

# Pregled tehničnih zahtev za radiofrekvenčno končno stopnjo radarja na osnovi tehnologije mikrovalovne fotonike

Luka Zmrzlak<sup>1</sup>, Aljaž Blatnik<sup>1</sup>, Mirco Scaffardi<sup>2</sup>, Antonella Bogoni<sup>2,3</sup> in Boštjan Batagelj<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, Slovenija

<sup>2</sup>National Inter-University Consortium for Telecommunications (CNIT), Photonic Networks & Technologies  
National Laboratory, Pisa, Italy

<sup>3</sup>Scuola Superiore Sant'Anna, Pisa, Italy

E-pošta: zmrzlak.luka@gmail.com, bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

## Overview of the Technical Requirements for the Radio-Frequency Front-End of a Microwave Photonic Radar

**Abstract.** *This conference paper provides an overview of the technical requirements for the radio-frequency (RF) front-end of a microwave photonic radar with combined radar-lidar architecture. Microwave photonic radar has emerged as a promising technology due to its potential implementation on a photonic integrated circuit (PIC). In comparison to conventional radars, the PIC-based system offers several advantages, including high integration density, low power consumption, and interoperability with existing photonic systems such as lidar. The RF front-end is a critical component of the radar system responsible for transmitting and receiving RF signals and converting them into optical signals for further processing. The paper examines the characteristics of the RF front-end components, including antennas, low-noise amplifiers, mixers, filters, and modulators. The importance of wideband operation, high linearity, low noise figure, and frequency flexibility is highlighted in relation to the performance requirements of a microwave photonic radar system. The presented information contributes to the advancement of this emerging radar technology and facilitates further research and development in the field.*

## 1 Uvod

Sodobni radarji (angl. Radio Detection and Ranging) [1] ter lidarji (angl. LIght Detection And Ranging) [2] se uporabljajo za daljinsko zaznavanje v različnih namenih. Njihova široka uporabnost obsega navigacijo brezpilotnih vozil za sisteme izogibanja trkom z objekti, nadzor prometa, radarsko astronomijo, pomorsko navigacijo za določanje položaja mejnikov in drugih plovil, stalni nadzor za zaščito strateških infrastruktur pred morebitnimi grožnjami, meteorološko spremljanje padavin, določanje višine, sisteme za nadzor zračnih plovil, geološko opazovanje zemeljskih plasti [3, 4] ter vojaškimi sistemi za sledenje in lociranje ciljev. Razvoj radarjev je bil predmet obsežnih raziskav že od njihovega izuma, danes pa jih prevzemamo kot ključni senzor za inteligentno družbo naslednje generacije. Radarji so namreč edina tehnologija, ki je zmožna zaznavati in identificirati cilje v vseh svetlobnih in

večini vremenskih razmer, ob vsakem času ter na velikih razdaljah.

Tradicionalni radarski sistemi so zgrajeni na osnovi elektronskih tehnologij, ki pa so še vedno zelo omejene s pasovno širino, ločljivostjo in porabo električne energije, kar predstavlja težave pri zaznavanju in identifikaciji majhnih ter počasnih objektov v kompleksnem okolju. Za reševanje teh problemov se lahko v radarje integrirajo fotonične tehnologije [5]. Zaradi povečane pasovne širine, linearnega odziva, prenosa z majhnimi izgubami, večdimenzionalnega multipleksiranja, ultrahitre analogne obdelave signalov in odpornosti na elektromagnetne motnje, ki jih ponuja sodobna fotonika, je mogoče z izvedbo radarja v optični domeni doseči povečane zmogljivosti v smislu ločljivosti, prostorske pokritosti in hitrosti zaznave, kar je zelo težko, predvsem pa izjemno drago doseči s konvencionalno, celo naj sodobnejšo elektroniko.

Fotonika se je v preteklih desetletjih izkazala za prelomno na mnogih tehnoloških področjih. Na fotoniki osnovani sistemi in tehnike postajajo vse bolj pogosti na področjih, ki jih je tradicionalno obvladovala elektronika. Daljinsko zaznavanje je le eno izmed teh, ki še posebej izkorišča sinergijo med fotoničnimi in elektronskimi tehnologijami [6, 7], pri proizvodnji izjemno stabilnih frekvenčnih nosilnikov [8, 9], frekvenčni pretvorbi signalov navzgor in navzdol [10], [11], prenosu [12], analogni-digitalni (A/D) pretvorbi [13, 14] in oblikovanju antenskega snopa [15, 16], da navedemo le nekaj funkcij. Tipični mikrovalovno-fotonski (angl. microwave photonic – MWP) podsistemi, kot so optoelektronski oscilatorji (angl. opto-electronic oscillator – OEO) [17], širokopasovni funkcijski generatorji, optična omrežja za oblikovanje snopa (angl. optical beam-forming networks – OBFN), mešalniki MWP, sistemi analogne hitre Fourierjeve transformacije v realnem času (angl. real-time Fourier-transform – RTFT) in fotonski analogno-digitalni pretvorniki, so bili predhodno razviti in optimizirani za potencialno uporabo v radarjih. Poznana so poročila o visoki zmogljivosti fotoniko temelječih radarjev [18], ki uporabljajo isti optični vir za generiranje in sprejemanje signalov. Njihova neprimerljiva prednost glede na vrsto uporabljenih valovnih oblik in nosilno frekvenco je bila predhodno že dokazana [18]. Poleg tega so bile nedavno predlagane različne arhitekture MWP radarjev, ki omogočajo izjemno prilagodljivost, funkcionalnost,

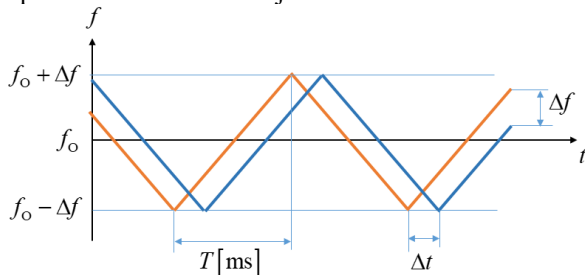
široko razširitev ter visoko ločljivostno radarsko slikanje z uporabo mikrovalovne fotonike [19].

Sistemi MWP imajo dve ključni prednosti. Prva je izjemna prilagodljivost glede nosilne frekvence radijskega signala in uporabljene valovne oblike, kar omogoča hkratno obdelovanje več različnih signalov. Druga prednost je koherenca med vsemi generiranimi signali. Pomembnost koherence pri izkoriščanju raznolikosti je bila nedavno dokazana pri radarjih, ki delujejo z uporabo fotonične tehnologije in uporabljajo več frekvenčnih pasov [20], kjer je mogoče združiti surove podatke iz odbitih koherentnih signalov, ki so oddani v različnih frekvenčnih pasovih.

V tem konferenčnem prispevku predstavljamo načrtovanje in eksperimentalno karakterizacijo radijsko-frekvenčnega (RF) vhodnega dela za sistem MWP radarja, ki je primeren za implementacijo na fotonso integriranih vezjih (PICs). Struktura članka je naslednja. V naslednjem poglavju na hitro opišemo radar s frekvenčno moduliranim neprekinjenem valovanjem (angl. Frequency Modulated Continuous Wave – FMCW). Sledi opis radarskega dela radar-lidar oddajnik-sprejemnik, pri čemer se omenjeni dve tipologiji senzorjev ne obravnavata kot neodvisna podsistema, ampak kot deli enovitega fotonso temelječega sistema, ki si delita skupno strojno opremo. Tretje poglavje predstavlja pripadajoči RF vhodno/izhodni del z opisom tehničnih zahtev za RF gradnike, kot so antene, nizkošumni ojačevalniki, mešalniki in sita. V zaključku je povzet prispevek članka.

## 2 FMCW radar

Oddajnik in sprejemnik frekvenčno moduliranega (angl. Frequency Modulated – FM) radarja imata običajno ločeni anteni in delujeta neprekinjeno (angl. Continuous Wave – CW). Frekvenca signala oddajnika se neprenehoma spreminja s periodo nekaj milisekund, kot to prikazuje Slika 1. Frekvenca signala sprejemnika sledi frekvenci oddajnika z določeno zakasnitvijo  $\Delta t$ , ki je premosorazmerna oddaljenosti tarče.



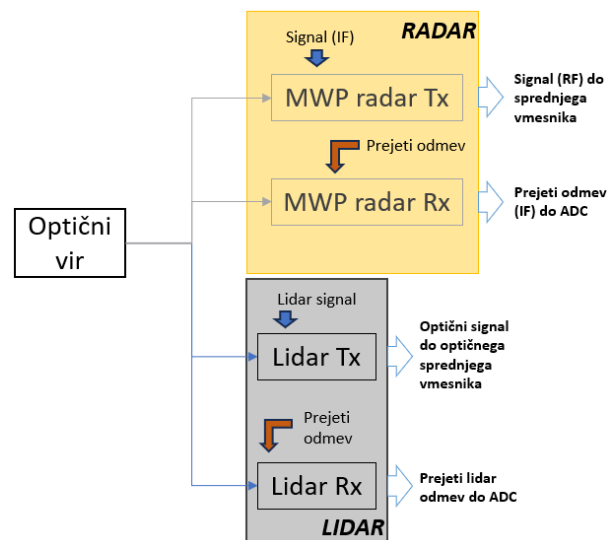
Slika 1. Prikaz frekvence oddanega in časovno zakasnjene sprejete signala v odvisnosti od časa za radar FMCW.

Glede na princip delovanja, ima radar FMCW v primerjavi z drugimi radarji naslednje prednosti: zmožnost merjenja kratkih dolžin do tarče, visoka ločljivost razdalje do tarče, predhodno mešanje med oddanim in sprejetim signalom na nizke frekvence omogoča uporabo počasnih A/D pretvornikov, ter

zmožnost istočasnega merjenja razdalje do tarče in njene hitrosti na osnovi Dopplerjevega frekvenčnega premika.

## 3 MWP radar

Predlagani kombinirani radar-lidar, katerega arhitektura je prikazana na Sliki 2, je sestavljen iz radarskega in lidarskega dela. Omenjena radarska senzorska dela nista neodvisna podsistema, temveč dela enotnega sistema, ki temelji na fotoniki in si deli skupno strojno opremo. Podsistema lidar in radar si delita isto fotonso jedro, kjer se generirajo in pridobivajo signali. Radar izvaja neprekinjeno spremljanje in aktivira lidarski podsistem, ko zazna cilj in se pojavi potreba po izboljšani ločljivosti. Vsak senzor oddaja lastno valovno obliko in prejema odmeve, ki se odbijejo od ciljev. Prejeti signali se digitalizirajo s pretvorniki A/D in se obdelujejo ločeno za zagotavljanje radarske detekcije/sledenja in lidarskega slikanja. To ne le zmanjšuje zahteve po strojni opremi, velikosti in porabi energije, ampak tudi zagotavlja neločljivo skladje med obema senzorjema, kar pripomore k povečanju informacij, pridobljenih z združevanjem rezultatov.



Slika 2. Arhitektura sistema

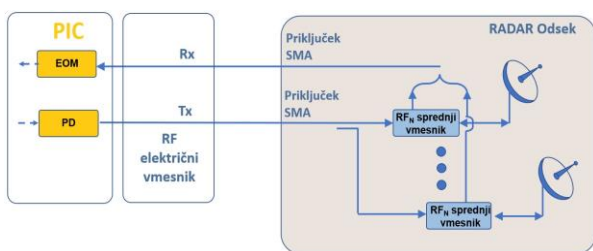
Radarski del je sestavljen iz fotonkega oddajnika in sprejemnika, ki temeljita na elektro-optičnem modulatorju (EOM) in hitri fotodiodi (PD). EOM, implementiran kot Mach-Zehnderjev modulator (MZM), poganja mikrovalovni signal, ki ga generira elektronski oscilator in zagotavlja signal z vmesno frekvenco (angl. intermediate-frequency – IF). Signal IF se nahaja na vmesni stopnji radarskih sprejemnikov in je izbran pri standardni frekvenci, kjer so na voljo nizkofrekvenčni ojačevalniki in filtri. Signal IF modulira neprekinjeno optično valovanje. Optični signal se nato detektira s fotodiodo, filtrira in s pomočjo antene odda proti oddaljeni tarči kot radio frekvenčni (RF) signal. Odmevni signali, ki se odbijejo od objekta in

zberejo s pomočjo iste (ali ločene) antene, modulira drugi MZM in detektira hitra fotodiode [21], ki optični signal pretvori v električni signal, tega pa filtrira električno sito na izhodu fotodiode. Nastali električni signal se nato elektronsko obdela z namenom, da se izluščijo radarske informacije.

Na fotoniki osnovano množenje frekvence električnih signalov, uporablja mehanizem zaznavanja optičnih signalov z različnimi (optičnimi) frekvencami na eni sami fotodiode (PD). Ta proces, znan tudi kot heterodinsko mešanje, ustvarja signal RF, katerega frekvenca je enaka razliki optičnih signalov, ki vstopajo v fotodiode. Za zagotavljanje visokokakovostnih signalov RF morajo biti modulirani in nedomulirani laserji med seboj fazno sklenjeni. Sodobne tehnike fazno-sklenjenih laserjev [22] omogočajo precej boljše kakovost signala RF v primerjavi z običajnimi tehnikami, pri frekvencah od nekaj GHz dalje. Prilagodljivost signala RF je enostavno dosežena z nastavitvijo uglašenosti laserja [23] ali z uporabo večfrekvenčnega optičnega vira, kot je optični frekvenčni glavnik (angl. optical frequency comb – OFC). OFC oddajajo več optičnih signalov pri različnih frekvencah, ločenih z enakim razmikom  $\Delta f_{OFC}$ , zaradi česar njihov frekvenčni spekter spominja na zobe glavnika. Frekvenčne komponente OFC imajo zanimivo lastnost, da so med seboj neločljivo fazno sklenjene. Zato uporaba OFC omogoča sočasno modulacijo več frekvenčnih komponent v enem samem EOM s pomočjo električnih signalov z različnimi nosilnimi frekvencami  $f_{IF}$ . S tem se ustvarita par stranskih pasov okoli vsake spektralne črte glavnika. Pri heterodinskem mešanju frekvenčnih komponent in stranskih bočnih pasov se ustvari mnogo replik električnih signalov na različnih nosilnih frekvencah, kar omogoča sočasno generiranje različnih, koherentnih RF signalov, pri precej višjih nosilnih frekvencah od izvirnih električnih signalov. Vse naprave, potrebne za izvedbo predlagane agilne arhitekture MWP radarja, je mogoče izvesti s pomočjo trenutno dostopnih komercialnih platform za integracijo, kot sta silicij na izolatorju in/ali indijev fosfid [24].

#### 4 RF sprednji vmesnik

Želimo, da je fotoniki radarski del integriranega fotonskega vezja (PIC) zasnovan kot povsem frekvenčno prilagodljiv v X- in Ku-pasovih (8-18 GHz). Posledično je za spremljajoči RF vmesnik zaželeno, da je zasnovan čim bolj širokopasovno, vendar je bil za preliminarne poskuse optimiziran za frekvenčno območje okoli 10 GHz. [25]



Slika 3. Povezava PIC z radarskim delom

RF sprednji vmesnik sestoji iz oddajnega (Tx) in sprejemnega (Rx) RF verižnega sistema, kot je prikazano na Sliki 3. RF verižni sistem, prikazan na Sliki 4, predstavlja kaskado elektronskih podsistemov, ki vključujejo več stopenj ojačevanja, (pomožni) cirkulator in večpasovni niz krpičastih anten.

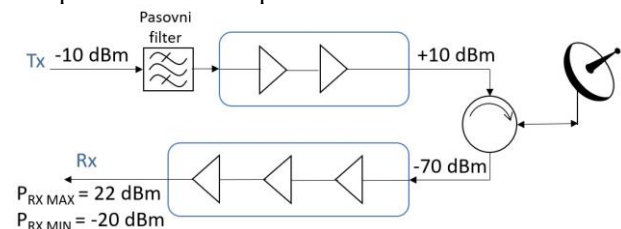
Signal, ki prihaja iz PIC je predhodno ojačan tako, da v radarski del vstopa signal moči -10 dBm. Seveda je na vходу potrebno RF sito (pasovni filter), da se izločijo vse neželene harmonske komponente. Zaželeno je vsaj 30 dB zadušitev tretje harmonske komponente. Glede na odločitev pri katerih frekvencah želimo validirati delovanje radarja, se tako izbere ustrezno sito (npr. 10 GHz in 15 GHz). Vsakršno sito bo vneslo dodatne izgube, kar v povprečju zniža moč vhodnega signala na -13 dBm. Od moči poslane proti anteni je pričakovana sprejeta moč, kot prikazuje preglednica 1. V primeru antene z večjim dobitkom ali večje oddajne moči lahko pričakujemo uspešno detekcijo tarče na večjo razdaljo.

Preglednica 1. Moč sprejetega signala v odvisnosti od moči oddanega signala.

oddana moč [dBm]	20	10	5	0
odmevna površina [m <sup>3</sup> ]	1	1	1	1
dobitek oddajne antene [dBi]	10	10	10	10
dobitek sprejemne antene [dBi]	10	10	10	10
frekvenca [GHz]	10	10	10	10
razdalja [m]	10	10	10	10
sprejeta moč [dBm]	-63	-73	-78	-83

Na sprejemni strani je potrebno imeti vsaj 60 dB ojačenja, saj je tu željena tudi rezerva zaradi napak pri izdelavi PIC, ki se odražajo v povečanih izgubah.

Čeprav imata sistemsko ojačanje in poraba energije ključno vlogo pri uporabnosti končnega sistema, lahko njegovo delovanje močno poslabšata visoka vrednost šuma sprejemnika ter slabši fazni šum namenske oddajne stopnje [26], pri čemer je treba za doseganje največjega dometa čim bolj zmanjšati šume v frekvenčnem pasu delovanja in intermodulacijska popačenja izhodne stopnje. Fizične značilnosti, kot so velikost in teža, so prav tako pomembne, saj je MWP radar v našem primeru namenjen uporabi v brezпилotnem letalnem plovilu.



Slika 4. Arhitektura RF sprednjega vmesnika

Fazni šum oddanega signala ima ključno vlogo pri končni uspešnosti sistema, saj lahko močno vpliva na sposobnost prepoznavanja in razlikovanja med različnimi cilji, še posebej pri uporabi CW ali drugih koherentnih pristopov k zaznavanju [27]. Prvi ojačevalnik v sistemu ima izjemno pomembno vlogo pri

zagotavljanju fazno-stabilnostne uspešnosti, saj se vsakršen šum, ki ga vpeljemo s prvim ojačevalnikom, kasneje še okrepi v nadaljnjih stopnjah, kar otežuje njegovo odpravljanje.

## 5 Zaključek

Ta prispevek podaja pregled tehničnih zahtev za radiofrekvenčni del radarja na osnovi mikrovalovne fotonike, ki je kombiniran v arhitekturo radar-lidar. MWP radar je obetaven zaradi potencialne izvedbe na fotonskem integriranem vezju (PIC), ki v primerjavi z običajnimi radarji ponuja visoko stopnjo integracije, nizko porabo energije in interoperabilnost z obstoječimi fotonskimi sistemi, kot je lidar. RF del radarja je kritični del radarskega sistema, saj skrbi za oddajanje in sprejemanje RF signalov ter njihovo pretvorbo v optične signale za nadaljnjo obdelavo. Prispevek preučuje značilnosti RF gradnikov, vključno z antenami, nizkošumnimi ojačevalniki, mešalniki in siti. Izpostavljen je pomen širokopasovnega delovanja, visoke linearnosti, nizkega šuma in frekvenčne prilagodljivosti. Predstavljene informacije prispevajo k napredku te nastajajoče radarske tehnologije in omogočajo nadaljnje raziskave in razvoj na tem področju.

## Zahvala

Delo je nastalo pod okriljem programa NATO Znanost za mir, projekta CLARIFIER - SPS.MYP G5888. This research is supported by CLARIFIER, NATO multi-year project Project CLARIFIER - SPS.MYP G5888.

## Literatura

- [1] Merrill Skolnik, "Radar Handbook," McGraw-Hill Education, 3rd ed., 2008.
- [2] Paul F. MacManamon, "LiDAR Technologies and Systems," SPIE Press, vol. PM300, 2019.
- [3] D. Šipoš and D. Gleich, "A Lightweight and Low-Power UAV-Borne Ground Penetrating Radar Design for Landmine Detection," *Sensors*, vol. 20, no. 8, p. 2234, Apr. 2020, doi: 10.3390/s20082234.
- [4] V. Kafedziski, S. Pecov and D. Tanevski, "Target Detection in SFCW Ground Penetrating Radar with C3 Algorithm and Hough Transform based on GPRMAX Simulation and Experimental Data," 2018 25th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), Maribor, Slovenia, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/IWSSIP.2018.8439227.
- [5] S. Pan, D. Zhu and F. Zhang, "Microwave photonics for modern radar systems," *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, vol. 31, no. 3, pp. 219-240, Jun. 2014.
- [6] J. Capmany, D. Novak, "Microwave photonics combines two worlds," *Nat. Photonics* 1(6), pp. 319–330 (2007).
- [7] G. Serafino et al., "Toward a New Generation of Radar Systems Based on Microwave Photonic Technologies," *JLT*, vol. 37, no. 2, pp. 643-650, 15 Jan., 2019
- [8] B. Batagelj, L. Bogataj and M. Vidmar, "Key properties and design issues for an opto-electronic oscillator," 2015 17th ICTON, Budapest, 2015, pp. 1-4.
- [9] G. Serafino et al., "Phase and Amplitude Stability of EHF-Band Radar Carriers Generated From an Active Mode-Locked Laser," *JLT*, vol. 29, no. 23, pp. 3551-3559, Dec.1, 2011.
- [10] S.R. O'Connor, M.C. Gross, M.L. Dennis, T.R. Clark, "Experimental demonstration of RF photonic downconversion from 4–40 GHz," 2009 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), Valencia (ES), pp. 1-3 (2009).
- [11] S. Li, X. Zheng, H. Zhang, B. Zhou, "Highly linear millimeter-wave over fiber transmitter with subcarrier upconversion," *CLEO: 2011 - Laser Science to Phot. Appl.*, Baltimore, MD, pp. 1-2 (2011).
- [12] A. Malacarne et al., "A Ultrawide-Band VCSEL-Based Radar-Over-Fiber System," 2019 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), Ottawa, ON, Canada, 2019.
- [13] F. Laghezza, F. Scotti, P. Ghelfi, A. Bogoni, S. Pinna, "Jitter-limited photonic analog-to-digital converter with 7 effective bits for wideband radar applications," 2013 IEEE Radar Conference (RadarCon13), Ottawa, ON, pp. 1-5 (2013).
- [14] A. Khilo et al., "Photonic ADC: overcoming the bottleneck of electronic jitter," *Opt. Express* 20, 4454-4469 (2012).
- [15] L. Zhuang et al., "Novel ring resonator-based integrated photonic beamformer for broadband phased array receive antennas—Part II: Experimental prototype," *IEEE J. of Lightw. Techn.*, 28 (1), pp. 19-31 (2010).
- [16] G. Serafino et al., "High-Performance Beamforming Network Based on Si-Photonics Phase Shifters for Wideband Communications and Radar Applications", accepted for publication by *IEEE J. of Sel. Topics in Quantum El.*, 2020. doi: 10.1109/JSTQE.2020.2995292.
- [17] M. A. Ilgaz and B. Batagelj, "Opto-Electronic Oscillators for Micro- and Millimeter Wave Signal Generation," *Electronics*, vol. 10, no. 7, p. 857, Apr. 2021, doi: 10.3390/electronics10070857.
- [18] P. Ghelfi et al., "A fully photonics-based coherent radar system", *Nature*, 507, pp. 341–345 (2014).
- [19] S. Pan and Y. Zhang, "Microwave Photonic Radars," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 19, pp. 5450-5484, 1 Oct.1, 2020, doi: 10.1109/JLT.2020.2993166.
- [20] P. Ghelfi et al., "Photonics for Radars Operating on Multiple Coherent Bands," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 2, pp. 500-507, 15 Jan.15, 2016.
- [21] A. Lavrič and B. Batagelj, "An Affordable Laboratory Photodiode up to 11.5 GHz for Microwave Photonics Experiments," 2019 International Workshop on Fiber Optics in Access Networks (FOAN), Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2019, pp. 47-50, doi: 10.1109/FOAN.2019.8933688.
- [22] L. Naglic, L. Pavlovic, B. Bategelj and M. Vidmar, "Improved phase detector for electro-optical phase-locked loops", *Electron. Lett.*, vol. 44, no. 12, pp. 758-760, Jun. 2008.

- [23] K. Neophytou, M. Steeg, J. Tebart, A. Stöhr, S. Iezekiel and M. A. Antoniadou, "Simultaneous User Localization and Identification Using Leaky-Wave Antennas and Backscattering Communications," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 37097-37108, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3161565.
- [24] F. Falconi et al., "A Combined Radar & Lidar System Based on Integrated Photonics in Silicon-on-Insulator," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 1, pp. 17-23, 1 Jan.1, 2021, doi: 10.1109/JLT.2020.3023496.]
- [25] L. Zmrzlak, A. Blatnik, M. Scaffardi, A. Bogoni, B. Batagelj, "Transmitter and Receiver Amplifier Chains in X- and Ku-bands of Radio Frequency Front-End for Frequency-Agile Microwave Photonic Radars," 30th International Conference on Systems, Signals and Image Processing, June 27-29, 2023, Ohrid, North Macedonia
- [26] R. Boudot and E. Rubiola, "Phase Noise in RF and Microwave Amplifiers," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 59, no. 12, pp. 2613-2624, 2012.
- [27] J. A. Scheer, "Coherent radar performance estimation," *IEEE International Conference on Radar*, Arlington, VA, USA, pp. 125-128, 1990.