

Eksperimentalna evalvacija modularnega FMCW radarja

Klemen Kropec¹, Blaž Pongrac¹, Dušan Gleich¹

¹Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Koroška cesta 45, Maribor, Slovenija
E-pošta: blaz.pongrac1@um.si

Experimental evaluation of modular FMCW radar

Abstract. *This paper presents a modular short-range frequency-modulated continuous wave radar evaluation process. The proposed frequency-modulated continuous wave radar operates in frequency range between 900 MHz and 2100 MHz with a bandwidth of 1200 MHz. Its modular design enables fast and efficient development. Proposed radar was evaluated in four criteria: emitted power, noise-floor level, maximum range, and range resolution. The emitted power, noise-floor level and range resolution were as expected, while measured maximum range was lower than expected.*

1 Uvod

Radarski sistemi postajajo vse bolj pomembna tehnologija. V zadnjih letih so se razširili v avtomobilski industriji, kjer so uporabljeni za povečanje varnosti v prometu [1][2], kot tudi v vozilu [3]. Radarji so vedno bolj uporabljani v vojaške namene, hkrati pa se povečuje njihova uporaba na civilnih področjih, in sicer v gradbeništvu [4], arheologiji in zagotavljanju varnosti [5]. Uporaba radarjev je prešla tudi na druga področja, kot so to npr. pametne stavbe, kjer so radarski sistemi uporabljeni za štetje in identifikacijo ljudi v stavbi [6], v meteorologiji za spremljanje vremena, kmetijstvu za spremljanje rasti in donosa pridelkov [7], medicina, kjer uporabljamo radarske sisteme za daljinski nadzor vitalnih znakov [8], in drugih področjih.

Radarje v grobem delimo na dve večji skupini: pulzne radarje in zvezne radarje. Pulzni radarji oddajajo impulz in merijo čas preleta impulza od oddajnika do tarče in nazaj. Njihova implementacija je zahtevna in draga, vendar ponujajo hiter odziv v širokem frekvenčnem spektru. Zvezni radarji temeljijo na principu oddajanja in prejemanja zveznih valov. Tipični predstavnik je t.i. Dopplerjev radar, kjer oddamo zvezni val znane frekvence in merimo spremembo frekvence od tarče odbitega vala. Slabost zveznih radarjev je ozka pasovna širina, so pa relativno enostavni za implementacijo. V zveznih radarjih prav tako poznamo več različnih modulacijskih struktur, ki nam omogočajo merjenje razdalje do tarče in hitrost tarče. Omenimo frekvenčno moduliran zvezni radar (FMCW, ang. Frequency Modulated Continuous Wave) in stopnično frekvenčno moduliran zvezni radar (SFCW, ang. Step Frequency Continuous Wave). Oba sta z leti postala izjemno pomembna v različnih aplikacijah. Omogočata višje pasovne širine kot drugi zvezni radarji, istočasno pa je

implementacija manj zahtevna kot v primeru pulzних radarjev.

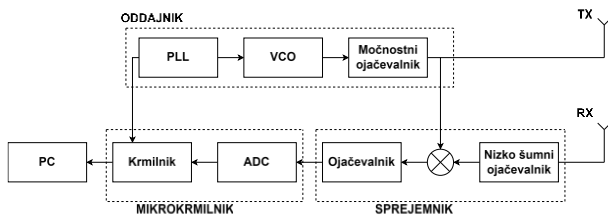
FMCW radar je uporabljen v različnih konfiguracijah: ali oddajamo zvezne signale, ali pa izvedemo t.i. kompresijo impulza. V prvem primeru ves čas oddajamo frekvenčno moduliran signal, v drugem primeru pa oddajamo frekvenčno modulirane sunke. Pulzna kompresija nam omogoča, da uporabimo principe širokopasovnega radarja, vendar z daljšimi impulzi in s tehniko zajema signalov, v večini uporabljeno v zveznih sistemih. S tem smo sistem poenostavili in ga naredili cenovno učinkovitejšega v malih in kompaktnih izvedbah.

Kompaktni FMCW radarji kratkega dosegajo so v zadnjih letih postali stalnost na različnih področjih. Vendar pa je potreba po kompaktnih FMCW radarjih vedno večja ravno zaradi širjenja nabora aplikacij.

Ta prispevek predstavlja modularno zasnovo FMCW radarja. Modularna zasnova je smiselna pri hitrem razvoju elektronskih sklopov, kjer želimo optimizirati vse posamezne dele sočasno. Razvoj z modularno zasnovo je hiter in cenovno učinkovit. Radarski sistem lahko evalviramo na podlagi podanih zahtev in pričakovanih specifikacij, ki smo jih upoštevali tekom razvoja radarskega sistema. Osredotočili smo se na naslednje specifikacije: oddajna moč, pragovni šum sprejemnika, največja merljiva razdalja in resolucija merjenja razdalje. Pri specifikacijah smo se osredotočili na stacionarne tarče. Ta prispevek prikazuje metodologijo merjenja in rezultate evalvacije modularnega FMCW radarja. Predstavljeni modularni FMCW radar se je odrezal po pričakovanjih, vendar je potrebnih več dodatnih nadgradenj, predvsem sprejemnika in napajalnega modula.

2 FMCW radar

FMCW radar generira, oddaja in zajema frekvenčno modulirane elektromagnetne valove. Oblika oddanega vala je linearno moduliran frekvenčni žvižg. Sprejet signal ima obliko enako, le da je zakasnen. Slika 1 prikazuje tipično zgradbo FMCW radarja. Oddajnik je zgrajen iz fazno-sklenjene zanke (PLL, ang. Phase-Locked Loop), ki nam omogoča sledenju zeleni frekvenci. Napetostno vodeni oscilator (VCO, ang. Voltage-Controlled Oscillator) služi za generiranje signalov sinusne oblike. Te signale nato ojačamo in oddamo preko oddajne antene (Tx). Na sprejemni strani je uporabljen sprejemnik s heterodinsko strukturo. Elektromagnetno valovanje sprejememo preko sprejemne antene (Rx). Sprejeti signal ojačamo z nizko-šumnim ojačevalnikom. Oddani in prejeti signal pomnožimo z mešalnikom, pomnoženi signal pa ustrezno ojačamo in zajamemo z analognο-digitalnim pretvornikom.



Slika 1: Zasnova FMCW radarja

S pomočjo FMCW radarja merimo čas zakasnitve med oddanim in prejetim signalom. Čas zakasnitve med sprejetim in oddanim signalom je tisti, ki ga signal potrebuje, da opravi pot od oddajnika, do tarče in nazaj do sprejemnika. Če sta oddajnik in sprejemnik na istem mestu, razdalja med objektom in sprejemnikom/oddajnikom ustreza poti, ki jo elektromagnetno valovanje prepotuje v polovici časa zakasnitve, saj signal prepotuje pot tja in nazaj, razdaljo pa ocenimo kot:

$$R = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (1)$$

kjer je R oddaljenost med tarčo in anteno, $c = 299792458 \text{ m/s}$ je svetlobna hitrost, Δt pa časovna zakasnitev med oddanim in sprejetim signalom. Razlika med sprejetim in oddanim signalom je zelo majhna, zato jo je v časovnem prostoru težko zanesljivo izmeriti. Za ta namen uporabljamo sprejemnike s t.i. heterodinsko strukturo, kjer oddani in sprejeti signal med seboj pomnožimo. Frekvenca pomnoženega signala pa nam predstavlja časovno zakasnitev med oddanim in prejetim signalom. Frekvenca pomnoženega signala f_b je razlika frekvenc obeh signalov pri času zakasnitve Δt . Ta razlika je konstantna skozi celotno dolžino frekvenčno moduliranega signala. Največja možna razlika med frekvencama je enaka pasovni širini oddanega signala B v času trajanja sunka označenem s τ_s . Iz tega sledi razmerje podano z enačbo:

$$\frac{\Delta t}{\tau_s} = \frac{f_b}{B} \quad (2)$$

Če združimo (1) in (2) dobimo enačbo za izračun oddaljenosti tarče R iz izmerjene frekvence f_b :

$$R = \frac{c \cdot f_b \cdot \tau_s}{2 \cdot B} \quad (3)$$

Največja teoretična možna izmerjena razdalja je odvisna od frekvence vzorčenja F_s . Trajanja pulza τ_s in pasovno širino signala označeno z B . Povečamo jo lahko z zoženjem pasovne širine ali s podaljšanjem dolžine trajanja impulza. Tako je največja možna izmerjena razdalja tista, ki jo dobimo pri največji možni izmerjeni frekvenci, ki pa je zaradi Nyquistovega teorema enaka polovici frekvence vzorčenja. Če v (3) vstavimo $F_s/2$, dobimo:

$$R_{max} = \frac{F_s \cdot c \cdot \tau_s}{4 \cdot B} \quad (4)$$

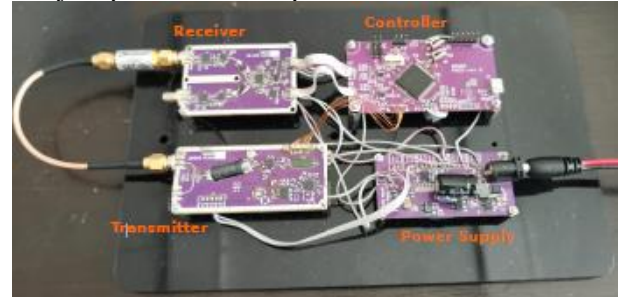
kjer je R_{max} maksimalna izmerjena oddaljenost tarče pri frekvenci vzorčenja F_s . Teoretična resolucija je odvisna le od pasovne širine. Če jo povečamo, se ločljivost zmanjša. Resolucijo ΔR izračunamo kot:

$$\Delta R = \frac{c}{2 \cdot B} \quad (5)$$

Resolucija ΔR nam predstavlja najmanjšo možno razliko med dvema tarčama, ki ju je mogoče izmeriti.

3 Predlagani modularni FMCW radar

Slika 2 prikazuje zgradbo predlaganega modularnega FMCW radarja. Izbrali smo modularno zgradbo, tako da imamo ločene enote za krmilnik, napajalno enoto, oddajnik in sprejemnik. Za takšno zgradbo smo se odločili, da imamo glede na zahteve pri uporabi možnost menjave posameznih komponent.



Slika 2: Modularna zasnova FMCW radarja. Prikazano so štirje sestavni deli: napajalni modul, oddajnik, sprejemnik in krmilnik.

Jedro krmilnika predstavlja ARM-Cortex 4 mikrokontroler, izbran krmilnik pa je STM32F407. Njegova naloga je upravljanje z oddajnikom in sprejemnikom. Predvsem je pomembno, da ob istem času začne oddajati in sprejemati signal. Oddajni del je sestavljen iz PLL, VCO in PA. Kot PLL je uporabljen ADF4158, ki ima subherčno ločljivost in pasovno širino do 6.1 GHz. Uporabljen VCO nam je omejil uporabno pasovno širino, tako so bile uporabljene frekvence med 900 MHz in 2100 MHz, kar nam omeji pasovno širino na $B = 1200 \text{ MHz}$. Frekvenčni žvižg je imel trajanje impulza $T_s = 1,5 \text{ ms}$. Ker je bila izhodna moč prenizka, smo uporabili močnostni ojačevalnik za povečanje izhodne moči. Izhodni signal se razdeli z uporabo močnostnega delilnika razdeli na dva dela, ki se razlikujeta le po moči (delitev 80:20). En del gre na oddajno anteno (80% moči), drugi pa na en vhod mešalnika (20% moči), ki je na sprejemniku. Sprejemni del je sestavljen iz sprejemne antene, nizko šumnega ojačevalnika in mešalnika. Pred zajemom je še ojačevalno vezje, kar nam razširi dinamično območje radarja. Za samo evaluacijo smo naredili štiri preizkuse. Prvi preizkus je bil merjenje izhodne moči radarja, drugi je bil merjenje praga šuma (ang. noise floor), v tretjem smo izmerili največjo možno razdaljo, ki jo lahko izmerimo, pri četrtem pa smo ocenili resolucijo radarja.

Tretjo in četrto meritev smo opravili z uporabo odbojnega kotnika. S temi štirimi preizkusi lahko v celoti klasificiramo radar, kar nam omogoča ocenitev ustreznosti za uporabo pri danih okoliščinah.

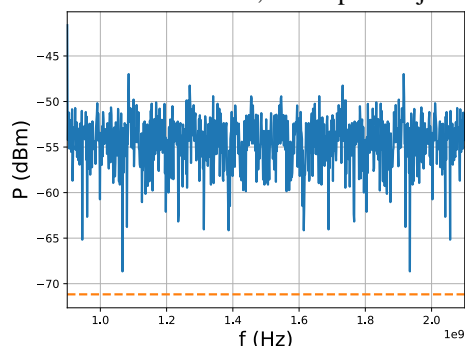
4 Evalvacija FMCW radarja

4.1 Oddajna moč

Za meritev oddane moči smo oddajni del radarja povezali s spektralnim analizatorjem Rigol DSA832. V dani spektralni širini radarja (900 MHz do 2100 MHz) je bila izmerjena maksimalna moč 21 dBm, povprečna moč pa 16 dBm. To je v okviru pričakovanih vrednosti, ki sta bili za maksimalno moč 22 dBm in povprečno 18 dBm.

4.2 Pragovni šum sprejemnika

Pragovni šum predstavlja najnižji možni nivo sprejetega signala, ki ga naš sprejemnik še lahko zazna. Za ta preizkus smo oddajno in sprejemno linijo zaključili proti masi. S tem smo izločili vpliv okolice, merimo pa le vpliv elektronike. Konfiguracijo meritve prikazuje Slika 1, kjer smo oddajni in sprejemni anteni zamenjali z zaključnim uporom vezanim proti masi. Uporabljeni so bili terminacijski upori z upornostjo 50Ω . Če je sprejeti signal nižji od pragovnega šuma, signala ne moremo ločiti od šuma. Pri naši meritvi je izmerjen povprečen pragovni šum znašal -55 dBm, kot to prikazuje



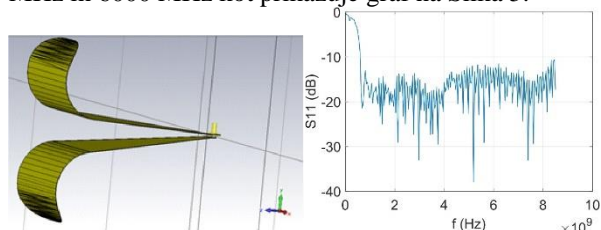
Slika 3: Rezultat merjenja pragovnega šuma sprejemnika. Povprečna vrednost pragovnega šuma znaša -55 dBm.

Slika 3, kar je v okviru pričakovanj. Pričakovali smo sicer pragovni šum -60 dBm, vendar je bila meritev zadovoljiva. Na slabši rezultat vpliva sama modularna zasnova, saj nam ne omogoča minimiziranja šuma zaradi dodanih žičnih povezav. Na slab rezultat vpliva tudi uporabljen LNA in ojačevalnik na sprejemni strani. Prav tako negativno vpliva tudi integriran analogno-digitalni pretvornik. Za izboljšanje te lastnosti bi lahko uporabili AD pretvornik izven ohišja mikrokmilnika, boljši ojačevalnik in nizko šumni ojačevalnik ter integrirano zasnovo.

4.3 Največja merljiva razdalja

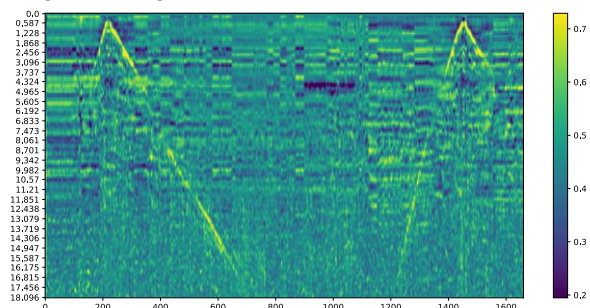
Parametri S opisujejo vhodno in izhodno razmerje med priključkoma. S11 ali odbojni koeficient nam pove, koliko moči je odbite od antene in koliko je pride do sprejemnika. Za to, da je antena primerna, mora biti parameter pod -10 dB na celotnem frekvenčnem območju, kjer jo uporabljamo. Največja možna razdalja, ki jo lahko izmerimo se razlikuje od teoretične

izračunane zaradi vrednosti S11 parametra antene, moči oddajnika in odsevnosti uporabljene tarče. Po (4) znaša teoretična $R_{max} = 109,3$ m. Za eksperimentalno določanje te razdalje smo uporabili na sprejemnem in oddajnem delu TEM antene, prikazane na Sliki 4. Njihov izmerjen S11 parameter je bil -12 dB v območju med 500 MHz in 6000 MHz kot prikazuje graf na Slika 5.



Slika 4: Načrtana TEM antena (levo) in S11 parameter izdelane antene (desno).

Za določanje dosega smo preizkus z odsevnim kotnikom. Imel je robove s stranicami dolgimi 1 m. Na radarju smo nastavili frekvence oddanega signala med 900 MHz in 2100 MHz, torej pasovno širino $B = 1200$ MHz, kar je največja možna pasovna širina na našem radarju, saj to omogoča najboljšo možno resolucijo. Frekvenca vzorčenja $F_s = 1,166666$ MHz. Dolžina impulza $\tau_s = 1,5$ ms, kar vpliva na največji možen teoretičen doseg. Antene smo na sprejemnik in oddajnik povezali s koaksialnim kablom dolžine 2 m, kar smo morali kompenzirati pri izračunu razdalje. Zaradi presluha med antenama nismo mogli izmeriti tarče na razdalji 0,5m. Tako smo prišli do ugotovitve, da je najnižja možna merljiva razdalja 0,75 m.



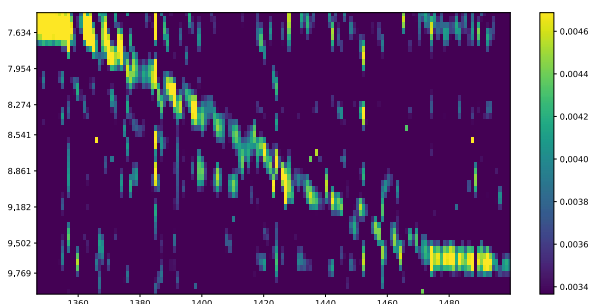
Slika 5: Meritev največje možne razdalje z reflektivnim kotnikov s stranico 1 m. Odbiti signal še zaznamo pri 18 m.

Za oceno največjega merjenega dosega smo merili razdaljo od anten s predlaganim FMCW radarjem tako, da smo kotnik počasi premikali od anten in na rezultatih ocenili, do kdaj se ga vidi. Naša ocena je bila, da je viden nekje do 18 m, tako, da je za ta radar ocenjena $R_{max} = 18$ m. Slika 5 prikazuje rezultat meritve. Na sliki je bil uporabljen za procesiranje algoritem za odstranjevanje ozadja, kar je izboljšalo prikaz rezultatov. Čeprav je bila največja izmerjena razdalja večja od pričakovane, bi jo lahko še vedno izboljšali s tem, da bi povečali izhodno moč ali pa izboljšali zasnovo anten.

4.4 Resolucija radarja

Za predlagan radar je bila izračunana resolucija $\Delta R = 0,125$ m. Teoretično resolucijo smo izračunali s pomočjo (5). Za našo evaluacijo radarja smo resolucijo določili eksperimentalno. Vsakič, ko merimo signal,

dobimo signal z neko frekvenco, ki nam predstavlja razdaljo od tarče. Zato, da dobimo frekvenco, moramo nad zajetim signalom izvesti FFT (hitro Fourierjevo transformacijo). Dolžina samega signala nam določa frekvenčno resolucijo FFT signala. Za preizkus smo izbrali 2 točki, ki sta narazen 2 m. Počasi smo premikali kotnik iz ene točke v drugo in nato ocenili skoke v razdalji na spektrogramu, ki ga prikazuje Slika 6. Ocenili smo, da je 16 premikov, kar na razdalji 2 m ustreza resoluciji $\Delta R = 0,125$ m. Izmerjena resolucija ustreza izračunani resoluciji .



Slika 6: Rezultat merjenja resolucije radarja. Na razdalji 2 m lahko zaznamo 16 skokov v merjeni oddaljenosti. Ocenimo lahko, da je resolucija $\Delta R = 0,125$ m.

5 Sklep

Predstavili smo evaluacijo predlaganega FMCW radarja ter primerjali teoretične in eksperimentalne rezultate za meritev šumnega praga, največje možne izmerjene razdalje, resolucijo, ter moč na izhodu radarja. To nam omogoča zapis specifikacij radarja, s čimer vemo za katere aplikacije je najbolj primeren. Ker smo izbrali modularno zgradbo, imamo možnost menjave posameznih delov v sestavu. Kvaliteto sprejemnika nam določa nivo šumnega praga. Nižji, kot je, šibkejša signala lahko zazna. Meritev je pokazala, da rezultat ustreza pričakovanjem, vendar še obstaja možnost izboljšave sprejemnika. Izboljšali bi ga lahko z izboljšanim sprejemnikom in z uporabo posebej za to namenjenega analogno digitalnega pretvornika. Eksperimentalno določen največji doseg radarja se zelo razlikuje od teoretičnega. Problem je v sami oddajni moči, ki jo je mogoče povečati z ojačevalniki ter v parametru S11, ki se nanaša na antene. Sama resolucija je bila skoraj enaka v teoretičnem izračunu in pri eksperimentalni določitvi. Možna bi bila izboljšava v primeru, da bi povečali frekvenčno pasovno širino. S klasifikacijo radarja smo ugotovili, da imamo previsok šumni prag, zato ne moremo zaznati šibkih signalov ter relativno nizek doseg. Prednost uporabe modularno sestavljenega radarja je predvsem to, da lahko po potrebi zamenjamo posamezne komponente, da ustrezajo namenu uporabe. Istočasno pa nam to predstavlja nekaj ovir pri opravljanju meritev. Te omejitve bi lahko odpravili v prihodnji verziji modularnega FMCW radarja ali z integracijo radarja v eno tiskano vezje. Od pričakovanih vrednosti se je zelo

razlikoval le največji merljiv doseg, druge vrednosti so bile v okviru pričakovanj, kot je vidno v Tabela 1.

Raziskave in razvoj so bile sofinancirane s strani programa ARIS št. P2-0065 in projekta NATO SPS št. G5953.

Tabela 1: Prikaz pričakovanih in izmerjenih/ocenjenih vrednosti za evaluacijo radarja

	Pričakovana vrednost	Izmerjena vrednost
Doseg	109,3 m	18 m
Pragovni šum	-55 dBm	- 60 dBm
Resolucija	0,125 m	0,125 m
Povprečna oddajna moč	18 dBm	16 dBm
Maksimalna oddajna moč	22 dBm	21 dBm

Literatura

- [1] F. Viadero-monasterio, L. Alonso-rentería, J. Pérez-oria, and F. Viadero-rueda, "Radar-Based Pedestrian and Vehicle Detection and Identification for Driving Assistance," *Vehicles*, vol. 6, no. 3, pp. 1185–1199, 2024.
- [2] H. Liu, J. Wan, P. Zhou, S. Ding, and W. Huang, "Augmented Millimeter Wave Radar and Vision Fusion Simulator for Roadside Perception," *Electronics*, vol. 13, no. 14, pp. 1–24, 2024.
- [3] A. Tinti, S. Tejero Alfageme, S. Duque Biarge, J. Balcells-Ventura, and N. Pohl, "Fully Polarimetric Automotive Radar: Proof of Concept," *IEEE Trans. Radar Syst.*, vol. 2, pp. 645–660, 2024, doi: 10.1109/TRS.2024.3423631.
- [4] T. Klewe, C. Strangfeld, and S. Kruschwitz, "Review of moisture measurements in civil engineering with ground penetrating radar – Applied methods and signal features," *Constr. Build. Mater.*, vol. 278, p. 122250, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122250>.
- [5] L. Xu, B. Wang, H. Li, and Z. Cheng, "Enhancing Physical Layer Security in Dual-Function Radar-Communication Systems With Hybrid Beamforming Architecture," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 13, no. 6, pp. 1566–1570, 2024, doi: 10.1109/LWC.2024.3382035.
- [6] Z. Xing, P. Chen, J. Wang, Y. Bai, and J. Song, "Millimeter-Wave Radar Detection and Localization of a Human in Indoor Complex Environments," *Remote Sens.*, vol. 16, no. 14, 2024.
- [7] A. Sorokin, A. Stepanov, K. Dubrovin, and A. Verkhoturov, "Enhancement of Comparative Assessment Approaches for Synthetic Aperture Radar (SAR) Vegetation Indices for Crop Monitoring and Identification—Khabarovsk Territory (Russia) Case Study," *Remote Sens.*, vol. 16, no. 14, 2024, doi: 10.3390/rs16142532.
- [8] L. Hornig, B. Szmola, W. Pätzold, J. P. Vox, and K. I. Wolf, "Evaluation of Lateral Radar Positioning for Vital Sign Monitoring: An Empirical Study," *Sensors*, vol. 24, no. 11, 2024, doi: 10.3390/s24113548.