

Uporaba hibridne mikrovalovne fotonske tehnologije v FMCW radarjih

Jernej Mušič, Aljaž Blatnik, Boštjan Batagelj

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana
E-pošta: music.jernej@gmail.com

Usage of hybrid microwave photonics in FMCW RADARs

Abstract. In this article we will discuss the use of microwave photonics in use with radars. As part of the NATO project for peace and stability called CLARIFIER the first phase of the project refers to the development of a frequency modulated continuous wave (FMCW) Radar with the use of latest developments in microwave photonics. In the first section of the article, we will discuss the basic components of the FMCW radar and which electrical components are to be replaced with optical ones. The architecture of optoelectronic radar will be discussed in the next section and as part of the last section of the article we will review microwave technologies for Radars such as photonic LO (local oscillator) generation and review the principal architecture of an optoelectronic oscillator. In the conclusion of the article, we will discuss the improvements microwave photonics brings to the development of radars and how it will improve the system when incorporated in the CLARRIFIER project.

1 Uvod

V sklopu projekta CLARRIFIER (frequency-agile radar lidar chip for surveillance moving platforms), ki se izvaja v sklopu NATO for peace and security je cilj razviti integrirani sistem, ki vsebuje lidar in radar na skupnem fotoničnem integriranem vezju z namenom uporabe na brezpilotnih zračnih plovilih z omejeno nosilnostjo. Radar (ang. Radio Detection And Ranging) je primarna in najbolj razširjena metoda zaznavanja, klasifikacije in prepoznavanja objektov na večjih razdaljah v vseh vremenskih pogojih. Princip delovanja temelji na oddajanju radijske frekvence v prostor preko oddajno-sprejemnega modula, ki nato sprejema odboje in z algoritmično obdelavo pridobi podatke o razdalji, hitrosti, višini in smeri objekta, od katerega so se signali tudi odbili [1][5]. Radarji, ki so implementirani zgolj z uporabo elektronike izpostavljajo določene omejitve, in sicer omejena pasovna širina medtem ko je doseganje višje resolucije in hitrosti veliko finančno breme. Omejitve onemogočajo zaznavanje nizko-letečih, počasnih in majhnih objektov za civilno uporabo v kompleksnem elektromagnetnem okolju. Razvoj na področju mikrovalovne fotonske tehnologije in njenih značilnosti lahko pozitivno vplivajo na učinkovitost radarskih sistemov saj izničijo nekatere obstoječe omejitve elektronskih radarskih sistemov [2][3].

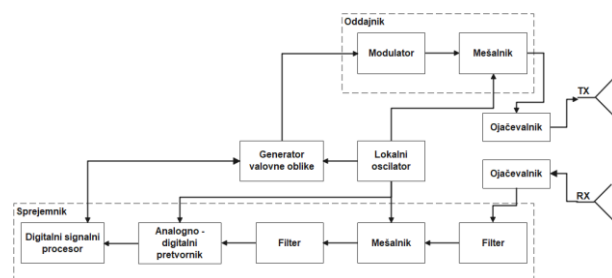
2 FMCW Radar

Radar s frekvenčno moduliranim neprekinjenim valovanjem (frequency modulated continuous wave - FMCW) med oddajanjem spreminja svojo delovno frekvenco s pomočjo frekvenčne modulacije. Sprejemnik nato sprejme odboj signala od tarčnega objekta in v primeru ne premikajočega objekta izračuna oddaljenost s pomočjo fazne razlike med oddanim in sprejetim signalom. Ker se frekvenca oddanega signala linearno povečuje se ob sprejemu odbojnega signala pridobi zakasnitev Δt kot je vidno na Slika 2. S primerjavo frekvence sprejetega signala z referenčnim se nato izvede meritev razdalje, in sicer po naslednji enačbi (1) [2].

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

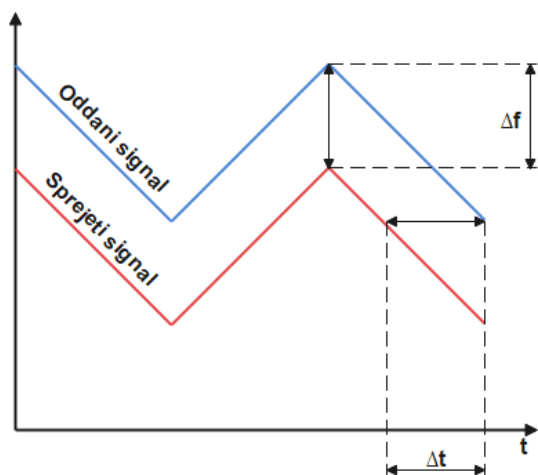
V primeru, da je sprememba frekvence med oddanim in sprejetim signalom linearna, je njen odvod konstanta in je razdalja določena z razliko med oddano in sprejeto frekvenco Δf po naslednji enačbi (2) [1][2].

$$R = \frac{c \cdot \Delta f}{2 \cdot \left(\frac{df}{dt}\right)} \quad (2)$$



Slika 1: Arhitektura radarskega sistema [1][2]

Kot prikazuje Slika 1 se v oddajnem sklopu sistema v modulatorju s pomočjo frekvenčne modulacije (FM) generira signal z variabilno frekvenco, ki se nato oddaja v prostor. Mešalnik radiofrekvenčni signal nato s pomočjo lokalnega oscilatorja pretvori v med-frekvenčno oz. IF signal. Ob sprejemu odbitega signala tega najprej vodi v ojačevalnik, nato s pomočjo filtra odstrani nezaželene komponente in v drugem mešalniku generira vsoto ali razliko referenčnega signala in med-frekvence ter sprejetega signala s časovnim zamikom. Z analogni digitalno pretvorbo se podatki prenesejo v digitalni signalni procesor, kjer se izvede obdelavo signalov za pridobitev informacij o merjenem objektu [2].



Slika 2: Razlika med sprejemnim in oddajnim signalom[1][3][4]

3 Lastnosti mikrovalovne fotske tehnologije

Uporaba mikrovalovne fotske tehnologije nam z uporabo optoelektronske in obratne pretvorbe omogoča generiranje signalov, njihov prenos in distribucijo ter procesiranje v optični domeni. V primeru izbire elektronsko optične pretvorbe signala se uporabljajo laserske diode ali laserji z neprekinjenim valovanjem in zunanjim modulatorjem, ki omogočajo pretvorbo na pasovni širini do nekaj deset GHz [2]. V primeru uporabe laserskih diod se izhodna optična moč povečuje linearno s krmilnim tokom, ki jo krmiljeno z uporabo mikrovalovnega signala ali signala med-frekvence (IF). Medtem ko se pri uporabi zunanje modulacije za krmiljenje faze, intenzitete in polarizacije laserja z neprekinjenim valovanjem uporablja elektro-optični modulator. Elektro-optični modulator ob spreminjajoči vhodni električni napetosti upravlja lomni količnik, koeficient prbitka in dvojne refrakcije materiala uporabljenega v modulatorju [2].

Za uporabo v laserskih sistemih, je najbolj primerna slednja oblika elektro-optične pretvorbe, saj nam zagotavlja veliko pasovno širino, visoke prbitke in dinamični razpon. Alternativna je sicer cenovno bolj primerna in energijsko učinkovita, vendar ne more zagotavljati omenjenih lastnosti, ki jo omogoča uporaba zunanjih modulatorjev [2].

Lastnosti mikrovalovne fotske tehnologije, ki so se izrazile skozi razvoj so naslednje, in sicer:

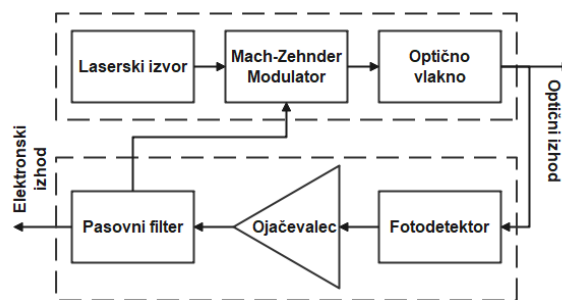
- Široka pasovna širina,
- Visoko zmogljiv prenos signala,
- Več-dimenzijska modulacija,
- Širokopasovno analogni procesiranje signalov,
- Dober fazni odziv,
- Visok nivo skladnosti pulzirajočih virov.

4 Mikrovalovne fotske tehnologije

V nadaljevanju si bomo ogledali nekatere specifične mikrovalovne fotske tehnologije, ki jih lahko implementiramo pri zamenjavi elektronskih komponent v radarskih sistemih, in sicer tistih, ki so potrebni za delovanje FMCW radarja. V tem poglavju se bomo osredotočili na različico fotskega lokalnega oscilatorja.

4.1 Optoelektronski lokalni oscilator

Lokalni oscilator je bistvena komponenta radarskega sistema, saj generira signal, ki ga uporabljamo kot referenco za generiranje valovne oblike, digitalno-analogne pretvorbe, sinhronizacijo, mešalnike itd. Zmogljivost radarskega sistema je odvisna od frekvenčne stabilnosti in čistosti signala lokalnega oscilatorja, kjer se primerja faza med sprejetim in oddanim signalom [2]. Optoelektronski oscilator prikazan na Slika 3 velja kot eden izmed tistih, katerega zmogljivost prinaša največ na področju lokalnih oscilatorjev za uporabo v radarskih sistemih.



Slika 3: Optoelektronski oscilator

Svetlobni vir z neprekinjenim valovanjem se prenese v Mach-Zehnderjev modulator, ki se nato po optičnem vlaknu prenese v fotodetektor, ki pretvori optični signal v električnega. Po pretvorbi signal ojača elektronski ojačevalnik, ki spusti signal skozi pasovno sito ter kanalizira nazaj v radio frekvenčni vhod Mach-Zehnderjevega modulatorja, s čimer se sklene zanka oscilatorja. Fazni šum optoelektronskega oscilatorja je odvisen od spodnjega nivoja šuma samega sistema in dolžine optičnega vlakna, ki je v uporabi. Ta se zmanjšuje z uporabo daljše dolžine optičnega vlakna, kar posledično zmanjšuje spektralni razpon [2]. Ena od rešitev je uporaba dveh zaporednih faznih modulatorjev, ki na izhodu razširita optični spekter ter ohranjata optično moč v vlaknu konstantno. Posledica je zmanjšanje šuma, ki ga povzročajo nelinearni učinki v vlaknu [2].

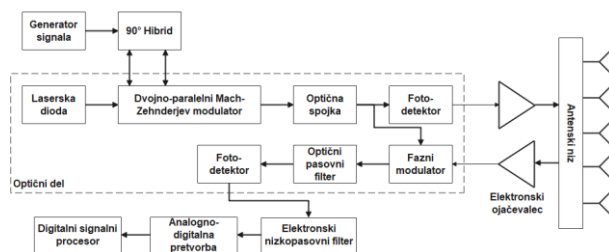
5 Princip delovanja optoelektronskega radarja

Pogoj za učinkovito razpoznavanje in klasifikacijo tarč je visoka resolucija in možnost obdelave ter prikaza podatkov v realnem času kar pa nam omejuje omejena pasovna širina elektronskih naprav. Prav tako je generiranje signala linearne frekvenčne modulacije z uporabo neposrednih digitalnih sintetizatorjev (DDS) omejeno na le nekaj GHz in tako onemogoča visoke resolucije radarske slike [3]. Z uporabo ulomkovnega PLL z samodejno proizvodnjo žagastega signala pa omejitev za frekvence praktično ni, saj lahko moduliramo območje več GHz. Manj učinkovita rešitev je večanje nosilne frekvence z namenom pridobitve večje pasovne širine, kar pa zaradi potrebnega procesiranja signala poveča njegovo kompleksnost izgradnje ter posledično ceno in poslabša kakovost signala in radarske slike [3]. Z uporabo mikrovalovne fotonske tehnologije za generiranje in procesiranje visoko frekvenčnih radijskih signalov lahko zmanjšamo omejitve celovitih elektronskih radarskih sistemov.

V [3] so predlagali izvedbo radarskega sistema, ki temelji na mikrovalovni fotonski tehnologiji kot je prikazan na **Napaka! Vira sklicevanja ni bilo mogoče najti.** V elektro-optičnem modulatorju oddajnega sklopa radarskega sistema se s pomočjo frekvenčnega početverjenja nizko frekvenčnega električnega signala generira širokopasovni linearni FMCW signal. Na sprejemniku se sprejeti odbiti signal pretvori v nizko frekvenčni signal na podlagi fazne modulacije referenčnega optičnega signala. Ta omogoča procesiranje visoko frekvenčnih signalov z veliko pasovno širino brez frekvenčne pretvorbe [3]. Delovanje predlaganega radarja se začne pri laserski diodi, ki proizvaja neprekinjen vir svetlobe, ki jo modulirano s pomočjo dvojno-paralelnega Mach-Zehnderjevega modulatorja (DPMZM). Ta je krmiljen s pomočjo LFM CW signala vmesnega frekvenčnega pasu, ki ga generira nizko frekvenčni električni generator signala. Trenutna frekvenca prej omenjenega signala je izražena kot (3), kjer je f_0 opredeljen kot primarna frekvenca in k kot razmerje kolebanja [2][3].

$$f_{IF}(t) = f_0 + kt \quad (3)$$

IF-LFM CW signal je nato preusmerjen v 90° hibridni spojnik oz. razdelilnik, ki na izhodu generira dva signala, in sicer prvotnega ter novega z 90° -stopinjskim faznim zamikom. Ta sta nato usmerjena v prva dva Mach-Zehnderjeva modulatorja v DPMZM, ki sta oba vezana na vodilni Mach-Zehnderjev modulator. Z ustrezno referenčno napetostjo ali tokom s katerim krmilimo modulatorja ob najvišji točki oddajanja nato generiramo serijo optičnih bočnih pasov sodega reda. Ti so sestavljeni iz optičnega nosilca in bočnimi pasovi drugega razreda, saj imajo tisti višjega razreda prenizko amplitudo in zato niso dominantni.



Slika 4: Arhitektura optoelektronskega radar[2][3][4]

Z namenom izničenja optičnega nosilca, uporabimo ustrezno referenčno napetost ali tok za krmiljenje glavnega modulatorja v najnižji točki oddajanja s čimer na izhodu DPMZM dobimo signal, ki vsebuje le optične bočne pasove drugega reda. Pridobljen signal se nato enakovredno razcepi na dva dela, in sicer je eden uporabljen kot referenčni signal za obdelavo odbitega signala, medtem ko je drugi posredovan v fotodetektor za namene izvajanja pretvorbe iz optičnega v električno obliko. Po pretvorbi se pridobi frekvenčno početverjen LFM CW signal katerega trenutno frekvenco lahko izrazimo kot (4). S tem ima nov signal v primerjavi s prvotnim štirikrat večjo centralno frekvenco in pasovno širino [3].

$$f_{LFMCW}(t) = 4f_0 + 4kt \quad (4)$$

Generirani LFM CW signal je nato ojačan s pomočjo električnega ojačevalnika in oddajen v prostor z namenom zaznavanja objektov. Ob dosegu objekta v prostoru se signal odbije, katerega sprejmemo na sprejemnem sklopu radarskega sistema in ustrezno ojačamo z uporabo drugega električnega ojačevalnika. Ojačan signal nato prenesemo v elektrooptični fazni modulator, ki modulira referenčni optični signal pridobljen s strani DPMZM. Referenčni optični signal lahko predstavimo kot dva optična nosilna signala izražena kot (5), ki sta nato fazno modulirana z odbitim oz. sprejetim signalom LFM CW.

$$f_c - 2f_0 - 2kt \text{ in } f_c + 2f_0 + 2kt \quad (5)$$

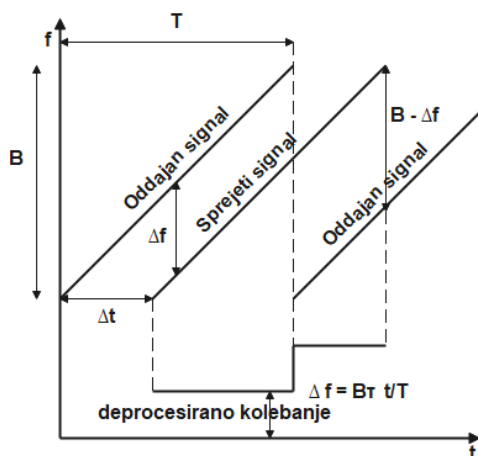
Frekvenca bočnega pasu prvega reda, ki je generiran kot rezultat fazne modulacije nosilca izražena v levi enačbi (5) je izražena kot (6), kjer $4k\Delta\tau$ predstavlja časovni zamik odbitega signala v primerjavi z oddanim. Tega nato izluščimo z uporabo optičnega pasovnega filtra [3].

$$f_c + 2f_0 + 2kt + 4k\Delta\tau \quad (6)$$

Signal nato posredujemo v fotodetektor z namenom izvedbe optoelektronske pretvorbe ter implementacijo de-procesiranja signala kot je prikazano na **Napaka! Vira sklicevanja ni bilo mogoče najti.** Željeni signal ima nizko frekvenco izraženo kot (7), medtem ko B predstavlja pasovno širino in T periodo signala LFM CW [3].

$$\Delta f = 4k\Delta\tau \quad (7)$$

Zaradi prekrivanja oddajnega signala v drugi periodi in sprejetega signala se generira visoko-frekvenčna komponenta označena kot (8), ki jo odstranimo s pomočjo elektronskega nizkoprepustnega filtra [3].



Slika 5: Princip de-procesiranja kolebanja signala

$$B - \Delta f \quad (8)$$

Zaradi odvisnosti frekvence de-procesiranega signala od razmerja kolebanja in časovnega zamika odbitega LFMCW signala lahko razdaljo do merjenega objekta izračunamo po naslednji enačbi (9) [3].

$$L = \frac{c}{2} \Delta\tau = \frac{c}{2} \cdot \frac{\Delta f}{4k} = \frac{cT}{2B} \Delta f \quad (9)$$

6 Zaključek

Uporaba mikrovalovne fotonske tehnologije zagotavlja določeno mero optimizacije radarskih sistemov, in sicer omogoča njihovo rabo na avtonomnih sistemih z omejeno nosilnostjo, velikostjo in časovno avtonomijo. Z njenim razvojem se je razširila uporaba radarskih sistemov v komercialni sferi kakor tudi v nacionalno-varnostnih strukturah. V avtomobilski industriji uporaba radarskih sistemov, ki delujejo v souporabi z drugimi senzorji, ki služi kot pomoč uporabniku vozila in s tem poveča varnost v prometu. Souporaba z drugimi senzorji in implementacija mikrovalovne fotonske tehnologije odpira možnosti zmanjšanja velikosti, teže in energijske porabe za takšne sisteme (SWaP – Size, Weight and Power) ter razširitev na področja, kjer je to prej bilo nemogoče ali preveč neučinkovito za uporabo. V članku smo si ogledali arhitekturo optoelektronskega oscilatorja, ki z uporabo optičnih vlaken, optičnim modulatorjem in stabilnim laserskim izvorom generira stabilen signal lokalnega oscilatorja, kar poveča učinkovitost delovanja radarskega sistema. V nadaljnjem delu na projektu CLARIFIER bo osredotočenost temeljila na

implementaciji hibridnega FMCW radarskega sistema, ki bo zmožen souporabe z ostalimi senzorji, in sicer z LIDAR ter bo temeljil na skupnem fotoničnem jedru.

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] P. Shilong, Y. Jianping: Photonics-Based Broadband Microwave Measurement, Journal of lightwave technology, vol. 35, no. 16, 15. Avgust 2017
- [2] P. Shilong, Y. Zhang: Microwave Photonic Radars, Journal of lightwave technology, vol. 38, no. 19, 1. Oktober 2020
- [3] Z. Fangzheng, G. Qingshui, W. Ziqian, Z. Pei, Z. Guoqiang, S. Jun, P. Shilong: Photonics-based broadband radar for high-resolution and real-time inverse synthetic aperture imaging, Optics express, vol. 25, No. 14, 10. Julij 2017
- [4] J. M. Ramirez, H. Elfaiki, T. Verolet, C. Besancon, A. Gallet, D. Néel, K. Hassan, S. Olivier, C. Jany, S. Malhouitre, K. Gradkowski, P. E. Morrissey, P. O'Brien, C. Caillaud, N. Vaissière, J. Decobert, S. Lei, R. Enright, A. Shen, M. Achouche: III-V-on-Silicon Integration: From Hybrid Devices to Heterogeneous Photonic Integrated Circuits, IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, vol. 26, no. 2, Marec/April 2020
- [5] C. Wolff, Frequency-Modulated Continuous-Wave Radar (FMCW Radar), dostopno na: <https://www.radartutorial.eu/02.basics/Frequency%20Modulated%20Continuous%20Wave%20Radar.en.html#bsbfm>, dostopano dne: 12. 7. 2021