

Generiranje RF signala za FMCW radar z uporabo dveh optičnih virov

Jernej Mušič, Boštjan Batagelj, Janez Krč

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

RF generation for FMCW radar using two optical sources

Abstract. In this article we will discuss generating RF signals by using and mixing two optical sources at a GHz band 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 principal components of the FMCW radar and which electrical components are to be replaced with optical ones. Some principles of photonic technologies will be discussed with possible short comings and improvements which can be provided to FMCW radars. We will continue by introducing a simple method of generating a RF signal using two laser sources and discuss our results and possible improvements on the matter which can lead to using the same principles for generating a chirped RF signal for FMCW radar. 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 oziroma radio detection and ranging je primarna in najbolj razširjena metoda zaznavanja, slikovne pretvorbe, klasifikacije in prepoznavanja objektov na večjih razdaljah v vseh vremenskih pogojih. Princip delovanja temelji na oddajanju radijske frekvence v prostor s pomočjo oddajnika, ki nato s pomočjo sprejemnika sprejema odboje in nato s pomočjo algoritmov pridobi podatke o razdalji, hitrosti, višini in smeri objekta, od katerega so se signali tudi odbili.[1][5] Elektronsko implementirani radarji izpostavljajo določene omejitve, in sicer omejena pasovna širina, omejeno število funkcionalnosti, nizka resolucija in hitrost. Omenjene omejitve onemogočajo zaznavanje nizko-letečih, nizko hitrostnih 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] V nadaljevanju si bomo zato ogledali osnovni princip delovanja FMCW radarja ter način generiranja RF signalov z uporabo dveh optičnih virov. Enega od omenjenih principov smo tudi preizkusili v laboratorijskem okolju in s tem ugotovili tudi določene omejitve pri uporabi na FMCW radarju. Ogledali smo si tudi možen predlog z uporabo DFB laserjev, ki jih lahko krmilimo s spreminjanjem delovne temperature in delovnega toka in s tem dosežemo natančnejše spreminjanje delovne frekvence.

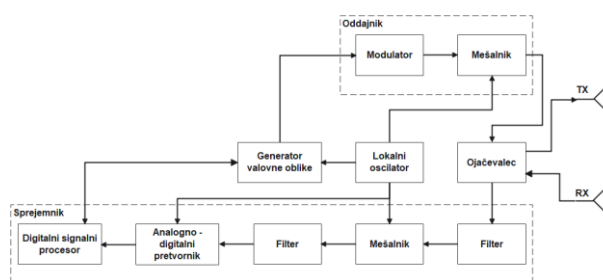
2 Princip delovanja FMCW radarja

FMCW radar med oddajanjem spreminja svojo delovno frekvenco z uporabo frekvenčne modulacije, ki krmili spremembo delovne frekvence. Sprejemni del sistema nato zazna odboj signala od tarčnega objekta in v primeru, da se tarčni objekt ne giblje oziroma je stacionaren, lahko izračuna oddaljenost s pomočjo časovne 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]

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

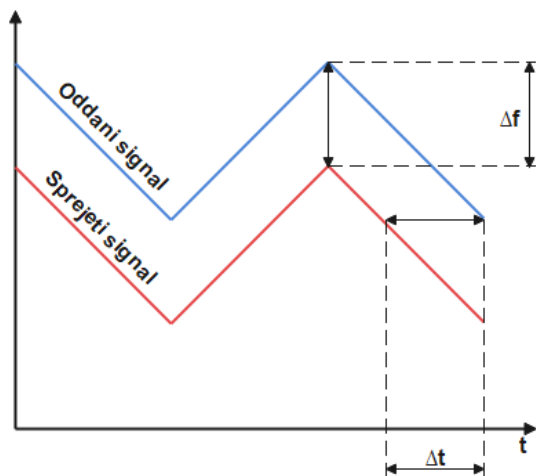
V primeru, da je sprememba frekvence med oddanim in sprejetim signalom linearna, je njen odvod konstanta in je razdalja določena z razliko med oddano in sprejeto frekvenco Δf po naslednji enačbi (2).[1][2]

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



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

Kot je prikazano v 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. Omenjeni signal je nato usmerjen v prvi mešalnik, ki skupaj z vmesno frekvenco, ki jo pridobi s strani lokalnega oscilatorja generira vsoto ali razliko omenjenih signalov. Ob sprejemu odbitega signala, ga s pomočjo ojačevalnika ojača, nato s pomočjo filtra odstrani nezaželene komponente in v drugem mešalniku generira vsoto ali razliko referenčnega signala iz prvega mešalnika in vmesne frekvence ter sprejetega signala s časovnim zamikom. Z analogno digitalno pretvorbo se podatki prenesejo v digitalni signalni procesor, kjer se izvede obdelava 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 uporabe 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 je kontrolirano z uporabo mikrovalovnega signala ali signala vmesne frekvence (IF). Medtem ko je pri uporabi zunanje modulacije za krmiljenje faze, intenzitete in polarizacije laserja z neprekinjenim valovanjem. Modulacijo izvaja elektro-optični modulator kateremu s spreminjanjem vhodne električne napetosti upravljamo lomni količnik,

koeficient pribitka 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 pribitke 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 Generiranje RF signala z uporabo svetlobnih virov

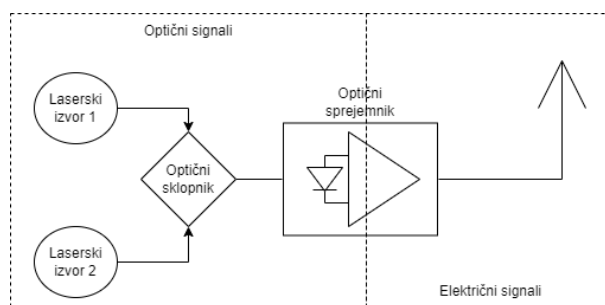
Za generiranje RF signala lahko uporabimo optoelektronski pretvornik, ki ga imamo opisanega na Sliki 3, deluje pa na principu mešanja dveh optičnih signalov, ki nihatata na različnih valovnih dolžinah. Oba signala lahko opišemo v elektromagnetni obliki, kot je prikazano v enačbi (3) in (4), kjer prvi del enačbe predstavlja polarizacijo in amplitudo signala, drugi del izražen v eksponenti obliki pa njegovo fazo in optično frekvenco.[6]

$$\vec{E}_1(t) = E_{01}(\vec{l}_x \cos \varphi_1 + \vec{l}_y \sin \varphi_1) * e^{j(2\pi\nu_1 t + \varphi_1)} \quad (3)$$

$$\vec{E}_2(t) = E_{02}(\vec{l}_x \cos \varphi_2 + \vec{l}_y \sin \varphi_2) * e^{j(2\pi\nu_2 t + \varphi_2)} \quad (4)$$

Omenjena optična signala z uporabo optičnega sklopnika dovedemo na enorodovno optično vlakno. Pred prehodom optičnega signala na optično vlakno pride v optičnem sklopniku do mešanja obeh signalov, kjer se oba optična signala tudi seštejeta, kot je razvidno v enačbi (5).[6]

$$\vec{E}_1(t) + \vec{E}_2(t) \quad (5)$$



Slika 3: Načrt mešanja dveh optičnih signalov za generiranje RF signala

Enorodovno optično vlakno je nato vpeljano v optični sprejemnik ali fotodiodo, s katero pretvorimo optični signal v električnega oziroma dobimo RF signal. Frekvenca RF signala fotodiode je enaka razliki frekvenc optičnih signalov, ki smo jih uporabili, kot je razvidno v enačbi (6). [6]

$$f = \nu_1 + \nu_2 \quad (6)$$

Na podlagi enačbe 6 je razvidno, da lahko z uporabo optičnih frekvenc okoli 100 THz generiramo RF signale tudi nekaj deset GHz. Za praktični prikaz zgoraj opisanega smo v laboratoriju izvedli preizkus generiranja RF signala z uporabo dveh laserskih virov, jih sklopili in preverili izhodni RF signal.

4.1 Preizkus v laboratoriju

Za izvedbo preizkusa v laboratoriju smo uporabili naslednje komponente, in sicer:

- Laserski vir HP 8168F
- Polprevodniški laser Alcatel A1905 LMI
- Optični sklopnik
- Optični spektralni analizator V4000
- Električni spektralni analizator Agilent 8565 EC
- Optični sprejemnik

Omenjene komponente smo povezali skladno z načrtom, razvidnim na sliki 4. Signala iz optičnih virov HP 8168F in Alcatel A1905 LMI z uporabo optičnega sklopnika dovedemo na enorodovno optično vlakno, kjer se oba signala seštejeta in ju vodimo v optični sprejemnik oziroma fotodiodo in istočasno tudi v optični spektralni analizator z namenom spremljanja dogajanja v optičnem vlaknu. Izhod fotodiode, ki je prav tako opremljen s predojačevalnikom in ima prilagojeno impedanco, povežemo še na RF spektralni analizator

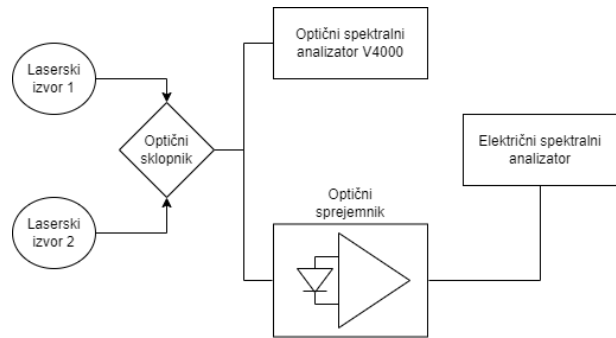
Začetne nastavitve, ki smo jih določili za naša laserska vira, so razvidne v tabeli 1, in sicer smo se odločili, da razmaknemo optična vira za 0,1 nm, kar je razvidno tudi v izrisu optičnega spektralnega analizatorja na sliki 5. Na podlagi enačbe (6) iz poglavja 4 smo na izhodu optičnega sprejemnika zaznali RF signal frekvence 12,57 GHz, ki je razlika med optično frekvenco prvega in drugega laserskega vira. Moč izhodnega RF signala na optičnem sprejemniku je bila zaznana pri -9 dBm.

Tabela 1: Primarne nastavitve na obeh optičnih virih za preizkus v laboratoriju

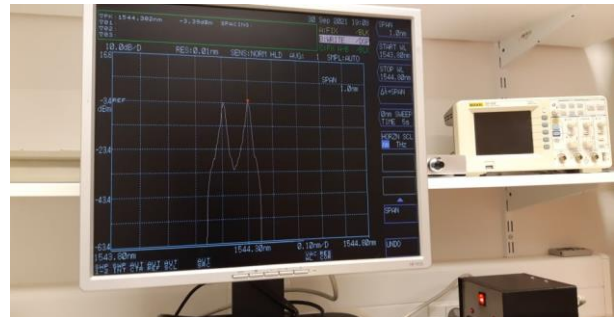
	Alcatel A1905 LMI	HP 8168F
Valovna dolžina	1544,30 nm	1544,20 nm
Frekvenca	194,13 THz	194,14 THz
Moč izhodnega signala	-3,2 dBm	-3,2 dBm

V nadaljevanju smo spreminjali vrednost valovne dolžine enega od laserskih virov za 0,01 nm zaradi česar

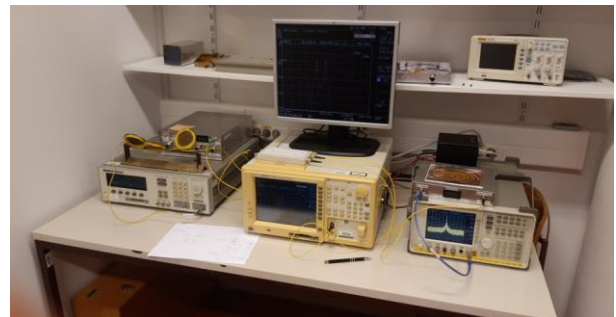
smo spreminjali izhodno RF frekvenco za približno 1,26 GHz. V RF signalu, ki ga generiramo je prisoten tudi fazni šum, ki poveča šum v neposredni okolici nosilca in razširi sam spekter. Omenjeno bi lahko odpravili z uporabo sinhroniziranih optičnih virov.



Slika 4: Načrt vezave za preizkus v laboratoriju



Slika 5: Izpis iz optičnega spektralnega analizatorja



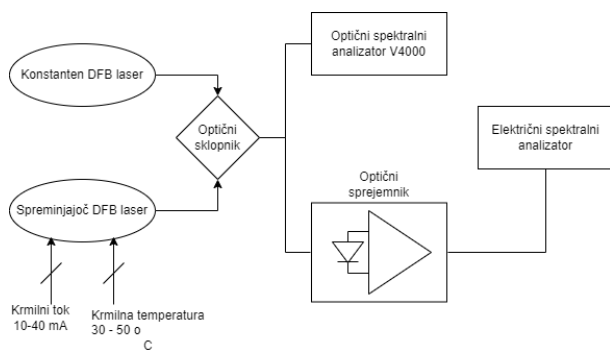
Slika 6: Praktična izpeljava preizkusa v laboratoriju

Za delovanje FMCW radarje je potrebno krmiliti spremembo delovne frekvence z uporabo frekvenčne modulacije. V [7] predlagajo shemo za generiranje spreminjajoči RF signal na GHz področju z uporabo fotonične tehnologije, ki si jo bomo ogledali v naslednjem poglavju.

5 Modulacija optičnih virov za uporabo v FMCW radarjih

Predlagana je uporaba dveh DFB laserjev, in sicer laserja na statični oziroma fiksni valovni dolžini 1552,52 nm z napado do 0,05 nm in drugim spreminjajočim DFB

laserjem, ki deluje na valovnih dolžinah med 1551,5 in 1553,5 nm z delovno temperaturo med 30 in 50 stopinj Celzija ter krmilnim tokom med 10 in 50 mA. [7] Ostale komponente ostanejo enake kot v prejšnjem preizkusu, kot je razvidno na sliki 7. Krmiljenje mikrovalovnega signala naj bi potekalo s pomočjo spreminjanja delovne temperature in krmilnega toka drugega krmiljenega laserskega izvora in s tem ugotovitve, kako natančno ga je možno krmiliti. Rezultati omenjenega preizkusa so pokazali, da je s spremembo temperature laserskega vira za eno stopinjo Celzija možno spremeniti valovno dolžino vira za 0,094 nm. Zaznana je bila tudi linearna odvisnost med delovno temperaturo in valovno dolžino laserskega vira. Vendar pa je bila zaznan tudi padec moči izhodnega optičnega signala na laserskem viru, in sicer se je s povečanjem delovne temperature tudi zmanjšala izhodna moč tudi do 0,033 mW/ °C. [7]



Slika 7: Predlog krmiljenja spremembe delovne frekvence z uporabo fotončnih tehnologij [7]

V nadaljevanju je bila preizkušena možnost krmiljenja delovne frekvence s spremembo krmilnega toka na spreminjajočem DFB laserju pri konstantni temperaturi 40,5 °C. Zaznana je bila sprememba moči izhodnega optičnega signala za 1.1 mW/mA ter da je je možno krmiliti valovno dolžino laserskega vira z razmerjem 0.00056 nm/mA. [7] Če se osredotočimo na RF signal je bilo ugotovljeno, da je s pomočjo spreminjanja delovne temperature možno krmiliti izhodni RF signal s faktorjem 10,35 GHz/°C, vendar pa s tem izgublamo tudi na sami izhodni moči laserskega izvora, zaradi česar imamo nestabilni optični vir. S krmiljenjem delovnega toka na DFB laserju je faktor krmiljenja RF signala 0,375 GHz/mA, [7] kar narekuje, da je slednja metoda tudi bolj primerna za krmiljenje RF signala, še posebej pri uporabi na FMCW radarju.

6 Zaključek

Uporaba mikrovalovne fotonške 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 državno-varnostnih strukturah. V članku smo si ogledali

sam princip delovanja FMCW radarja in možnosti, s katerimi bi lahko nadomestili del laserja za generiranje in krmiljenje njegove delovne frekvence. Predstavili smo enostaven način, kako generirati RF signal z uporabo dveh laserskih virov s tem, da smo enemu spreminjali njegovo valovno dolžino. V nadaljevanju smo si ogledali možnost uporabe DFB laserjev za generiranje RF signalov ter ugotovili, da krmiljenje delovnega toka DFB laserja predstavlja natančnejšo obliko spreminjanja delovne frekvence v primerjavi z reguliranjem njegove delovne temperature, kar bi bilo smiselno uporabiti pri FMCW radarju na projektu CLARIFIER. V nadaljnjem delu na projektu CLARIFIER bo osredotočenost na implementaciji hibridnega FMCW radarskega sistema z uporabo opisanih tehnik v omenjenem članku in sicer z generiranjem RF signala z uporabo dveh optičnih virov in temperaturne regulacije enega od laserskih virov.

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. August 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. Verole, 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
- [6] R. Pajntar, Fotonika in mikrovalovi, 4. tečaj, optične komunikacije in radijske komunikacije, Ljubljana 3. - 7. februar 1997.
- [7] N. Yulianto, N. Yudasari, M. D. Birowosuto: Tunability technique of microwave frequency generator using temperature controller and injection current effect of DFB laser, *AIP Conference Proceedings*, (2016); dostopno na: <https://doi.org/10.1063/1.4941622>, 12 Februar 2016