

Rešitve za časovno sinhronizacijo bistatičnega radarja z umetno odprtino pri mobilnih platformah

Luka Podbregar, Aljaž Blatnik Boštjan Batagelj

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko

E-pošta: luka.podbregar@fe.uni-lj.si

Study of Time Synchronization Solution for the Bistatic Synthetic Aperture Radar for Mobile Platforms

Synthetic aperture radar (SAR) systems play an important role in the fields of remote sensing and target acquisition. In bistatic radar arrangements, where the transmitter and receiver are situated at separate locations, precise synchronization between these components is crucial to provide high-quality image reconstruction. In this study, an analysis of synchronization methods that utilise accurate timing mechanisms was made. These methods are used to guarantee consistent data collection and processing. Although we await experimental confirmation, this preliminary investigation establishes the foundation for the future advancement of synchronization solutions in BiSAR systems. We also proposed an innovative configuration for an unmanned aerial vehicle (UAV)-based BiSAR system and a solution for its time and phase synchronization.

1 Uvod

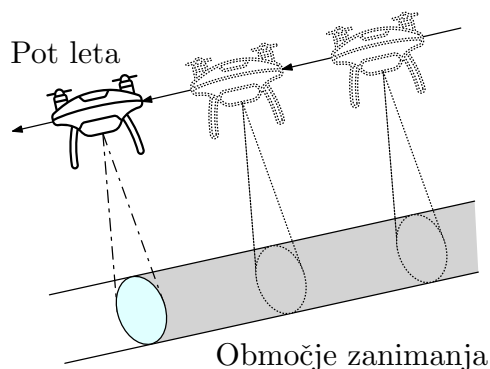
Radar z umetno odprtino (angl. synthetic aperture radar - SAR) omogoča opazovanje površja na številnih področjih uporabe, vključno z gozdarstvom, kmetijstvom, topografijo in kartiranjem zemeljskih virov. Uporaba radarjev na brezpilotnih letalnikih (angl. unmanned aerial vehicles - UAV) ponuja ekonomično in prilagodljivo rešitev za daljinsko zaznavanje iz zraka. Radarsko zaznavanje z UAV se pogosto uporablja za civilne kot vojaške namene.

Vendar imajo mobilne platforme pri uporabi SAR nekatere omejitve. Ena ključnih omejitev je neželeno odstopanje od načrtane poti leta, kar lahko povzroči zameglitev, geometrijska popačenja ali fazne napake v slikah SAR. V primeru bistatičnega sistema SAR (BiSAR) neizogibno frekvenčno odstopanje med lokalnimi oscilatorji (LO) povzroči dodatno fazno modulacijo v demoduliranem radarskem signalu. Ta dejavnik znatno poslabša natančnost slike SAR. Omenjene težave je mogoče rešiti s časovno in fazno sinhronizacijo prostorsko raznolikih platform. Cilj tega članka je predstaviti različne metode za doseganje natančne časovne in fazne sinhronizacije. Članek tudi predlaga novo postavitev za sistem BiSAR.

2 Problem sinhronizacije v sistemih BiSAR

2.1 Pregled SAR sistemov

SAR je postal pomembno orodje pri daljinskem zaznavanju, saj omogoča zajemanje podrobnih radarskih slik ne glede na trenutni čas dneva in vremenske razmere. Uporablja idejo relativnega gibanja med radarsko platformo, kot je UAV ali satelit, in ciljnim območjem. Kot pri običajnih radarskih sistemih oddajnik oddaja mikrovalovne impulze proti tlom, sprejemnik pa sprejema odbiti signal, ki nosi informacije o osvetljeni površini. Sistem lahko določi razdaljo in relativno hitrost različnih točk na tleh, tako da preuči časovni zamik in Dopplerjev premik odbitih signalov [1]. SAR premaguje omejitve standardnih radarskih sistemov, ki so omejeni z velikostjo svojih anten, s tem da uporablja premikanje platforme sprejemnika in oddajnika ter tako umetno povečuje dolžino antene. To doseže s koherentno obdelavo odbojev, sprejetih z različnih lokacij vzdolž radarske poti, kot prikazuje (slika 1).



Slika 1: Shema osnovnega delovanja sistema SAR.

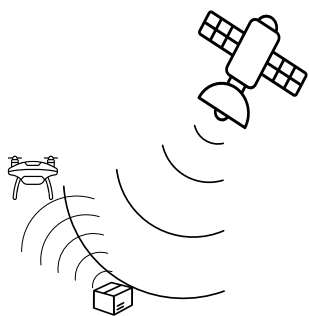
2.2 Bistatični radar

Bistatični radarski sistemi ponujajo alternativni pristop za daljinsko zaznavanje, ki se razlikuje od običajne monostatične postavitve. Slednja uporablja eno platformo za oddajnik in sprejemnik, medtem ko bistatična radarska postavitve uporablja ločeni platformi. Prostorska raznolikost bistatičnih radarskih sistemov, ki se uporabljajo za sisteme SAR, omogoča zbiranje zelo podrobnih informacij o različnih elementih, kot so topografija, podatki

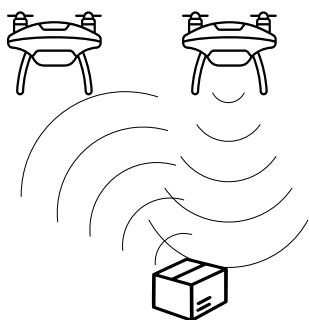
o vegetaciji in tleh. Poleg tega ti sistemi izboljšajo vidljivost objektov z nizko odmevno površino in pomagajo zmanjšati vpliv močnih odbojev, ki jih povzročajo stavbe in konstrukcije v urbanih okoljih, kar izboljša jasnost slike [2]. Sistem SAR je mogoče prilagoditi tako, da deluje v multistatičnem načinu, ki zahteva uporabo treh ali več različnih platform, kar omogoča še natančnejše daljinsko zaznavanje. Tako je mogoče zbirati razpršene signale iz širšega spektra zornih kotov.

Tipične postavitev, ki se uporabljajo v sistemih BiSAR, so naslednje:

- BiSAR z eno mirujočo platformo: Ta postavitev vključuje eno premično in eno nepremično platformo. To je praktična rešitev za primere, ko je premikanje oddajnika zaradi njegove velikosti ali drugih omejitev nepraktično. Sprejemnik, nameščen na UAV, lahko deluje v kombinaciji s satelitskim oddajnikom, kot prikazuje (slika 2). Ta postavitev omogoča tudi prikrito slikanje območij zanimanja, saj je oddajnik lahko nameščen na večji razdalji od preiskovanega območja, sprejemnik pa ostane skrit, ker ne oddaja nobenih signalov.
- BiSAR z obema platformama v gibanju: V tem scenariju sta tako oddajna kot sprejemna platforma mobilni. Ta zasnova zagotavlja večjo prilagodljivost v smislu pridobivanja podatkov, vendar tudi večjo zapletenost v smislu sinhronizacije in obdelave zbranih podatkov. Sprejemnik in oddajnik sta lahko na primer nameščena na različnih platformah UAV, kot prikazuje (slika 3)



Slika 2: Shema postavitev BiSAR z eno mirujočo platformo.



Slika 3: Shema postavitev BiSAR z obema platformama v gibanju.

Za nadaljnje izboljšanje zmogljivosti sistema BiSAR je mogoče uporabiti princip z več vhodi in izhodi (angl. multiple input, multiple output - MIMO). Tako lahko meritve odbojnosti opravimo iz različnih kotov [3], kar omogoča izdelavo enoprehodnih 3D posnetkov za holografske in tomografske SAR [4], [5]. V običajnih radarskih sistemih MIMO se fazna sinhronizacija doseže s fizično povezavo, kar omogoča zelo natančno časovno in fazno sinhronizacijo [6]. Ta pristop lahko doseže fazno sinhronizacijo z zelo visoko stopnjo natančnosti, približno 120 fs [7]. Vendar je lahko uporaba tega pristopa težavna, če so sestavni deli sistema namenjeni gibanju, kot v primeru predlaganega sistema BiSAR, ki uporablja UAV platforme. Zaradi tega večina metod sinhronizacije, omenjenih v razdelku 3, doseže časovno in fazno sinhronizacijo z različnimi brezžičnimi protokoli in postavitvami.

2.3 Izzivi in pomankljivosti BiSAR sistemov

Zapletenost sistemov BiSAR zahteva časovno sinhronizacijo in usklajevanje med različnimi platformami, kar povečuje stroške sistema ter otežuje njegovo vzpostavitve in vzdrževanje. Če je razdalja med platformami sistema velika, lahko pride tudi do degradacije in slabljenja signala, kar privede do zmanjšane razmerja med signalom in šumom ter slabše kakovosti slike. To velja zlasti za cilje, ki so oddaljeni ali pa imajo šibke odboje. Rekonstrukcija slik sistema BiSAR postane zahtevna tudi zaradi podatkov, zbranih z različnih platform. Prisotnost dveh ločenih platform zahteva tudi skrbno načrtovanje in usklajevanje, da se ohrani idealna pot leta. To prinaša nove omejitve delovanja in lahko zmanjša prilagodljivost sistema. Uporaba sistema v multistatičnem načinu to težavo še poslabša.

Kot omenjeno, BiSAR sistemi prinašajo pomembne ovire in omejitve, ki jih je treba skrbno upoštevati. Ena glavnih ovir je zahteva po sinhronizaciji vseh elementov znotraj sistema. Natančno zajemanje radarskih slik je močno odvisno od natančne časovne in fazne sinhronizacije med oddajnikom in sprejemnikom [2]. Zaradi tega so algoritmi, ki se uporabljajo za obdelavo signalov BiSAR, vedno bolj zapleteni. Ti morajo upoštevati različne poti širjenja in zapleteno razmerje med poslanim signalom, ciljnim območjem in položajem sprejemnika.

Bistatični radarski sistemi so občutljivi na kvadratne napake faze med časom integracije T_{int} [8]. Zahtevano stabilnost LO v bistatičnem radarskem sistemu lahko izračunamo kot

$$\Delta t = \frac{\Delta \phi}{360^\circ} \frac{1}{f * T_{int}}, \quad (1)$$

kjer f predstavlja frekvenco LO, $\Delta \phi$ pa fazno napako LO. Pri bistatičnih radarskih sistemih se zahteva fazna napaka 90° ali manj. Na primer, sistem BiSAR, ki deluje pri $f = 10$ GHz in s $T_{int} = 10$ s, potrebuje fazno stabilnost 2, 5 ps. Enačba (1) kaže, da je s povečevanjem frekvence sistema BiSAR za doseganje večje natančnosti potrebna višja stopnja sinhronizacije.

2.4 Pomembnost časovne in fazne sinhronizacije

Za natančno rekonstrukcijo radarskih slik v sistemu BiSAR, ki temelji na UAV platformah, je pomembno zagotoviti, da vse systemske platforme delujejo usklajeno. Podobno kot pri klasičnih radarskih sistemih tudi sistem BiSAR za generiranje radarskih signalov uporablja LO. Zaradi prostorske in časovne raznolikosti platform je lahko učinkovita vključitev neodvisnih LO v vsako platformo. Ta pristop lahko povzroči pojav različnih anomalij, ki lahko poslabšajo kakovost slik BiSAR, kot so fazni šum, frekvenčni zamik, časovni zamik in neuskklajenost frekvence radarskega signala [9]. Te težave se pojavljajo v vseh bistatičnih radarskih sistemih in tudi v drugih komunikacijskih sistemih, ki uporabljajo več virov signala. Alternativni pristop je uporaba samo enega LO za vse platforme skupaj in zagotovitev, da se med njimi ohranja fazna sinhronizacija z zanemarljivimi pogreški.

Kadar se v sistemu BiSAR uporablja več neodvisnih LO, lahko prisotnost nekompenziranega faznega šuma [10] močno vpliva na zbrane podatke. Učinki nekompenziranega faznega šuma vključujejo časovno spremenljiv geolokacijski odmik, razširitev impulznega odziva, povečanje bočnih pasov in nizkofrekvenčno fazno modulacijo v usmerjenem SAR signalu [2]. Z uporabo ustreznih metod za zmanjšanje faznih in časovnih napak je mogoče doseči zahtevano natančnost za izdelavo visokokakovostnih slik. Z razvojem tehnologije BiSAR bo napredek metod sinhronizacije bistvenega pomena za popolno uresničitev potenciala te tehnologije pri daljinskem zaznavanju.

3 Obstoječe sinhronizacijske metode

Zaradi vse večjega zanimanja za porazdeljene radarske sisteme so bile že predlagane številne rešitve za reševanje problematike časovne in fazne sinhronizacije v teh sistemih. Rešitve lahko razdelimo v dve glavni skupini: strojne in programske. Preprosta strojna metoda vključuje uporabo namenskih anten izključno za sinhronizacijo [11]. Ta tehnika deluje tako, da med radarskimi platformami, kot so sateliti, oddajajo signal, ki prenašajo informacije o fazi lokalnega oscilatorja (LO). Uporablja se lahko v neprekinjenem dvosmernem, impulznem dvosmernem ali impulznem izmeničnem načinu. S to metodo je mogoče doseči časovno natančnost okoli 60 ns [12]. Druga strojna metoda vključuje samomešalno vezje, ki uporablja dvotonsko obliko signala v kombinaciji s fazno-sklenjeno zanko [13]. Ta pristop zagotavlja natančne meritve razdalje med platformami in omogoča natančno kompenzacijo časa širjenja referenčnega signala. Sistem ima visoko spektralno učinkovitost, je odporen proti Dopplerjevemu premiku zaradi relativnega gibanja platform in dosega sinhronizacijsko natančnost okoli 30 ps [5], [14]. Druga študija [15] predstavlja tehniko brezžične multistatične sinhronizacije, ki uporablja kombinacijo neposrednega signala iz bočnih pasov antene in odbojev od opazovane površine za določitev časovne in fazne natančnosti LO. Postopek sinhronizacije vključuje dva koraka: najprej bistatično sinhronizacijo, nato pa multistatično sinhronizacijo. Ta pristop omogoča

fazno sinhronizacijo z milisekundno natančnostjo, vendar je odvisen od prisotnosti močnih razpršenih signalov odbojev, ki pa niso vedno prisotni. Skupna težava vseh omejenih strojnih rešitev je potreba po specializirani strojni opremi, ki jo je morda težko in drago implementirati na obstoječih sistemih.

Programske rešitve in metode za obdelavo signalov so uspešno dosegle časovno in fazno sinhronizacijo na mikrosekundni ravni [16], [17]. Predlaganih je bilo več pristopov za časovno in fazno sinhronizacijo z uporabo signala GPS [18], [19]. S temi pristopi je mogoče doseči sinhronizacijsko natančnost faze približno 100 ps. Pomembna pomanjkljivost pristopa, ki temelji na GPS, je, da ne deluje v razmerah, ko je dostop do GPS omejen. Druga študija je predlagala potencialno učinkovito tehniko za sinhronizacijo, ki temelji izključno na digitalni obdelavi [20], kar omogoča uporabo v obstoječih radarskih sistemih. Rešitev poleg tega upošteva Dopplerjev premik, ki ga povzroča relativno gibanje platform, in je v simulacijah pokazala spodbudne rezultate. Vendar njena učinkovitost v realnih scenarijih še ni bila ocenjena. Ker radarski sistemi nenehno napredujejo in delujejo na vedno višjih frekvencah, se povečuje zahteva po bolj natančnih tehnikah sinhronizacije, ki jih je mogoče zlahka doseči z vzpostavitvijo fizične povezave med platformami BiSAR.

4 Predlagane sinhronizacijske metode in prihodnji koraki

Za opazovanje površin z BiSAR je potrebnih več anten za merjenje odbojev (ali vsaj ena premikajoča se sprejemna antena na veliki razdalji od oddajne antene). Predlagamo uporabo vsaj dveh sinhroniziranih UAV platform, od katerih ima ena vlogo oddajnika, druga pa sprejemnika. Medtem ko je oddajnik v fiksnem položaju, se sprejemnik premika in zbira podatke. Nato se oddajnik premakne na drugo točko v prostoru, sprejemnik pa ponovno zbira podatke. Predlagamo, da se daljinsko zaznavanje izvaja v dveh ločenih fazah. V prvi fazi uporabimo mikrovalovno tomografijo v multimonostatičnem načinu, kjer sta oddajnik in sprejemnik na istem premikajočem se dronu. Sledi način BiSAR, kjer bosta oddajnik in sprejemnik uporabljena na ločenih platformah, kot je to v primeru konfiguracije z dvema premikajočima se platformama.

Da bi dosegli natančnejšo fazno in časovno sinhronizacijo v primerjavi z obstoječimi brezžičnimi tehnikami sinhronizacije, omenjenimi v razdelku 3, predlagamo uporabo enega samega LO in vzpostavitev fizične povezave med platformami UAV z uporabo optičnih vlaken. Z uporabo slednjih je mogoče doseči sinhronizacijo z natančnostjo približno 120 fs [7] na razdalji nekaj sto metrov. Enačba (1) kaže, da bi ta metoda sinhronizacije omogočila uporabo frekvence nosilca do 200 GHz pri 10 sekund integracijskega časa, kar omogoča izjemno natančne meritve. Optična vlakna nudijo številne prednosti, kot so nizke izgube, velika pasovna širina in pomenostavljena kompenzacija morebitnih faznih sprememb med prenosom. Prav tako omogočajo valovnodolžinsko multipleksiranje, ki bi ga lahko uporabili za prenos po-

datkov med obema platformama.

Pri predlagani tehniki sinhronizacije, ki uporablja povezavo z optičnimi vlakni, se lahko zaradi fizičnih omejitev sistema BiSAR na premikajočih se platformah UAV soočamo s težavami pri izvedbi. Potrebna je zelo natančna koordinacija med UAV platformami, da se ohrani razdalja med njimi in prepreči poškodbe optičnega vlakna. Poleg tega so potrebne optimalne vremenske razmere in teren brez ovir. V primerih, ko vzpostavitev fizične povezave ni mogoča, bi alternativni pristop vključeval uporabo kombinacije optičnega kanala v prostem prostoru (angl. free space optics - FSO) in optičnega vlakna, kot je predlagano v [21], kjer se doseže fazna sinhronizacija s približno 10 ps natančnostjo. V takem primeru bi se kanal FSO uporabil za vzpostavitev povezave med platformami, optično vlakno na platformah pa bi omogočilo izvajanje mehanizmov za kompenzacijo zakasnitve v povezavi. Povezave FSO so zelo odvisne od atmosferskih pogojev, kot sta turbulenca ali megla, motijo pa jih lahko tudi fizične ovire v vidnem polju. Za vzdrževanje stabilne povezave FSO so zato potrebni ustrezni vremenski pogoji, kot tudi natančno lasersko sledenje za vzpostavitev in vzdrževanje povezave med platformama.

5 Zaključek

Sistemi BiSAR imajo velik potencial za daljinsko zaznavanje in pridobivanje tarč, saj ponujajo edinstvene prednosti, kot sta večja pokritost območja in izboljšane zmogljivosti slikanja. Uspešna uporaba sistemov BiSAR pa je močno odvisna od premagovanja ključnih izzivov, zlasti zahteve po natančni časovni in fazni sinhronizaciji med platformama oddajnika in sprejemnika. V tem članku je opravljena raziskava sinhronizacijskih rešitev, prilagojenih za sisteme BiSAR, s posebnim poudarkom na konfiguracijah, ki temeljijo na UAV platformah. Preučili smo različne obstoječe tehnike sinhronizacije, ki jih lahko razdelimo na strojne in programske pristope. Čeprav nekatere metode dosegajo izjemno natančnost na ravni pikosekund, pa še vedno obstajajo omejitve, kot so odvisnost od GPS ali posebne konfiguracije strojne opreme.

Ker bodo prihodnji sistemi BiSAR delovali pri še višjih frekvencah, bo ključnega pomena doseganje še natančnejše fazne in časovne sinhronizacije. Cilj našega predlaganega nadaljnjega dela je preučiti izvedljivost konfiguracije BiSAR z UAV platformami, pri čemer ena platforma nosi oddajnik, druga pa deluje kot premični sprejemnik. Platformi UAV bosta sprva povezani z optičnimi vlakni, pozneje pa s kombinacijo FSO in optičnih vlaken, kar bo omogočilo natančno časovno in fazno sinhronizacijo sistema BiSAR pri zelo visokih frekvencah nosilca. Ta pristop predlaga uporabo mikrovvalovne tomografije v multimonostatičnem načinu, ki ji bo sledilo zbiranje podatkov z UAV v načinu BiSAR. Z reševanjem izzivov sinhronizacije in preučevanjem novih konfiguracij platform utiramo pot za sprostitev celotnega potenciala tehnologije BiSAR. S tem se bodo povečale zmogljivosti v aplikacijah daljinskega zaznavanja, kar bo omogočilo natančnejše opazovanje površja in boljše

opredelitev tarč.

6 Zahvala

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

Literatura

- [1] W. M. Brown and L. J. Porcello, "An introduction to synthetic-aperture radar," in *IEEE Spectrum*, vol. 6, no. 9, pp. 52-62, Sept. 1969.
- [2] G. Krieger and M. Younis, "Impact of oscillator noise in bistatic and multistatic SAR," in *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 3, no. 3, pp. 424-428, July 2006.
- [3] N. A. Goodman, Sih Chung Lin, D. Rajakrishna and J. M. Stiles, "Processing of multiple-receiver spaceborne arrays for wide-area SAR," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, no. 4, pp. 841-852, April 2002.
- [4] G. Krieger, I. Hajnsek, K. P. Papathanassiou, M. Younis and A. Moreira, "Interferometric Synthetic Aperture Radar (SAR) Missions Employing Formation Flying," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 98, no. 5, pp. 816-843, May 2010.
- [5] R. H. Kenney, J. G. Metcalf and J. W. McDaniel, "Wireless Distributed Frequency and Phase Synchronization for Mobile Platforms in Cooperative Digital Radar Networks," in *IEEE Transactions on Radar Systems*, vol. 2, pp. 268-287, 2024.
- [6] C. Ma et al., "Distributed Microwave Photonic MIMO Radar With Accurate Target Position Estimation," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 71, no. 4, pp. 1711-1719, April 2023.
- [7] J. Tratnik, U. Dragonja and B. Batagelj, "Multi-purpose constant-delay optical link," 2014 European Frequency and Time Forum (EFTF), Neuchatel, Switzerland, 2014.
- [8] M. Weib, "Synchronisation of bistatic radar systems," *IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Anchorage, AK, USA, 2004.
- [9] J. Park and R. G. Raj, "Impact of Synchronization Errors in Stretch Processing for Ultra-Wideband Bistatic Radar Imaging," *IGARSS 2023 - 2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Pasadena, CA, USA, 2023.
- [10] A. Lavrič, B. Batagelj, and M. Vidmar, "Calibration of an rf/microwave phase noise meter with a photonic delay line," *Photonics*, vol. 9, no. 8, 2022.
- [11] Y. Cai, R. Wang, W. Yu, D. Liang, K. Liu, H. Zhang, and Y. Chen, "An advanced approach to improve synchronization phase accuracy with compressive sensing for LT-1 bistatic spaceborne SAR," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 18, p. 4621, 2022.
- [12] Y. Zhang et al., "First Demonstration of Multipath Effects on Phase Synchronization Scheme for LT-1," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 58, no. 4, pp. 2590-2604, April 2020.
- [13] S. R. Mghabghab, S. M. Ellison and J. A. Nanzer, "Open-Loop Distributed Beamforming Using Wireless Phase and Frequency Synchronization," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 32, no. 3, pp. 234-237, March 2022.

- [14] J. M. Merlo, A. Schlegel and J. A. Nanzer, "High Accuracy Wireless Time-Frequency Transfer For Distributed Phased Array Beamforming," 2023 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS 2023, San Diego, CA, USA, 2023.
- [15] Y. Wang et al., "First Demonstration of Single-Pass Distributed SAR Tomographic Imaging With a P-Band UAV SAR Prototype," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 60, pp. 1-18, 2022.
- [16] M. L. Sichitiu and C. Veerarittiphan, "Simple, accurate time synchronization for wireless sensor networks," 2003 IEEE Wireless Communications and Networking, 2003. WCNC 2003., New Orleans, LA, USA, 2003.
- [17] J. Elson, L. Girod, and D. Estrin, "Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts," *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, no. 36, p. 147-163, 2002.
- [18] W. -Q. Wang, "GPS-Based Time & Phase Synchronization Processing for Distributed SAR," in *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 45, no. 3, pp. 1040-1051, July 2009.
- [19] S. Prager, M. S. Haynes and M. Moghaddam, "Wireless Subnanosecond RF Synchronization for Distributed Ultrawideband Software-Defined Radar Networks," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 68, no. 11, pp. 4787-4804, Nov. 2020.
- [20] R. H. Kenney, J. G. Metcalf and J. W. McDaniel, "Wireless Distributed Frequency and Phase Synchronization for Mobile Platforms in Cooperative Digital Radar Networks," in *IEEE Transactions on Radar Systems*, vol. 2, pp. 268-287, 2024.
- [21] M. Czermann, U. Dragonja, L. Podbregar, Á. Schranz, E. Udvary and B. Batagelj, "Experimental Investigation of a High-Accuracy Optical Delay Stabilization Method in Free Space," 2024 7th International Balkan Conference on Communications and Networking (BalkanCom), Ljubljana, Slovenia, 2024.