be "So What?!", if 5G already provides enough speed for 4K video, gaming latency, massive IoT number of sensors, the industry must prove that 6G offers a "killer value" beyond just higher numbers on a spec sheet. The issue with such an answer and approach is that we have an elephant in the room. The game changer is AI.

We are living in a time when mass adoption is happening in just several months that in the past we needed years or even decades [7]. We are living in an era of AI and robots promises and hype expectations [8].

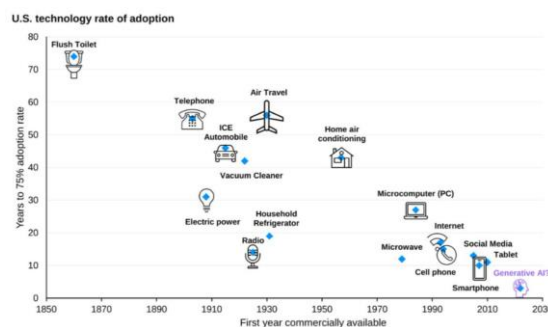


Figure 6. U.S Technology rate of adoption

As an example, the prediction for humanoid robots suggest we are at a pivotal "inflection point," moving from lab prototypes to real-world industrial and domestic use. By late 2025, several major companies have already transitioned from demonstrations to commercial deployments. The expectation is that shipments from roughly 18.000 units will grow to over 1 million units annually by 2030 [9]. Such robots (aka humanoids) have totally different behaviour and needs than smartphones. This introduces a new type of customers. Suddenly, the mobile network needs will

not be driven by constantly increase in linear content consumption but by inference-driven interactions. The traditional value of data packages has already been saturated, and a new business model based on compute placement, locality, and energy cost will emerge. The traffic will continue to increase but pattern of the traffic will change. People will not watch more videos per day (even in 8K if someone need) than today, but AI robots will run much more inferences than all people in a world can do. And the issue is that inference does not scale as well as video.

Maybe it is not too early for 6G. Maybe, we are late or just not aligned with AI development need. Or maybe, that is finally the case that will bring 5G monetization back on track to justify all those modernization investments and brings 6G needs in right hype cycle.

That brings us to the next question: Why cannot we just upgrade 5G?

8. How does 6G relate to 5G?

From 2G to 5G, we witnessed "G" cycles that followed a specific pattern. Each generation brings something new by delivering meaningful improvements but not altering the radio concept. More antennas, more spectrum, better spectral efficiency, improved modulation, better processing power, more compression, fewer jumpers, better power, and more transmit and receive branches were basic radio concepts (The CORE is a totally different story, but not interesting from a Radio Communications point of view). In the "data-driven" era (primarily the 4G and early 5G phases), mobile data grew at nearly 50% per year. Such traffic growth required more spectrum, and each spectrum allocation required a specific radio layer or at least an upgrade to the new radio architecture ("radio architecture" as Radio unit – hardware). That trend, driven by inertia, also served as a basis for 5G (eMBB, M-MIMO, C-band + mmWave). Over the last several years, traffic growth has been declining to around 20% per year [10]. It seems that the existing mobile world as we know is reaching saturation. There are physical limits to eMBB subscribers. Each subscriber also has certain limitations related to linear content consumption, mobile gaming, or even social media (certain family members are limitless, though). In the meantime, access to mobile data becomes a commodity (even the Slovenian parliament is debating about human rights to a certain "data package" and mobile data access). At the same time, mobile networks are becoming so good that, for end users, it is hard to distinguish between them. Telcos are becoming Communication Service Providers (CSPs) by

converging more services into "bundles" and losing traditional revenue streams from voice and even roaming.

The result of all the above-mentioned is that the 'evolutionary engine' that once pushed the industry toward automatic "new G" has stalled, sidelined by a combination of market saturation, flatlining user demand, and lowering ARPU [11].

The era of the 'lack of capacity' has reached its final chapter. The frantic days of laying new spectrum layers to survive the night are over. CSP's have realized they can refine, polish, and extend their existing networks without their customers ever feeling a dip in quality. This shift has flipped the script on twenty-plus years of industry dogma. For the first time in a generation, the next generation of mobile technology is not a mandatory destiny. It is a choice. Moreover, across the industry, leaders are looking at blueprints for the future and asking the once-unthinkable question: "Is this even necessary?"

The 6G (as well as 5G-Advanced) will bring new spectrum by introducing "Capacity enhancement" (7-15 GHz) and "Peak Capacity" (Sub-THz W-band (92-114,25 GHz and D-band 130-174,8 GHz), but those bands besides capacity capabilities will not reshape mobile networks topology nor coverage [12].

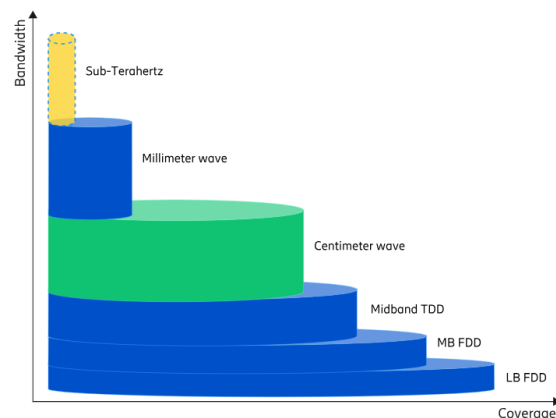


Figure 7. Bandwidth and coverage characteristics for the different spectrum range

Historically, a new generation was justified by the raw economics of the new spectrum. The new spectrum (and new frequency auction) meant cheaper data, more data packages and higher revenues. However, that old math no longer adds up. The burden of proof has shifted: it is no longer enough to say that 6G is inevitable. Now, we must ask: what problem does it solve that a maturing 5G cannot handle on its own? While 6G offers a tempting array of already described use cases/pillars, those cases are what our colleague Iztok Saje would call "solutions searching for

troubles". Solutions solving constraints that operators do not have yet. Does it mean that we are experiencing the end of the 'new G' as a mandatory Telco upgrade cycle? Not really, but it does open the door to justification.

Often, we in telecommunications forget that the world is driven by money. Given the latest huge investments in network modernization (also known as "5G modernization"), without proper amortization of the existing network infrastructure through monetization and new revenue streams, it is hard to justify a "jump in approach" driven by new hype. All promised improvements in latency, energy efficiency, throughput, and data peaks add a certain margin, but not a platform for revenue expansion. Therefore, at least from the operator's point of view, there is no need for yet another "G".

9. So, why the biggest threat for 6G is 5G?

The Telco industry is caught between two paths, and neither leads to a quick win. A 'soft' 6G introduction offers too little incentive for operators to abandon their current 5G monetization plans, especially when they are already spending 20% of their revenue just to keep the lights on [13] [14].

A 'hard' 6G as a complete ground-up rebuild offers an even steeper wall. With European returns on capital falling behind the cost of debt, the appetite for another massive infrastructure gamble has vanished. Shareholders are now demanding discipline over drama.

This creates a painful disconnection between AI potential evolution and 3GPP release plans. Vendors who follows 3GPP such as Ericsson, Nokia, Huawei, Samsung or ZTE are built for the 'big cycle,' but cycles only turn when there is genuine demand. By pushing a 'G' that the market isn't asking for, they risk a 'buyer's strike' that could push replacement timelines further out than ever before.

What is the potential way forward? The 6G race is not just a technical challenge beyond radio connectivity era but a race against time and alternative ecosystem.



Figure 8. The end of Radio centric technology era

The shift from traditional "Radio plus Core" network toward distributed intelligence necessitates

a re-evaluation of edge computing as a critical infrastructure requirement rather than an optional enhancement. Simultaneously, the network's functional identity is migrating from best-effort data transport to an integrated control plane. This evolution enables the network to facilitate deterministic coordination and secure authentication for large-scale machine-to-machine (M2M) ecosystems.

Operators who successfully master the 5G Standalone stack will be positioned to lead the emerging digital landscape. By leveraging network slicing and programmable APIs, they can provide a digital foundation for industrial robotics and machine-to-machine economies that depend on trillions of annual interactions. However, this opportunity is limited in duration. Should the telecommunications sector fail to adapt, demand will shift to alternative providers. Private networks, satellite communications, and hyperscale cloud providers are already prepared to establish their own infrastructures.

This brings 6G to a moment of truth. Unless 6G can offer something beyond what a perfected 5G Standalone already provides, it risks becoming a masterpiece of engineering with nowhere to go. We face the uncomfortable reality that for the first time, the industry's greatest challenge is not the 'when' of the next generation, but the 'why' [15].

10. West vs East - sovereign infrastructure

Last but not least related to 6G in relation to 5G is two different approaches symbolized as "West" against "East".

While east representing by China did almost everything right with 5G by aligning domestic policy, domestic vendors and CSP's to enable 5G industrialization, the west was caught in endless regulation discussions that kept 5G industry out of big tech company equation (and that is clearly visible in Telco stock market valuation) and stalled 5G development in U.S. and EU [16].

To change the situation, the U.S. is trying strategically to reposition itself to lead the 6G era by shifting the telecommunications landscape away from traditional hardware and toward its core strengths in software, AI, and cloud infrastructure.

Opposite to China, the U.S. was limited by the specialized hardware required for Radio Access Networks (RAN). However, 6G is evolving from a rigid signal-processing pipeline into a distributed AI system. By moving baseband processing to general-purpose accelerators, a market dominated by U.S. companies like Nvidia—the "center of gravity" could shift from niche telecom hardware to AI

compute stacks where the U.S. already controls the tooling and ecosystems [17].

In addition to AI compute, the U.S. is also focusing on setting Cloud-Native infrastructure into the center of 6G by glueing telecom networks to the cloud. Core functions, analytics, and network orchestration are increasingly "cloud-native." With AWS, Microsoft Azure, and Google Cloud controlling roughly 70-80% of the global public cloud market, the U.S. effectively dictates the APIs, security standards, and developer ecosystems used to build and scale 6G software.

The U.S. pivot toward 6G is less about consumer convenience and more about addressing two systemic crises that emerged during the 5G era: national security vulnerabilities and a failing telecom business model.

The urgency of the U.S. 6G strategy is a direct response to the lessons of the 5G cycle. By treating the network as sovereign infrastructure, the U.S. aims to secure its defense systems, revitalize telecom economics, and ensure that the global connectivity ecosystem remains anchored in American AI and cloud tooling.

11. Conclusion

By integrating six transformative pillars with evolved 5G technology, 6G will orchestrate a seamless, real-time interface between our human, physical, and digital realities.

In this era of widespread AI and machine-centric demand, the industry's focus has shifted from the necessity of 6G to the complexities of its global execution.

The true success of 6G over the next decade will not be measured by speed, latency, or peak throughput, but on how effectively we navigate international regulation, political alignment, and economic sustainability to create a truly interconnected ecosystem where the human, physical, and cyber worlds converge in real time.

12. Literature

- [1] "Future technology trends of terrestrial International Mobile Telecommunications systems towards 2030 and beyond," [Online]. Available: <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2516>.
- [2] "ITU-R M.2160 IMT-2030 Framework," 13 11 2023. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2160-0-202311-I/en>.
- [3] "3GPP Commits to Develop 6G Specifications," 3 12 2023. [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/partner-pr-6g>.
- [4] "RP-240823 Additional considerations for 6G timeline," [Online]. Available: https://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/TSG_RAN/TSGR_103/Docs/RP-240823.zip.
- [5] "The next wave of advanced 5G – 3GPP Release 19 - Ericsson," 15 12 2013. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/blog/2023/12/3gpp-release-19>.
- [6] "Recommendation ITU-R M.2160-0 (11/2023)," [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2160-0-202311-I!!PDF-E.pdf.
- [7] "Technology over the long run: zoom out to see how dramatically the world can change within a lifetime," [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/technology-long-run>.
- [8] "2025 Gartner Hype Cycle™ for Emerging Technologies," [Online]. Available: <https://www.gartner.com/en/articles/hype-cycle-for-emerging-technologies>.
- [9] "Bank of America: Humanoid robots 101," [Online]. Available: <https://institute.bankofamerica.com/content/dam/transformation/humanoid-robots.pdf>.
- [10] "Ericsson Mobility Report," [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports/november-2025>.
- [11] "GSMA The Mobile Economy 2025," [Online]. Available: <https://www.gsma.com/solutions-and-impact/connectivity-for-good/mobile-economy/>.
- [12] "6G spectrum - enabling the future mobile life beyond 2030," [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/6g-spectrum-enabling-the-future-mobile-life-beyond-2030>.
- [13] "Arthur D. Little (2024) Reshaping Telecom Investment," [Online]. Available: https://www.adlittle.com/sites/default/files/viewpoints/ADL_Reshaping_telecoms_investment_2024_0.pdf.
- [14] "NGMN Alliance doesn't want 6G to spark another capex boom," [Online]. Available: <https://www.telecoms.com/wireless-networking/ngmn-alliance-doesn-t-want-6g-to-spark-another-capex-boom>.
- [15] "6G Requirements and design considerations - Business driven justification," [Online]. Available: https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/NGMN_6G_Requirements_and_Design_Considerations.pdf.
- [16] "ETNO says Europe's telco investment climate needs 'dramatic' improvement," [Online]. Available: <https://www.telecoms.com/wireless-networking/etno-says-europe-s-telco-investment-climate-needs-dramatic-improvement>.
- [17] "AI RAN Alliance," [Online]. Available: <https://ai-ran.org/>.
- [18] "3GPP TSG-103 Additional Considerations for 6G Timeline," [Online]. Available: https://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/TSG_RAN/TSGR_103/Docs/RP-240823.zip.
- [19] "6G RAN – key building blocks for new 6G radio access networks," [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/blog/2024/5/future-6g-radio-access-network-design-choices>.
- [20] "6G spectrum - enabling the future mobile life beyond 2030," [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/6g-spectrum-enabling-the-future-mobile-life-beyond-2030>.

About author

A telecommunications veteran with more than 20 years of hands-on experience in network evolution and deployment. Having managed the transition through 3G, 4G, and 5G eras by prioritizing technical necessity over industry trends to address the real technical requirements of modern RAN infrastructure. Each new generation has reinforced the understanding of how challenging and essential it is to bridge the gap between ambitious technological promises and the operational realities of a Telco network rollout.

Future proof networks and AI

Ivan Lesić

Nokia

ivan.lesic@nokia.com

Future proof networks and AI

Abstract. New use cases and applications will introduce new challenges for future radio access networks. AI-driven content, uplink-oriented traffic profiles, and unexpected user-generated load spikes will require networks to deliver high agility, real-time load and content processing, and flexible management of users, traffic, and applications. This presentation will explain the key challenges, how they will be addressed in the era of 5G-Advanced with the support of AI-driven RAN intelligence, and how RAN technology will evolve toward fully native, AI-driven 6G networks by 2030. It will also highlight the role of predictive analytics, automation, and self-optimizing network functions in enabling this transformation. Finally, the talk will discuss how these capabilities will allow operators to support future digital services with unprecedented performance, reliability, and efficiency.

1. Introduction

In the past decade, we have observed several key developments in the evolution of RAN.

There has been a massive increase in data volumes processed in radio access networks driven primarily by the surge in video consumption and the increasing smartphone penetration. Mobile broadband connectivity has become the norm, and several new use cases, such as Fixed Wireless Access (FWA) and IoT connectivity, are becoming increasingly widespread.

The increase in available frequency bands has accelerated the introduction of 5G, which marks a significant leap in performance and efficiency compared to 4G. Advancements such as Massive MIMO have enabled spectral efficiency gains. The number of parameters used to optimize network performance and efficiency has significantly increased. We have also begun to see the opening of base station computing capabilities through Cloud RAN technologies. There is a renewed industry focus on operational efficiency and energy efficiency based on the

global increase in the cost of energy powering these networks and the ambitious environmental targets of companies and society.

2. Evolution towards AI RAN

Every cellular generation has been framed by the intended subscriber services, the available frequency spectrum and the affordable computational complexity of the decade.

The new frequency spectrum for 5G-Advanced and 6G will provide bandwidth for emerging immersive and extended reality (XR) services for consumers and enterprises.

The progress of System-on-Chips (SoC), central processing units (CPU) and graphics processing units (GPU) will allow advanced RAN software, including AI, to get the most out of the given spectrum, cell sites and energy budget.

As the energy efficiency of tensor-optimized computing evolves, solving more complex computational tasks with heavier AI workloads becomes economically viable.

The role of AI in radio access networks is often described using three categories, which the AI-RAN Alliance has adopted:

- AI for RAN, which means using AI to enhance the performance of RAN in areas such as spectral and energy efficiency
- AI on RAN, which means that applications can take advantage of AI within the RAN, leveraging capabilities such as Slicing and open APIs
- AI and RAN, which means that the RAN and AI workloads share computing infrastructure.

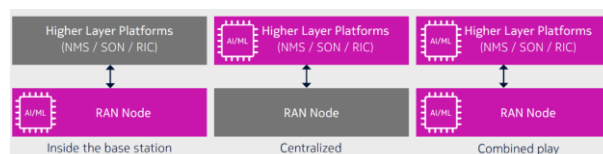


Figure 1: different options to run AI/ML in the network

Three factors have particularly contributed to the emergence and tremendous growth of AI in many domains:

- Big data: collected from the web, social media, and sensors

- Tensor-efficient computing: GPUs enabling efficient computing of vectors, matrices and multi-dimensional data structures (tensors) for complex calculations
- Cloud-based services: scalable access to data and storage, AI models and computing for training and inference

The business model of hyperscale companies has provided a platform for massive university and company research and development. This, in turn, has led to an ever-growing toolbox of open source and commercial tools, which enable other industries to adopt AI without reinventing the enabling software.

3. Embedded AI/ML use cases in RAN

In practice, specialized AI/ML units, often referred to as AI/ML accelerators, can be implemented in various ways to optimize the performance-to-cost ratio. Conventional RAN design is framed by TCO minimization, including reducing energy consumption and space requirements.

Increasing the number and complexity of AI for RAN workloads within the base station over time will result in growing AI computing and memory needs. In the conventional approach, these resources are added in evolutionary upgrade steps, which ensures the use of the latest technology and avoids over-dimensioning AI computing and related costs at any particular period of time.

The alternative approach is to deliberately accept to have spare AI computing capacity. Using general-purpose GPUs, the spare AI computing power could be used for workloads beyond RAN.

The advantage of the second approach is its readiness for multi-purpose AI workloads in the edge cloud. This is compelling when the location and backhaul bandwidth of the base station site or Cloud RAN data center meet the demand of other AI workloads and use cases beyond RAN.

Considering the end-to-end delay budget for immersive AI-enhanced services, an XR-mass market could become the catalyst for the far edge cloud and the second approach.

Embedding AI/ML within the base station can serve a multitude of use cases, spanning across lower layers of the RAN architecture. These use cases are prevalent in the L1 physical layer, which addresses signal processing and modulation tasks, and the L2, which handles various data link functions such as beam selection, link adaptations and intelligent scheduling.

In addition, embedded RAN use cases extend to the L3 network layer, facilitating various functions such as multi-layer management or power optimization.

4. 3GPP standardization

Many AI/ML algorithms inside the base station do not require standardization. Like most conventional algorithms, they are implementation-specific.

However, considering interworking between AI implementations in different entities, such as the user equipment and the base station, standardization will be mandatory, similar to the standardization of network interfaces.

The 3GPP RAN AI/ML standardization efforts encompass a broad spectrum of activities spanning multiple working groups, from services and system aspects (SA WG) to radio access network (RAN WG).

3GPP Release 17 carried out an initial study on AI-enabled RAN, outlining fundamental principles and a functional architecture. This study also explored diverse use cases such as network energy savings, load balancing and mobility optimization. In Release 18, 3GPP furthered its efforts by exploring AI/ML to enhance the 5G New Radio (NR) air interface. The study's scope included creating a general AI/ML framework and investigating specific use cases, such as channel state information (CSI) feedback, beam management and positioning.

For all these use cases, AI/ML is utilized independently either on the device side, on the network side, or collaboratively on both sides of the communication system. The process of delivering an AI/ML model from one entity to another over the wireless network is referred to as model transfer.

In Release 18, 3GPP SA-WG1 also started a study to identify use cases and service and performance requirements for model transfers. The study categorized AI/ML operations into three types:

- Operation splitting, which aims to optimize privacy and latency by partitioning AI/ML tasks between UE and network endpoints
- Model/data distribution, which enables dynamic model delivery to devices
- Distributed/federated learning, which aggregates training results of local UEs to create a global model.

In Release 19, we can expect further AI/ML use cases to be addressed in the air interface, RAN and system architecture. It will also address outstanding issues identified during Release 18.

In Release 20, 6G will be studied with AI/ML as an integral part of the system.

5. Conclusion

As in many other areas, AI will be an integral part of RAN. Together, the technological progress in AI models and algorithms, tensor-optimized computing and the path to 6G in RAN will unleash efficiencies and enable enhanced services.

A widening range of AI technologies will be used for RAN, within the base station for real-time tasks and in centralized systems for non-real-time tasks.

Real-time AI has the potential to enhance user experience and air interface performance. AI in centralized systems will further automation and efficiency.

Nokia, together with our research arm Nokia Bell Labs, is committed to a responsible AI mindset and accountability. These are essential when developing solutions that leverage AI.

They are also essential for operators running cellular networks, which represent the critical infrastructure of modern societies.

We are leveraging our extensive RAN domain knowledge when working very closely with industry partners to shape the technology evolution path towards AI-RAN and AI-native 6G.

6. Literature

Summary of external whitepaper communication material of Nokia

About author



Ivan Lesić is CTO in Nokia Mobile Networks, responsible for technical solutions in Central & East Europe. With 20 years of experience in telecom domain he currently acts as senior technology & strategy consultant, supporting business development and growth across the region.



Članek [1]



Članek [2]



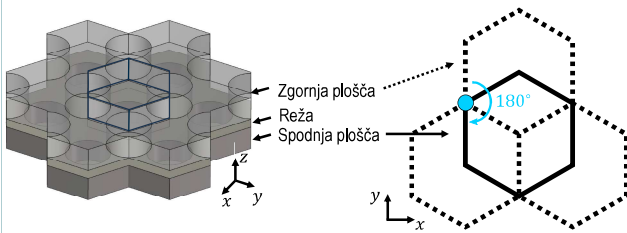
Video povzetek

Reševalniki lastnih vrednosti za periodične strukture v šestkotni rešetki

Martin Petek
Politecnico di Torino

Uvod in motivacija

- Periodične strukture se lahko uporabljajo za prilagajanje razširjanja valov v antenah in valovodih.
- Dve najpogostejši aplikaciji sta posnemanje lomnega količnika (kot nadomestek dielektričnih materialov) ali za preprečevanje razširjanja valov – struktura z prepovedanim elektromagnetnim pasom (PEP).
- Komercialni reševalci lastnih vrednosti ne podajajo rešitev znotraj PEP.
- V tem delu predstavljamo hibridni postopek za reševanje lastnih vrednosti struktur v šestkotni mreži in jo uporabimo za podrobno analizo zrcalno-polobratne strukture.
- Zrcalno-polobratna simetrija je vrsta višje simetrije, sestavljene iz zrcaljenja preko sredine reže in obrata za 180° okrog enega izmed kotov šestkotnika.



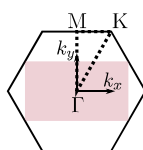
Računski pristop

- Mnogorodni postopek prenosnih matrik (MPPM) je dvostopenjski postopek za reševanje lastnih vrednosti.
- Prvo izračunamo sklopitev med valovodnimi priključki, postavljenimi na robu strukture. V tem koraku uporabljamo CST polnvalovni reševalnik v frekvenčni domeni, kjer je računska mreža sestavljena iz šestploskovnih elementov.
- V tem koraku je računsko območje razširjena celica, ker CST zahteva poravnavo valovodnih priključkov z kartezijskim koordinatnim sistemom.
- V drugem koraku postavimo problem lastnih vrednosti v naknadni obdelavi, v obliki prenosnih matrik tako, da sta dva periodična valovodna priključka povezana s faznim zasukom in dušenjem.
- Izračun lastnih vrednosti se izvede na tri različne načine glede na odsek Brillouinove cone.
- Koda je napisana v programskem jeziku Julia in ima možnost uporabe višje računske natančnosti pri operacijah s plavajočimi vejicami.
- Rešitve, pridobljene z MPPM primerjamo z reševalnikoma lastnih vrednosti z postopkom robnih elementov [1] in Ansys HFSS reševalnika lastnih vrednosti (HFSS ES).

$$\lambda_v = \exp(-jk_v p_v)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{T} \\ \mathbf{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_x \mathbf{V}_x \\ \lambda_y \mathbf{V}_y \\ \lambda_z \mathbf{V}_z \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{T} \\ \mathbf{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{xx} & \mathbf{T}_{xy} \\ \mathbf{T}_{yx} & \mathbf{T}_{yy} \end{bmatrix}$$



$$\overline{MK}: \lambda_y \text{ fixed} \rightarrow ([\mathbf{T}_{xx}] + [\mathbf{T}_{xy}][\mathbf{Q}_y][\mathbf{T}_{yx}])[F_x] = \lambda_x [F_x]$$

$$\overline{GM}: \lambda_x \text{ fixed} \rightarrow ([\mathbf{T}_{yy}] + [\mathbf{T}_{yx}][\mathbf{Q}_x][\mathbf{T}_{xy}])[F_y] = \lambda_y [F_y]$$

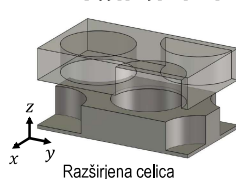
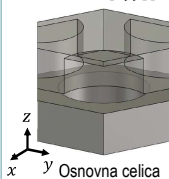
$$\overline{KT}: \lambda_y = \lambda_x^3 \rightarrow ([\mathbf{M}_1]\lambda_x^4 + [\mathbf{M}_2]\lambda_x^3 + [\mathbf{M}_4]\lambda_x + [\mathbf{M}_5])[F_x] = [0]$$

$$[\mathbf{M}_1] = [\mathbf{T}_{xy}]^{-1}$$

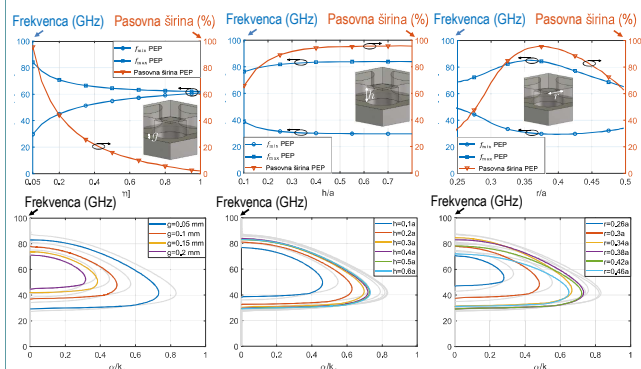
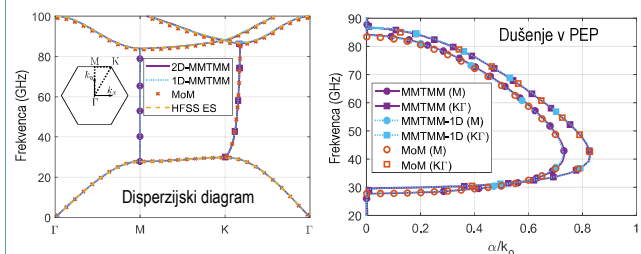
$$[\mathbf{M}_2] = -[\mathbf{T}_{xy}]^{-1}[\mathbf{T}_{xx}]$$

$$[\mathbf{M}_4] = -[\mathbf{T}_{yy}][\mathbf{T}_{xy}]^{-1}$$

$$[\mathbf{M}_5] = [\mathbf{T}_{yy}][\mathbf{T}_{xy}]^{-1}[\mathbf{T}_{xx}] - [\mathbf{T}_{yx}]$$

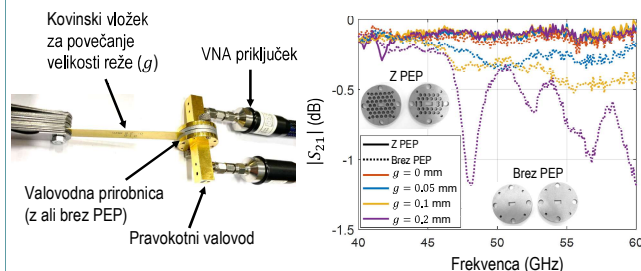


Rezultati računske analize



Praktična uporaba

- Za preizkus uporabnosti strukture smo razvili dušilno prirobnico za frekvenčni pas 40-60 GHz, izdelano z tehniko kovinskega 3D tiskanja.



Zaključek

- Razvili smo reševalnik lastnih vrednosti za strukture v šestkotni mreži.
- Načrtovana zrcalno-polobratna luknjasta struktura ima 95% pasovno širino PEP.

Viri

Slike v plakatu so vzete iz vira [2] in prirejene (prevedene v slovenščino) pod licenco CC 4.0.

- [1] M. Petek, et al., "Method of Moments for the Dispersion Modeling of Glide-Symmetric Periodic Structures," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 72, no. 1, pp. 756-766, Jan. 2024, doi: 10.1109/TAP.2023.3325207.
- [2] M. Petek et al., "Numerical Modeling of Higher-Symmetric Periodic Structures With a Hexagonal Lattice," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 73, no. 3, pp. 1650-1661, March 2025, doi: 10.1109/TAP.2024.3499742.

Odkrivanje objektov pod površino z georadarjem

Boštjan Batagelj¹, Dušan Gleich²

¹Laboratorij za sevanje in optiko, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani

²Laboratorij za obdelavo signalov in daljinska vodenja, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Univerza v Mariboru

Motivacija

Odkrivanje objektov pod površjem je ključno za številna civilna in varnostno-obrambna področja uporabe, med drugim za varnejše delo na terenu in odkrivanje kopenskih min. Signale klasičnega georadarja (*angl. ground penetrating radar – GPR*) je pogosto težko interpretirati, saj meritev običajno odboj od podlage, ki omejuje pogled na tarčo.

Projekt zato razvija miniaturi, zračno sklopljeni GPR za brezpilotno zračno plovilo (*angl. unmanned aerial vehicle – UAV*) ter uvaja večpogledni zajem (multi-monostatični in bistatični) s polarimetrijo, kar poveča pokritost, ločljivost in verjetnost detekcije.

Napredne metode slikanja z radarjem s sintetično odprtino (*angl. synthetic aperture radar – SAR*) omogočajo boljšo interpretacijo podatkov ter poleg oblike in velikosti tudi meritev dielektričnosti tarče, kar izboljša identifikacijo in klasifikacijo.

Raziskovalno delo

Raziskovalno delo v projektu gradi celovit sklop znanj in tehnologij za zanesljivejšo odkrivanje objektov pod površjem, kjer je kakovost rezultata neposredno odvisna od načina zajema podatkov, stabilnosti in koherentnosti radarskega merjenja ter učinkovitosti interpretacije podatkov.

Na ravni zajema in merilnih konceptov projekt sistematično primerja pristope za plitvo zakopane tarče ter pokaže, kako izbira geometrije in načina meritev vpliva na detekcijo [1, 2], interpretacijo rezultatov pa nadgradi z metodami strojnega vida in sodobnimi detektorji [3].

Ker večpogledno slikanje in (bistatični) SAR zahtevata strogo obvladovanje frekvenčne in časovne stabilnosti ter učinkovito obdelavo, se razvoj opira na nizkošumno generiranje signalov in RF-verige [4, 5] ter na praktične rešitve za časovno sinhronizacijo mobilnih bistatičnih sistemov [6], obdelava pa se približa realnočasnim omejitvam z optimizacijo FFT na FPGA [7].

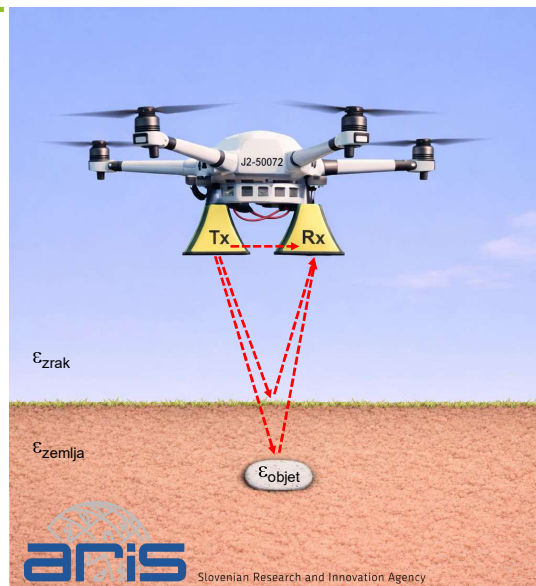
Na ravni interpretacije projekt povezuje radarsko skupnost s pristopi iz obdelave slik: pri SAR se npr. obravnava odstranjevanje spekla z naprednimi konvolucijskimi mrežami in mehanizmi pozornosti, kar je neposredno uporabno tudi pri radarskem slikanju podpovršja [8], medtem ko eksperimentalne študije modularnih radarjev pomagajo pri izbiri arhitektur in merilnih protokolov [9].

Ker se koherentnost in natančnost meritev v praksi pogosto porušita zaradi sinhronizacije, faznega šuma in stabilizacije referenc, projekt rezultate utemeljuje tudi z merjenjem faznega šuma ter stabilizacijo in kompenzacijo zakasnitev v RF-optičnih povezavah [10–14], kar je pomembno tudi za prenos referenc in sinhronizacijskih signalov v kompleksnejših sistemih.

Vzporedno so obravnavane še širše podporne teme, ki se v večsenzorskih radarskih sistemih pogosto izkažejo za kritične: realistična radijska pokritost [15] ter natančno pozicioniranje v sodobnih mobilnih omrežjih [16], dodatno pa se odpirajo tudi perspektive prihodnjih smeri, kot sta kvantno daljinsko zaznavanje [17] ter eksperimentalni vpogled v stabilnost laserskih virov, ki so relevantni pri fotonih radarskih in referenčnih verigah [18]. Zaokrožitev razvojne riti dopolnjujejo še prispevki, ki ciljajo neposredno na ključna strojna gradnika radarskih sistemov – RF-stopnjo mikrovalovno-fotonskega radarja in razdeljevanje lokalnega oscilatorja – kot jedro za koherentne večkanalne meritve [19–21].

Reference

- [1] P. Smogavec, ind. "Comparative Study of GPR Acquisition Methods for Shallow Buried Object Detection," Remote Sens. 2024, <https://doi.org/10.3390/rs16213931>
- [2] D. Gleich, ind. "GPR Acquisition Methods Comparison," TELSIS, 2023 <https://ieeexplore.ieee.org/document/10316164>
- [3] P. Smogavec, ind. "Subsurface Object Recognition using YOLOv8," ICETRAIN, 2024, <https://www.euran.rs/2024/en/proceeding/>
- [4] A. Blatnik, ind. "Wideband low phase-noise signal generation using coaxial resonator in cascaded PLL," Electronics, 2024, <https://www.mdpi.com/2079-9292/13/10/1934>
- [5] A. Blatnik, ind. "Radio Front-End for Frequency Agile Microwave Photonic Radars," Electronics, 2024, <https://www.mdpi.com/2079-9292/13/23/4662>
- [6] L. Podbregar, ind. "Feasibility Study of Time Synchronization Solution for the Bistatic Synthetic Aperture Radar," CoBCom, 2024, <https://ieeexplore.ieee.org/document/10631265>
- [7] L. Podbregar, ind. "Izvedba in optimizacija FFT v Vitis HLS za obdelavo radarskih podatkov," ERK, 2024, https://erk.fe.uni-lj.si/2024/papers/podbregar/izvedba_in.pdf
- [8] B. Pongrac, ind. "Despeckling of SAR Images Using Residual Twin CNN and MAM," Remote sensing. 2023, <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/14/3698>
- [9] K. Kropec, ind. "Eksperimentalna evalvacija modularnega FMCW radarja," ERK, 2024 https://erk.fe.uni-lj.si/2024/papers/kropec/eksperimentalna_evalvacija.pdf
- [10] A. Lavrič, ind. "Phase Noise Measurement for Improving the Performance of Wireless Links," BalkanCom, 2024, <https://ieeexplore.ieee.org/document/10557170>
- [11] L. Podbregar, ind. "Sensitivity of radio frequency phase stabilization system to temperature changes," BalkanCom, 2024, <https://ieeexplore.ieee.org/document/10557179>
- [12] M. Czernmann, ind. "Experimental Investigation of a High-Accuracy Optical Delay Stabilization Method," BalkanCom, 2024, <https://ieeexplore.ieee.org/document/10557174>
- [13] K. Vuk Balič, ind. "Single Optical Micro-Ring-Resonator-Based Fading Compensation for RoF," BalkanCom, 2024, <https://ieeexplore.ieee.org/document/10557180>
- [14] K. Vuk Balič, ind. "Analog wavelength locking in an optical single-sideband transmitter of a millimeter-wave RoF," Photonics. 2023, <https://www.mdpi.com/2304-6732/10/12/1341>
- [15] T. Mlinar, ind. "Comparison of coverage-prediction models for modern mobile radio networks," Electronics. 2023, <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/22/4554>
- [16] T. Mlinar, ind. "Centimeter positioning accuracy in modern wireless cellular networks," Informacije MIDEM. 2023, <https://ojs.midem-drustvo.si/index.php/InfMIDEM/article/view/1756>
- [17] V. Vrh, ind. "Kvantne tehnologije daljinskega zaznavanja in kvantni radar," ERK, 2024 https://erk.fe.uni-lj.si/2024/papers/vrh/quantne_tehnologije.pdf
- [18] V. Eržen, ind. "Opazovanje injekcijske vključitve FP laserske diode," ERK, 2024 https://erk.fe.uni-lj.si/2024/papers/erzen/opazovanje_injekcijske.pdf
- [19] L. Zmrzlak, ind. "Radiofrekvenčna stopnja za radar na osnovi tehnologije mikrovalovne fotonike," SRK, 2024
- [20] L. Podbregar, ind. "Advances in and applications of microwave photonics in radar systems: a review," Photonics. 2025, <https://www.mdpi.com/2304-6732/12/6/529>
- [21] L. Podbregar, ind. "Razdeljevanje signala lokalnega oscilatorja za radarske sisteme," SRK 2024





Popravljanje odstopanj GNSS zaradi motenj z uporabo globokih časovnih grafov

Ivana Kesić¹, Aljaž Blatnik², Carolina Fortuna¹, Blaž Bertalančič¹

¹Institut Jožef Stefan,

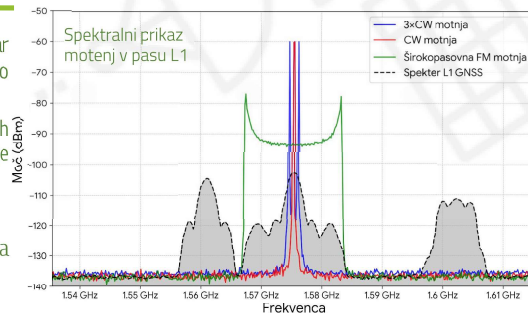
²Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani

Motivacija

Globalni navigacijski satelitski sistemi (GNSS) so temelj sodobne navigacije [1], vendar so signali ob prihodu na Zemljo izjemno šibki, pod pragom termičnega šuma. Zato so sprejemniki inherentno ranljivi na radiofrekvenčne motnje [2].

Zaradi vse večje dostopnosti programljivih radijev (SDR) je ustvarjanje kompleksnih motilnih signalov postalo trivialno. V raziskavi se osredotočamo na analizo in blaženje treh prevladujočih tipov motenj:

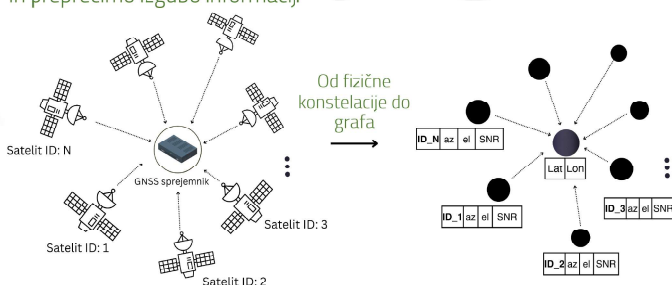
- ozkopasovna motnja z eno nosilno frekvenco (enofrekvenčna CW),
- motnja s tremi toni, ki zajema večje spektralno območje (trifrekvenčna 3xCW),
- frekvenčno moduliran signal, ki povzroča motnjo čez celoten pas L1 (širokopasovna FM motnja).



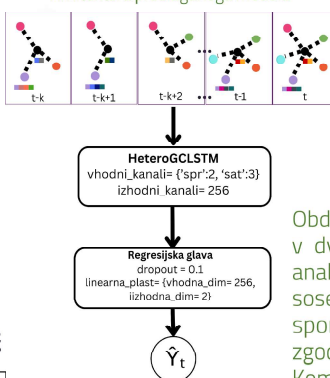
Metodologija

Rešitev temelji na predstavitvi podatkov. Namesto da satelitske signale obravnavamo kot časovne vrste, fizično konstelacijo neposredno preslikamo v dinamičen usmerjen graf. Sprejemnik v njem nastopa kot osrednje vozlišče, povezano z vsemi sateliti, ki so v danem trenutku vidni.

Ključna prednost tega pristopa je naravna prilagodljivost. Ker se grafna struktura sprti prilagaja, se predstavitev samodejno posodobi ob vsaki spremembi števila satelitov – zaradi njihovega gibanja ali zpada signala ob motnjah. Tako ohranimo geometrijsko skladnost podatkov in preprečimo izgubo informacij.



Arhitektura predlaganega modela

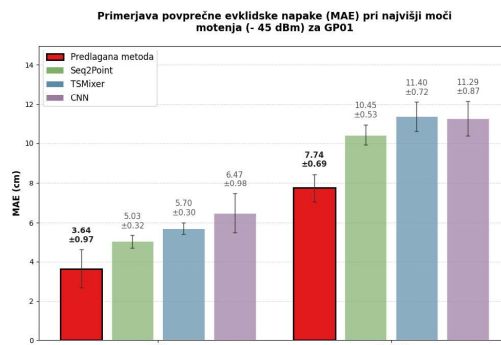
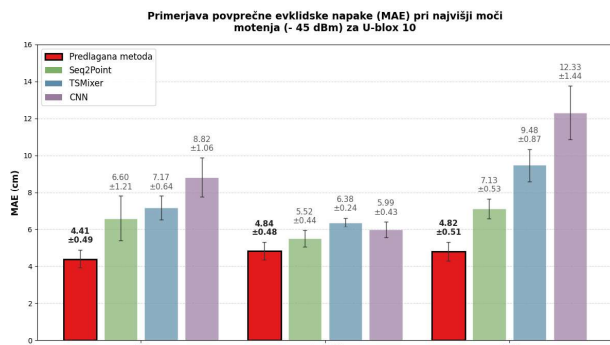


Za obdelavo podatkov smo razvili model nevronske mreže, zasnovan na HeteroGCLSTM [3]. Model temelji na heterogenem grafu, v katerem satelitska vozlišča nosijo podatke o SNR, azimutu in elevaciji, sprejemno vozlišče pa vsebuje informacijo o trenutni oceni zemljepisne dolžine in širine.

Obdelava v plasti HeteroGCLSTM poteka v dveh korakih. Prostorska konvolucija analizira geometrijo in vpliv motnje na sosednje satelite, medtem ko časovni spomin (LSTM) z analizo 10-sekundne zgodovine zajame dinamiko motnje. Kombinacija obeh mehanizmov omogoča, da model kljub motnjam natančno oceni napako in izračuna popravek položaja.

Meritve

- Zbiranje podatkov: Meritve so potekale v nadzorovanem laboratorijskem okolju s kabelsko povezavo, kjer smo s kombiniranjem signalov ustvarili nadzorovano okolje s sintetiziranimi RF motnjami (CW, 3xCW, FM) v razponu moči od -70 dBm do -45 dBm.
- Strojna oprema: Uporabili smo dva različna sprejemnika (U-blox MAX-M10 in Ai-Thinker GPO1), da ovrednotimo metodo neodvisno od proizvajalca čipa.
- Metrika: Uporabljena je povprečna evklidska napaka (MAE) v centimetrih, ki predstavlja povprečno napako položaja (nižji MAE pomeni boljšo natančnost).



- Rezultati potrjujejo, da predlagana metoda (rdeči stolpec) dosledno prekaša referenčne metode (Seq2Point, TSMixer, CNN) na obeh sprejemnikih.
- Glavna prednost se pokaže v pogojih močnih motenj, kjer klasični sprejemniki izgubijo sledenje satelitom. Ker predlagani model konstelacijo obravnava kot dinamičen graf, se naravno prilagodi izpadom vozlišč (satelitov), kar se kaže v visoki stabilnosti in centimetrski natančnosti popravka, ne glede na uporabljeno strojno opremo.

Reference

- [1] V. Hamza, B. Stopar, O. Sterle, P. Pavlovčič-Prešeren, "Recent Advances and Applications of Low-Cost GNSS Receivers: A Review," GPS Solut. 2025, <https://link.springer.com/article/10.1007/s10291-025-01815-x>
- [2] A. Blatnik, B. Batagelj, "Evaluating gnss receiver resilience: A study on simulation environment repeatability," Electronics, 2025, <https://www.mdpi.com/2079-9292/14/9/1797>
- [3] B. Rozemberczki, nd, "Pytorch geometric temporal: Spatiotemporal signal processing with neural machine learning models," CIKM 2021, <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3459637.3482014>

Napredne metode zaznavanja objektov pod površino

Primož Smogavec¹, Blaž Pongrac¹, Marko Vovk¹, Jon Tofant¹, Andrej Sarjaš¹, Pane Andov¹, Dušan Gleich¹

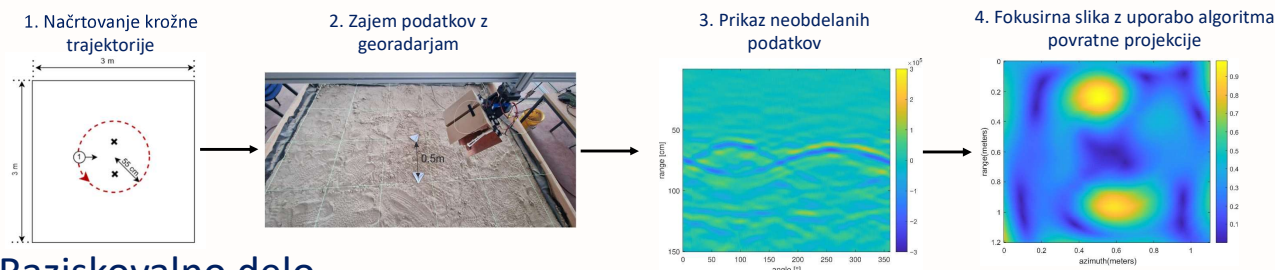
¹Laboratorij za obdelavo signalov in daljinska vodenja, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Univerza v Mariboru

Motivacija

Odkrivanje plitvo zakopanih objektov je ključno na številnih področjih, kot so humanitarno razminiranje, varnostne aplikacije, geološke raziskave in nadzor infrastrukture. Klasične metode georadarja (angl. Ground penetrating radar - GPR) pogosto temeljijo na navzdol usmerjenih meritvah, ki omogočajo dobro globinsko penetracijo, vendar so neučinkovite pri hitrem pregledu večjih območij in zahtevajo zahtevno interpretacijo hiperboličnih odbojev v B-posnetkih.

Razvoj brezpilotnih letalnikov (UAV) omogoča uporabo zračno sklopljenih GPR sistemov [1], ki povečajo varnost in dostopnost meritev na nevarnih ali težko dostopnih terenih. Hkrati napredni postopki sintetične odprtine (SAR) in sodobni algoritmi obdelave signalov omogočajo izboljšano prostorsko ločljivost ter bolj zanesljivo identifikacijo objektov.

Motivacija raziskave je primerjava različnih načinov zajema GPR podatkov pri zračno sklopljenem SFCW radarju ter ocena njihove učinkovitosti pri zaznavi plitvo zakopanih objektov, z namenom izboljšanja pokritosti območja, kakovosti fokusiranja in zanesljivosti detekcije [2,3].



Raziskovalno delo

Raziskovalno delo temelji na razvoju in eksperimentalni validaciji modularnega zračno sklopljenega SFCW georadarskega sistema [4], nameščenega na premikajočo se platformo. Sistem deluje v frekvenčnem območju 500 MHz–2,5 GHz in omogoča uporabo različnih načinov zajema podatkov.

Primerjani so bili trije pristopi: **navzdol usmerjen GPR**, **bočno usmerjen GPR**, **krožni SAR zajem**.

Za fokusiranje podatkov je bil uporabljen algoritem povratne projekcije (angl. back-projection), ki omogoča pretvorbo hiperboličnih odbojev v točkovne reprezentacije objektov. Meritve so bile izvedene v nadzorovanem poligonu, pri čemer so bili uporabljeni reflektorji in dejanski kovinski objekti, nameščeni na površini in zakopani do globine 30 cm.

Analiza rezultatov je pokazala, da bočni in krožni SAR načini omogočajo bistveno večjo pokritost območja in boljšo lateralno ločljivost v primerjavi z navzdol usmerjenim GPR. Ugotovljeno je bilo tudi, da polarizacija VV praviloma omogoča boljše fokusiranje ciljev. Raziskava potrjuje, da kombinacija zračno sklopljenega GPR in SAR-pristopov predstavlja učinkovit način za izboljšano zaznavo plitvo zakopanih objektov.

Vzporedno so bili preučeni tudi načini odprave močnih površinskih odbojev [5,6], ki so glavni vzrok saturacije sprejemnika in prekrivanja šibkih odbojev izpod površja. Nadaljnje raziskave potrjujejo, da ima geometrija postavitve anten in njihova kotna orientacija pomemben vpliv na zaznavnost plitvo zakopanih kovinskih objektov [7].

Poleg klasičnih aplikacij zaznavanja objektov se GPR vse bolj uporablja tudi za karakterizacijo lastnosti tal. Z uporabo metod globokega učenja [8] je mogoče s križno polariziranim GPR signalom uspešno oceniti vlažnost tal.

Napredne metode obdelave signalov dodatno izboljšujejo uporabnost GPR sistemov. Z uporabo modelov kot so YOLOv8 [9] dosežemo samodejno prepoznavo objektov v GPR posnetih. Raziskave se širijo tudi na nova področja uporabe, kot je zaznavanje objektov iz plastičnih materialov. Zaznavnost teh s pomočjo radarskih metod je prikazana v [10], kjer je z ustrezno izbiro frekvenčnega območja in obdelave signalov mogoče zaznati tudi tarče z nizkim elektromagnetnim kontrastom.

Reference

- [1] D. Šipoš, ind. "A Light weight and Low-Power UAV-Borne Ground Penetrating Radar Design for Landmine Detection" Remote Sens 2020, <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/8/2234>
- [2] P. Smogavec, ind. "Comparative Study of GPR Acquisition Methods for Shallow Buried Object Detection" Remote Sens. 2024, <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/21/3931>
- [3] D. Gleich, ind. "GPR Acquisition Methods Comparison" Telsiks 2023, <https://ieeexplore.ieee.org/document/10316164>
- [4] P. Smogavec, ind. Evaluation of Compact and Modular SFCW GPR Systems for Detecting Buried Objects ", IWSSIP 2023, <https://ieeexplore.ieee.org/document/10180244>
- [5] D. Šipoš, ind. "SFCW Radadr with an Integrated Static Target Echo Cancellation System" Sensors 2021, <https://doi.org/10.3390/s21175829>
- [6] P. Smogavec ind, ind. "Surface Reflection Suppression Method for Air-Coupled SFCW GPR Systems", Remote Sens 2025, <https://doi.org/10.3390/rs17101668>
- [7] A. Atanasković, ind. "The Influence of the Drone-Mounted Antenna Angular Position for Bistatic FL GPR Detection of Shallowly Buried Metallic Objects," IWSSIP 2023, <https://ieeexplore.ieee.org/document/10180240>
- [8] B. Pongrac, ind. "Cross-Hole GPR for Soil Moisture Estimation Using Deep Learning", Remote Sens 2023, <https://doi.org/10.3390/rs15092397>
- [9] P. Smogavec, ind. "Subsurface Object Recognition using YOLOv8" IcETRAN 2024, <https://www.etrans.rs/2024/en/proceeding/>
- [10] D. Gleich, ind. "Zaznava objektov s pomočjo radarja z umetno odprtino in brezpilotnega letalnika" ERK 2025, [https://erk.fe.uni-lj.si/2025/papers/gleich\(zaznava_plasticnih\).pdf](https://erk.fe.uni-lj.si/2025/papers/gleich(zaznava_plasticnih).pdf)

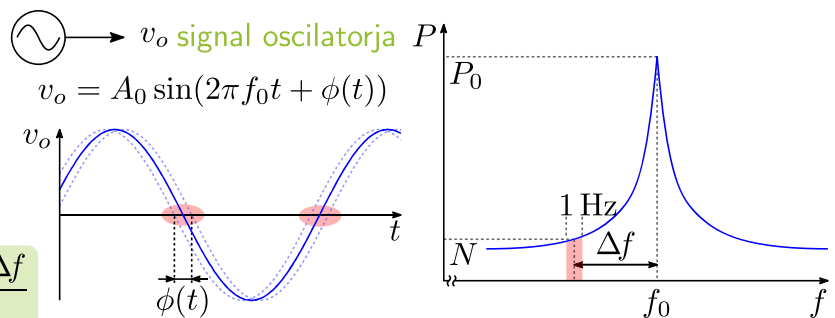
Posledice faznega šuma v sodobnih Dopplerjevih radarskih sistemih

Andrej Lavrič, Boštjan Batagelj, Matjaž Vidmar

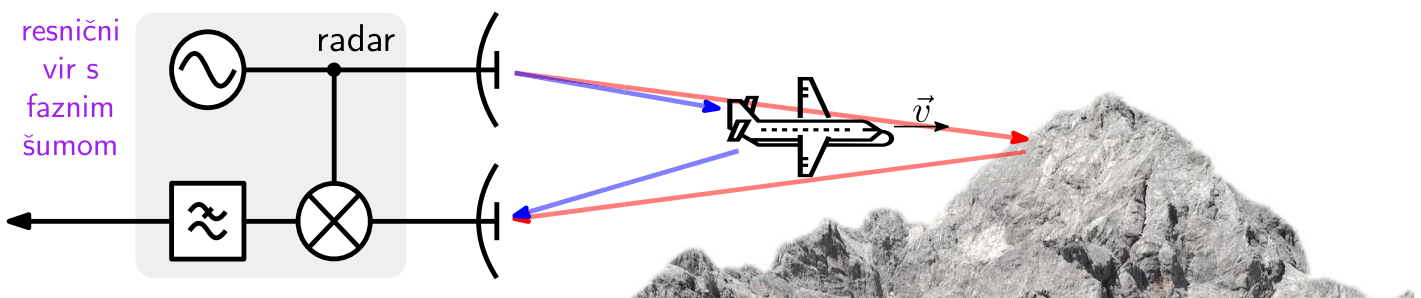
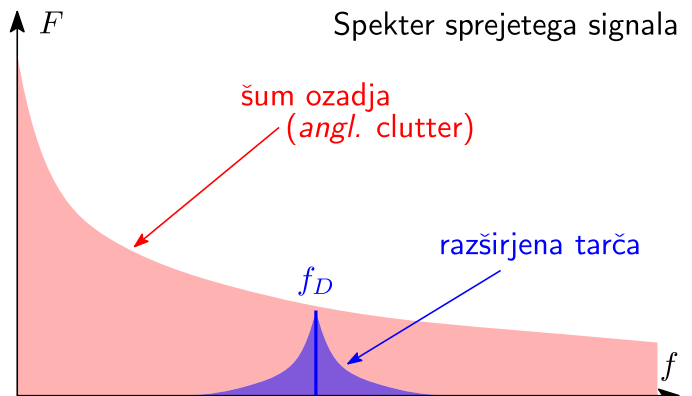
Fazni šum oscilatorja je poglavitna omejitev sodobnih elektronskih sistemov. [1] To velja tudi za Dopplerjeve radarske sisteme, kjer želja po večji prostorski ločljivosti in zaznavanju majhnih tarč poganja razvoj novih, zmogljivejših virov signala.

Fazni šum opišemo z naključnim procesom $\phi(t)$. Za vrednotenje šuma uporabimo statistične lastnosti, zato ga podajamo kot spektralno gostoto šuma $S_\phi(\Delta f)$. V tehniki se je uveljavilo podajanje s **spektralno gostoto za en bočni pas** $\mathcal{L}(\Delta f)$.

$$\mathcal{L}(\Delta f) = 10 \log \frac{1}{2} S_\phi(\Delta f) \approx 10 \log \frac{dN/d\Delta f}{P_0}$$



V Dopplerjevem radarju fazni šum povzroči, da se sprejeti signal idealno ozke spektralne črte f_D razširi, kar poslabša ločljivost hitrosti. Zato radar ne more natančno določiti hitrosti ali razlikovati tarč z majhnimi razlikami v hitrosti. Jakost sprejetega signala je sorazmerna velikosti tarče. Signal, odbit od velikega ozadja, se pojavi pri frekvenci okrog 0 Hz in se zaradi faznega šuma razmaže v bližnje frekvenčne odmike. Ta šum ozadja lahko preglaši šibke in počasne tarče, ki so izgubljene pod nivojem šuma ozadja.



Za natančno vrednotenje učinkov faznega šuma na radarski sistem je potrebno dobro poznavanje faznega šuma upravljenega oscilatorja. Mikrovalovna fotonika je omogočila razvoj novih merilnih postopkov [2], med katerimi so posebej privlačni postopki z uporabo fotonovskih kasnilnih vodov [3,4].

[1] M. Vidmar, *Extending Leeson's Equation*, Informacije MIDEM, vol. 51, no. 2, 2021

[2] A. Lavrič, M. Vidmar, B. Batagelj, *Microwave Photonic Techniques in Phase-Noise Measurements of Microwave Sources: A Review of Fiber-Optic Delay-Line Methods*, Photonics, vol. 13, no. 1, 2026

[3] A. Lavrič, M. Vidmar, B. Batagelj, *Dual-Fiber Wavelength-Tuned Photonic-Delay Phase-Noise Measurement*, Journal of Lightwave Technology, vol. 44, no. 2, 2026

[4] A. Lavrič, B. Batagelj, M. Vidmar, *Calibration of an RF/Microwave Phase Noise Meter with a Photonic Delay Line*, Photonics, vol. 9, no. 8, 2022



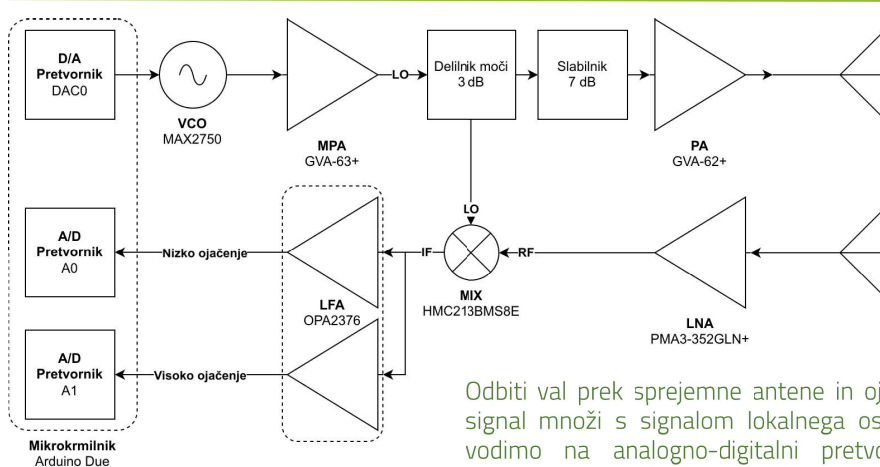


Preprost visokofrekvenčni radar na 2,4 GHz

Brin Soko, Mihael Zeme, Kristjan Komloši, Tomaž Terčič, Jaka Urh, Filip Koceli, Aljaž Blatnik, Boštjan Batagelj

Motivacija

Glavna motivacija za izvedbo projekta visokofrekvenčnega radarja je samostojna izdelava delujočega radarja, s katerim lahko določimo razdaljo ali hitrost objekta, odvisno od vrste programske kode, ki jo radar podpira (načina CW in FMCW). Študenti smo se v okviru predmeta *Satelitske komunikacije in navigacija* podrobneje seznanili z načrtovanjem visokofrekvenčnih vezij, izdelavo anten ter razvojem programske opreme, ki deluje z našim tiskanim vezjem. Projekt je zanimiv, ker združuje znanja z različnih področij in ima praktično uporabo v vsakdanjem življenju.



Zasnova radarja

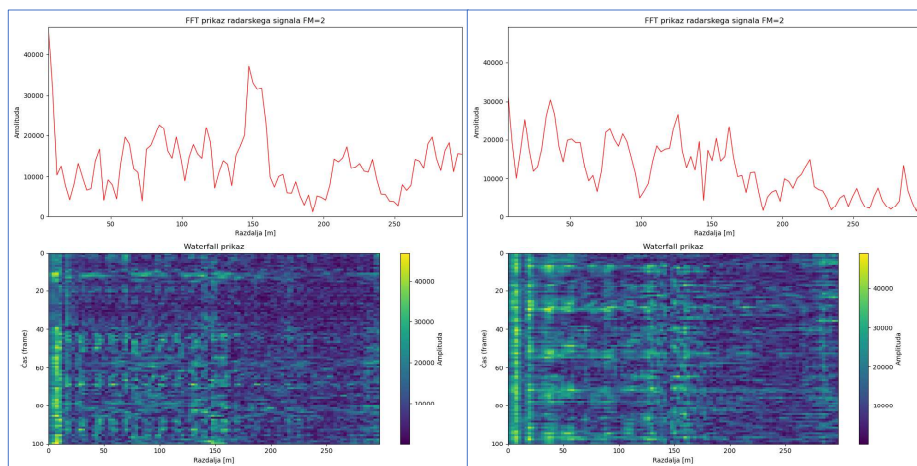
Radar deluje na principu odboja radijskih valov od objekta. V našem radarju z mikrokrmilnikom Arduino Due generiramo signal, ki ga prek napetostno krmiljenega oscilatorja prenesemo v delovno območje 2,4 GHz. Signal oddajamo z "coffee can" anteno proti objektu.

Odbiti val prek sprejemne antene in ojačevalnika vodimo na mešalnik, ki sprejeti signal množi s signalom lokalnega oscilatorja. Novi nizkofrekvenčni signal nato vodimo na analogni-digitalni pretvornik mikrokrmilnika. Mikrokrmilnik prek serijskega vmesnika pošilja podatke na računalnik, kjer v programskem okolju Python poteka nadaljnja analiza in prikaz rezultatov.

Meritve

Delovanje izdelanega radarja smo preverili z meritvami v realnem okolju pri različnih razdaljah do objekta. Meritve smo izvedli v FMCW-načinu, ki omogoča določanje razdalje do objekta na podlagi analize frekvenčnega zamika med oddanim in sprejetim signalom.

Pri meritvah na razdalji približno 20 m je bil v nizkofrekvenčnem IF-signalu jasno zaznan izrazit frekvenčni vrh, ki je ustrežal prisotnosti objekta. Signal je imel dobro razmerje signal-šum, kar omogoča zanesljivo zaznavo objekta. Pri meritvah na večji razdalji, približno 150 m, se je amplituda sprejetega signala pričakovano zmanjšala zaradi večjih izgub pri razširjanju in odboju radijskega valovanja.



meritve na 20 m

meritve na 150 m

Reference

- [1] M. I. Skolnik, Introduction to Radar Systems, McGraw-Hill, 3rd ed., 2001.
- [2] B. R. Mahafza, Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB, Chapman & Hall/CRC, 2005.
- [3] P. Wade (W1GHZ), "The Coffee-Can Antenna," Microwave antenna design notes.

Strokovni seminar Radijske komunikacije se je razvil iz izobraževalne dejavnosti, ki jo je pod okriljem projekta TEMPUS JEN-04202 v letih 1993 do 1997 izvajala Fakulteta za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Seminar je namenjen strokovnemu izpopolnjevanju strokovnjakov radijskih komunikacij in drugih, ki jih to področje zanima. Vključen je v program izvajanja vseživljenjskega izobraževanja na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Njegov namen je osveževanje, razširjanje izpopolnjevanje in poglobljanje znanja ter dvig strokovnosti zaposlenih strokovnjakov na področju optičnih komunikacij. Seminar obsega uvodni del, namenjen obnavljanju in razširjanju znanja, ter strokovni del, namenjen seznanjanju in poglobljanju v strokovna vprašanja o sistemih in njihovih sestavnih delih. Izvedenski del seminarja, ki ga izvajajo priznani vabljeni strokovnjaki, obsega nekatera pomembnejša razvojna vprašanja.

Seminar on Radio Communications evolved from the activities running at the Faculty of Electrical Engineering University of Ljubljana, during the period from 1993 to 1997 under the auspices of the European project TEMPUS JEN-04202 granted for the same period. The seminar is intended to communication professionals and other involved into the field of radio communications. It is part of the continuing education programme at the Faculty of Electrical Engineering in Ljubljana. Its primer purpose is to enhance the expertise of professionals in the field of radio communications. The seminar consists of two parts: one part is dedicated to basic technical topics aiming to refresh fundamental knowledge in radio communications, and the second part is intended to the latest research and development achievements and trends from spectrum regulation, standardization, systems and solutions, all from international and national experts.

5G, 6G, AI v omrežjih, antene za mm-valove, avtomobilski radarji, digitalne modulacije, FMCW radar, frekvenčni spekter, GNSS, koherentni radarji, IoT, MPN (zasebna 5G omrežja), obdelava signalov, radiofrekvenčne meritve, valovodi z zračno režo, standardizacija, umetna inteligenca, ultra-nizke zakasnitve, upravljanje spektra, Wi-Fi 7, Wi-Fi 8, zanesljivost omrežij

5G, 6G, AI in networks, Automotive radar, Digital modulations, Distributed radar, FMCW radar, Frequency spectrum, GNSS, IoT localization, Low latency, mmWave antennas, Mobile Private Networks (MPN), Network reliability, Radio spectrum management, Radar systems, RF measurements, Signal processing, Slotted waveguides, Standardization, Ultra-low latency, Wi-Fi 7, Wi-Fi 8

Aleš Bardorfer, Aljaž Blatnik, Andrej Hrovat, Alojz Hudobivnik, Stanislaw Jasinski, Tomaž Javornik, Ivana Kesić, Srdjan Knežević, Leon Kocjančič, Andrej Kos, Primož Lemut, Ivan Lesič, Drago Majcen, David Malovrh, Vjekoslav Matić, Grega Morano, Luka Naglič, Meta Pavšek Taškov, Klemen Pečnik, Gorazd Penko, Martin Petek, Matevž Pogačnik, Luka Podbregar, Fabio Rosato, Janez Sterle, Jurij Tratnik, Andrej Trojer, Matjaž Vidmar, Robert Vilhar, Anže Zdravec, Luka Zmrzлак.

O seminarju The seminar

Ključna gesla Keywords

Avtorji Authors

