

Uporaba mikrovalovne fotonike na umetnih satelitih

Marko Križanić, Kristjan Vuk Baliž, Boštjan Batagelj

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

Povzetek. Namen tega preglednega članka je prikaz možnosti uporabe pristopa mikrovalovne fotonike na umetnih satelitih. Članek izpostavi prednosti uvajanja mikrovalovne fotonike v vesoljsko tehnologijo in vsebuje pregled zgodovinskih mejnikov, vključno z začetnim projektom satelitskega daljinskega zaznavanja. Opisuje aktualne projekte uvajanja mikrovalovne fotonike na krov komunikacijskih satelitov. Predstavljeni so tudi osnovni poskusi za generiranje in obdelavo mikrovalovnih signalov ter usmerjanje antenskega snopa s pomočjo optične tehnologije.

Ključne besede: mikrovalovna fotonika, komunikacijski sateliti, optične komunikacije, prenos optičnih signalov, oblikovanje antenskega snopa

Application of microwave photonics to artificial satellites

The paper analyses the possibility of applying microwave photonics (MWP) to artificial satellites. It highlights the advantages of using MWP in the space technology and provides a historical review of using MWP, for instance in satellite remote sensing, and in current projects in which MWP is used in communication satellites. Basic experiments of microwave signal generation and processing, and antenna beam steering using the optical technology are presented.

The current MWP systems are based on optical fibers and discrete components, which limit the energy efficiency, flexibility, scalability and, consequently, the deployment of the systems. Integrated microwave photonics (IMWP) copes with these limitations by integrating the MWP systems into photonic integrated circuits (PIC). However, IMWP is still in its infancy and shows that much more knowledge, technical and scientific planning and interaction will be required in the coming years to provide a technology to be used in the space industry.

Following the successful introduction of MWP and IMWP in the satellite technology, we look forward to the beginning of their mass deployment in areas not directly related to the space industry, such as:

1. telecommunications, to increase the network capacity and reduce delays in data transmission;
2. automotive, to manufacture sensors in autonomous vehicles, such as lidar and radar;
3. smart sites, to connect individual sensors and implement distributed sensors.

Keywords: microwave photonics, communication satellites, optical communications, transmission of optical signals, beam-forming

1 UVOD

Zaradi svojega položaja v svetovnem gospodarstvu umetni sateliti predstavljajo najbolj razvit sektor vesoljske industrije [1]. Samo v letu 2020 je število satelitov naraslo za dodatnih 1.540 [2], kar je le nekoliko manj, kot je bilo leta 2017 število vseh satelitov v vesolju (1.459) [3]. Čeprav je načrtovanje, uvajanje in

vzdrževanje satelitskih sistemov zelo zapleteno in drago, to prinaša ogromno povračilo, saj se pridobljeno strokovno znanje in izkušnje lahko vključijo tudi v druge sektorje, ki niso neposredno povezani s proizvodnjo vesoljske tehnike [1]. Medtem ko se vlade in podjetja po vsem svetu vedno bolj zanašajo na satelitske storitve, proizvodnja satelitskih sistemov ostaja razmeroma koncentrirana na peščici območij, ki imajo kvalificirano delovno silo, inženirske zmogljivosti in finančna sredstva za izdelavo zanesljivih in kompleksnih sistemov. ZDA so tako še vedno največji proizvajalec umetnih satelitov, Kitajska in Rusija pa jim sledita [4].

Umetni sateliti se uporabljajo za različne namene in uvrščajo v različne skupine glede na nalogo, ki jo opravljajo v vesolju. Znanstvenoraziskovalni sateliti se uporabljajo za opazovanje vesolja, meteorološki za spremljanje in napovedovanje vremena, telekomunikacijski za oddajanje radijskih, televizijskih in telefonskih signalov ter za dostop do interneta, navigacijski so namenjeni orientaciji na Zemlji, vojaški opazovanju vojaškega dogajanja na Zemlji, radioamaterski komuniciranju radioamaterjev po vsem svetu, sateliti za pomorske komunikacije pa so namenjeni delu z manjšimi Zemeljskimi postajami na krovu trgovskih in vojaških ladij. Med umetne satelite uvrščamo tudi vesoljska plovila s človeško posadko in vesoljske smeti, med katere spadajo pokvarjeni in/ali izrabljeni stari sateliti [3].

Čeprav so sateliti še vedno zelo draga vesoljska plovila, njihova finančna vrednost upada s pojavom majhnih satelitov. Ti lažji in manjši sateliti so sposobni opravljati določene naloge, ki so jih do nedavnega opravljali le veliko večji, nekajtonski sateliti. Novi ekonomski modeli v vesoljski tehnologiji in hiter napredek v elektroniki so spremenili satelitsko tehnologijo, zmanjšali stroške izdelave in izstrelitve ter velikost satelitov [5]. Vse to pa je omogočilo vstop

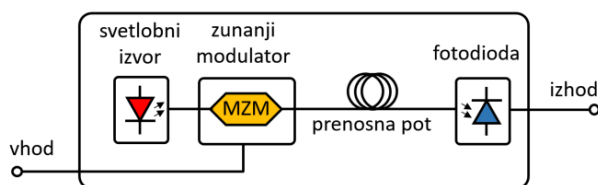
manjšim akterjem, kjer svojo vlogo v zadnjih letih odigrava tudi Slovenija [6, 7].

Vpeljava nove tehnologije v vesoljsko tehniko je zamuden proces in včasih lahko traja tudi desetletje. Vesoljsko plovilo in zmogljivost naprave je treba vedno natančno prilagoditi, zato si vesoljska industrija, ki je razmeroma konservativna industrijska panoga, želi vedno ogledati več demonstracij in varnostnih testov, preden se odloči za uvedbo novosti. Ko so nove tehnologije uvedene, pa ostanejo v vesoljskem sektorju dalj časa in se tudi v veliki meri uporabljajo [8].

V tem članku so opisane možnosti za uporabo nove tehnologije, mikrovalovne fotonike (angl. microwave photonics – MWP), na umetnih satelitih. Prikazani so nekateri primeri, kjer se MWP na satelitih že uporablja, in njene potencialne možnosti za uporabo. Navedene so tudi prednosti, ki jih MWP prinaša satelitom v primerjavi z izključno mikrovalovnimi rešitvami.

2 TEHNOLOGIJA MIKROVALOVNE FOTONIKE

Mikrovalovna fotonika je novo, zelo atraktivno interdisciplinarno področje [9, 10, 11], ki združuje mikrovalovno in fotonsko tehnologijo z namenom generiranja, prenosa [12], obdelave [13] in detekcije signalov v radiofrekvenčnem (RF) spektru. Prinaša prednosti optičnih tehnologij za zagotavljanje funkcij v mikrovalovnih sistemih, ki so zelo zapleteni ali jih je celo nemogoče izvesti neposredno v domeni RF-spektra [13]. Eden ali več analognih mikrovalovnih električnih signalov modulira signal (nosilnik) optičnega izvora in se s pomočjo elektrooptične pretvorbe na oddajni ter optoelektrične pretvorbe na sprejemni strani prenese preko optičnega vlakna ali fotonskega vezja. Sistem MWP tako tipično predvideva signal RF na svojem vhodu in izhodu, želena funkcionalnost pa je zagotovljena v optičnem delu (npr. optična prenosna pot s pripadajočimi lastnostmi), kot prikazuje slika 1. Modulacija optičnega nosilnika se izvrši v zunanjem Mach-Zehnderjevem modulatorju (MZM).



Slika 1. Najmanjši mikrovalovno-fotonski dvovhodni sistem z zunanjo modulacijo [14].

Uporaba tehnike MWP v satelitskih sistemih v primerjavi s popolnoma mikrovalovnimi rešitvami prinaša nekatere prednosti, pri čemer sta najpomembnejši manjša velikost podsistemov in tako varčevanje s prostorom za namestitev opreme na satelitu ter nižja masa pri satelitih z visoko prepustnostjo (angl. High-throughput satellite – HTS) [15]. Med druge prednosti uporabe MWP se štejejo distribucija signala z optičnimi

kabli namesto RF-opreme, s čimer se pridobi zanemarljive signalne izgube pri prenosu, manjšo uporabo koaksialnih kablov ter valovodov in odpornost proti elektromagnetnim motnjam. Ker so sprejemniki pri MWP univerzalni in širokopasovni, tehnika MWP omogoča tudi izvedbo satelita z visoko podatkovno prepustnostjo brez digitalne obdelave, kar poveča zmogljivost prenosa podatkov.

Pri nadomeščanju električnih koaksialnih kablov z optičnimi vlakni je bilo treba najprej odpraviti neodpornost optičnega vlakna proti visoko energijskim kozmičnim sevanjem. Navadnim optičnim vlaknom s povečanim lomnim količnikom jedra na račun dodajanja germanija, bora, fosforja, aluminija ali drugih primesi, se ob prisotnosti ionizirnega sevanja poveča slabljenje. Za vesoljsko okolje je za to primerno samo vlakno, kjer je jedro izdelano iz čistega kremenovega stekla (SiO_2) [16].

3 UVEDBA MWP NA PODROČJU SATELITSKEGA DALJINSKEGA ZAZNAVANJA

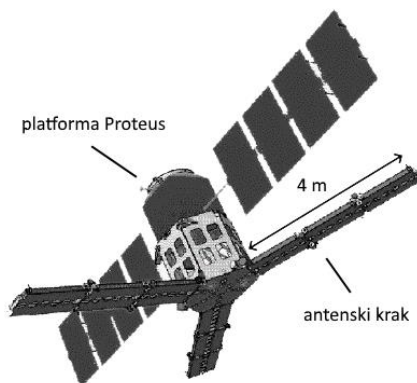
Naloga satelitskega daljinskega zaznavanja je pridobivanje informacij o površju Zemlje s pomočjo senzorjev na satelitu ali skupine satelitov [17]. Pri tem se iz Zemlje zaznava sevano elektromagnetno valovanje, ki se nato obdelava, analizira in ustrezno uporabi. S predhodno obdelavo signalov na krovu satelita je količina podatkov, ki jih je treba poslati na Zemljo, ustrezno manjša.

Prva večja uporaba MWP v vesolju je bila na satelitu SMOS (angl. Soil Moisture and Ocean Salinity) oz. instrumentu MIRAS (angl. Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis), katerega namen je merjenje vlažnosti tal in slanosti oceanov [17]. S pomočjo radiometra se s površja Zemlje pobira šibke mikrovalovne signale in tako izvede različne meritve geofizičnih spremenljivk.

Satelit je zgrajen iz platforme Proteus (slika 2), ki za določanje in nadzor tirnice uporablja sprejemnik sistema globalnega pozicioniranja (angl. Global Positioning System). Za merjenje sprememb v usmerjenosti anten na satelitu se uporabljajo triosni žiroskopi, s čimer je zagotovljeno tudi natančno poznavanje položaja za izpolnjevanje zahtev o sami stabilnosti satelita. Štiri majhna reakcijska kolesa ustvarjajo navor za nastavitev položaja [18].

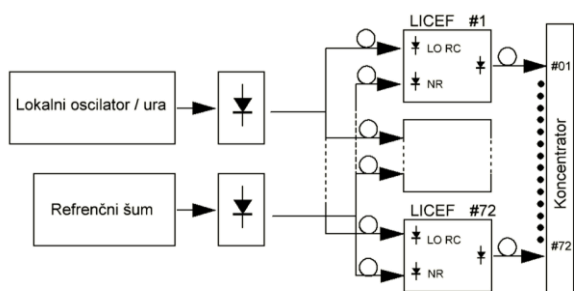
SMOS, uspešno izstreljen 2. novembra 2009, je bil prvi dvodimenzionalni radiometer, deloval pa je na frekvenčnem mikrovalovnem področju med 1.400 in 1.427 MHz (frekvenčni pas L). Da bi dosegli zahtevano prostorsko ločljivost za opazovanje vlažnosti tal in slanosti oceana v L-pasu, bi morali imeti ogromno anteno. Za misijo SMOS pa je bila antenska odprtina inovativno sintetizirana skozi množico majhnih anten. Projekt je v vsakem antenskem kraku uporabljal 18 lahkih in cenjenih čelnih (angl. Lightweight Cost-Effective Front-end – LICEF) radiometrov in 12 radiometrov LICEF v osrednjem delu satelita, skupaj

tako 66 radiometrov LICEF. Poleg tega so v osrednjem delu satelita nameščeni tudi trije močnostni radiometri (angl. Noise Injection Radiometers – NIR), ki se uporabljajo v kalibracijskem postopku [19]. Vsak NIR pa je zgrajen iz dveh sprejemnikov LICEF, ki sta povezana na isto anteno.



Slika 2. Prikaz vesoljskega plovila SMOS [18].

Tako inštrument MIRAS skupaj obsega 69 anten (66 LICEF in 3 NIR) in 72 sprejemnikov (66 LICEF in 6 LICEF za vse NIR). Kot prikazuje slika 3, se do vseh 72 sprejemnikov s pomočjo optičnih vlakenskih povezav (največje dolžine 7 m) vodi signal iz lokalnega oscilatorja [20]. Vsak LICEF je antena, ki predstavlja integrirano enoto, s katero meri sevanje, oddano iz Zemlje. Pri tem se izkorišča velika prednost MWP za distribucijo signala z ene točke na več točk. Čeprav so laserski izvori zapletene optične naprave, so sprejemniki, ki vsebujejo samo fotodiodo, sorazmerno preprosti elementi. Sistem je tako sestavljen iz veliko preprostih elementov in le ene zahtevnejše enote. Zahteve za zakasnitev faze radijskega signala so bile na nivoju 1 cm, optična vlakna pa so morala biti natančno odrezana [21].

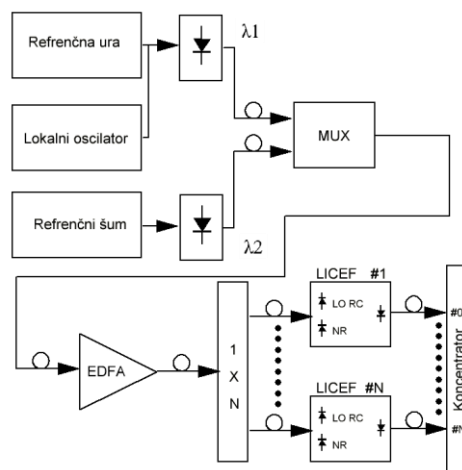


Slika 3. Blokovni načrt povezave inštrumenta MIRAS [18].

Z izstrelitvijo satelita SMOS je bilo potrjeno, da MWP v vesoljskem okolju deluje, o čemer pričajo zajete slike iz satelita. Po drugi strani pa so raziskovalci opazili, katere stvari lahko izboljšajo pri gradnji naslednjih satelitov in inštrumentov MIRAS [22].

Naslednik SMOSops-H, ki znanstvenikom zagotavlja stalno opazovanje geofizičnih spremenljivk z visoko ločljivostjo in izboljšano natančnostjo, ima drugačno mehansko strukturo. Dodana je zveza, ki za prenos optičnih signalov uporablja dve valovni dolžini, optični

multiplekser (angl. multiplexer – MUX) in optični vlakenski ojačevalnik s primesjo erbija (angl. Erbium doped fibre amplifier – EDFA) za zagotavljanje želenega nivoja optične moči pred optičnim razcepnikom. Radiometri se selijo na področje milimetrskih valov (angl. millimeter Wave – mmW), kjer se detekcija lahko izvede direktno ali z mešanjem. Najbolj smiselno pa je pripeljati lokalni oscilator do 120 anten po optični zvezi (najdaljše dolžine približno 6 m), kot prikazuje slika 4. Za generiranje mm-valov bo uporabljeno mešanje optičnih signalov [23].



Slika 4. Blokovni načrt povezave izboljšane inštrumenta MIRAS [23].

4 UVEDBA MWP NA PODROČJE SATELITSKIH KOMUNIKACIJ

4.1 Satelitske komunikacije

Že od začetka je glavna naloga komunikacijskih satelitov sprejemanje signala, ki prihaja iz Zemlje, in ga ojačenega ponovno posredovati na določeno geografsko območje na Zemlji [24]. Ker je na satelitu zahtevano visoko ojačenje in bi prihajalo do presluha med izhodno in vhodno radijsko stopnjo, je treba narediti frekvenčno pretvorbo (običajno navzdol) med sprejetim in oddanim signalom. V satelitskih komunikacijah uporabljen frekvenčni spekter se razteza med frekvenca 1 GHz in 40 GHz ter vključuje različne frekvenčne pasove. Poznamo frekvenčni pas L (med 1 in 2 GHz), ki se uporablja za navigacijske sisteme, frekvenčni pas S (med 2 in 4 GHz) se uporablja pri vremenskih in radijskih postajah, frekvenčni pas C (med 4 in 8 GHz) je namenjen komercialnim satelitskim telekomunikacijam, frekvenčni pas X (med 8 in 12 GHz) uporabljajo vojska in vladne organizacije, frekvenčni pas Ku (med 12 in 18 GHz) se uporablja v satelitskih komunikacijah za razpršeno oddajanje, frekvenčni pas K (med 18 in 27 GHz) se zaradi visokega slabljenja ozračja (na 22 GHz je absorpcija vodne pare) uporablja le za prenos na kratke razdalje, frekvenčni pas Ka (med 26,5 in 40 GHz) pa za potrebe vojske in vesoljskih tehnologij [25].

Vsak frekvenčni pas ima svoje lastnosti, zaradi katerih je primeren za določeno področje uporabe. Trenutni trend v satelitskih komunikacijah je uporaba višjih frekvenc, saj se lahko zaradi razpoložljive večje pasovne širine prenese večja količina podatkov. Frekvenčni pas Ka je tako privlačen za storitve, ki jim prostor v nižjih frekvenčnih pasovih ne zadošča. Največji tehnični izziv v frekvenčnem pasu Ka je bistveno večje slabljenje signala v slabih vremenskih razmerah, kar se lahko odpravi s povečanjem oddajne moči ali občutljivosti sprejemnika [25]. Nekatere alternativne tehnične rešitve za izvedbo nadzora moči pri prenosu navzgor in navzdol so lahko zmanjševanje količine prenosa podatkov med slabim vremenom, premik prenosa podatkov na nižje frekvence v frekvenčni pas Ku ali C ali celo uporaba več oddajnih lokacij za izogibanje lokalnim neurjem.

V zadnjih nekaj letih je bilo mogoče opaziti ogromno rast in napredek informacijsko-telekomunikacijskih tehnologij. Z naraščajočo uporabo hitrega interneta, videokonferenc, prenosa v živo itd. se zahteve po pasovni širini in zmogljivosti drastično povečujejo. Vedno večje povpraševanje po povečanju podatkovnih in večpredstavnostnih storitev je privedlo do prenasičenosti v konvencionalno uporabljenem RF-spektru do 18 GHz in terjalo prehod na višje frekvenčne nosilnike.

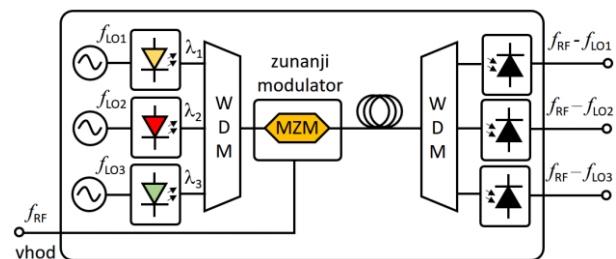
Prav tako je v zadnjih nekaj letih veliko pozornosti usmerjene v povečanje fleksibilnosti komunikacijskih satelitskih zvez. Namen prilagodljivosti je omogočiti določenemu satelitu, da podpira različna frekvenčna področja, ponovno konfigurira pokritost kot odziv na spreminjajoče se prometne zahteve in medsebojno povezanost med sateliti. Na splošno bi to satelitskemu sistemu omogočalo, da se v svoji življenjski dobi prilagodi spreminjajočim se okoliščinam in s tem poveča svojo uporabnost in donosnost.

4.2 Uporaba MWP za telekomunikacijske tovore

Morebitni naslednji korak v satelitski tehniki je uporaba MWP za telekomunikacijske tovore, saj se za naslednje generacije telekomunikacijskih satelitov pričakujeta obdelava informacijskih signalov zmogljivosti Tbit/s in delovanje v različnih frekvenčnih področjih [26]. Vedno pomembnejše pa postaja tudi usmerjanje antenskega snopa. Pri obdelavi mikrovalovnih signalov je prednost MWP v tem, da lahko optični mešalnik meša več signalov na več različnih valovnih dolžinah sočasno [27].

Septembra 2017 je bil izstreljen satelit Hispasat Amazonas 5 (AMZ5), ki je prvi uporabljal tehnologijo MWP na področju satelitskih komunikacij. Hispasat AMZ5 ponudnikom televizijskih storitev, ki delujejo s sistemom Hispasat, omogoča prenos 500 novih kanalov in oddajanje storitev v Latinski Ameriki. Ta satelit je bil tudi ključen za promocijo 4K-televizije v tem delu sveta. Poleg tega tamkajšnjim operaterjem ponuja učinkovite in konkurenčne satelitske internetne storitve [28]. Za distribucijo signalov frekvenc 10 MHz in 10 GHz uporablja optično zvezo z valovnodolžinskim razvrščanjem (angl. Wavelength Division Multiplex – WDM), ki naredi tudi ustrezno frekvenčno pretvorbo

[29]. Kot v preprosti obliki prikazuje slika 5, se trije modulirani optični nosilniki (f_{LO1} , f_{LO2} in f_{LO3}) v amplitudnem modulatorju sočasno modulirajo z vhodnim mikrovalovnim signalom in po detekciji filtrirajo na sprejemniku [30].



Slika 5. Večvzhodni mikrovalovno-fotonski sistem s pretvorbo frekvenc.

Optični frekvenčni pretvornik se uporablja tudi na geostacionarnem satelitu EUTELSAT 7C, utirjenem junija 2019, ki ima 49 transponderjev (radijskih oddajnikov in radijskih sprejemnikov) s pasovno širino 36 MHz [31].

V okviru programa Horizon 2020 se je izvajal projekt OPTIMA, ki se je osredotočil na vključevanje in miniaturizacijo enot generatorja optičnih frekvenc, optičnih pretvornikov frekvence, elektrooptičnih in optoelektričnih pretvornikov. Projekt OPTIMA je v realnem svetovnem industrijskem okolju zagotovil močan začetni zagon, da je tehnologija MWP lahko na razpolago vesoljski telekomunikacijski industriji in si je utrla pot k demonstraciji tehnologije v vesoljskem okolju [32].

4.3 Uporaba MWP v antenskih skupinah

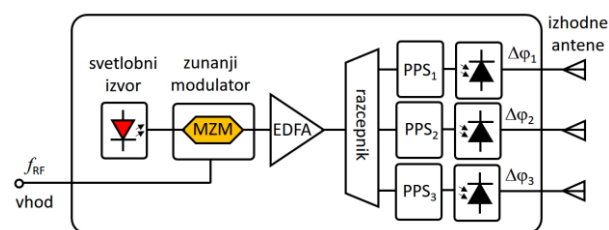
K fleksibilnosti komunikacijske satelitske zveze zelo pripomore nastavljen antenski sistem, ki satelitu omogoča, da spremeni svojo pokritost oz. sledi spremembam v okolju. Tudi za komunikacijo s satelitom je treba usmeriti ozek RF-snop na satelit, kar se običajno opravi z uporabo parabolične antene. Če se premika uporabnik na Zemlji ali satelit relativno na uporabnika, je treba vzdrževati smer tega ozkega snopa, ki natančno kaže na sam satelit. Standardni sistemi uporabljajo mehansko motorizirano stabilizacijsko roko, da parabolično zrcalo z ustreznim sevalnim elementom [33] usmerijo v satelit ne glede na to, kako ali kam se premika.

Alternativna rešitev je antenska skupina (angl. phased array), ki ustvari točko usmerjenega snopa iz niza manjših nepremičnih anten. Ena antenska skupina lahko uporabi na stotine ali tisoče antenskih elementov z medsebojno povezanostjo, ki jo ponuja zapletena mreža za oblikovanje snopa (angl. beam-forming). Z elektronsko spremembo relativne faze signala, ki ga odda vsak antenski element, (konstruktivna in destruktivna) kombinacija vseh teh majhnih signalov ustvari večji usmerjeni snop v naprej določeni želeni smeri. Ker je ta postopek popolnoma elektronski, se lahko nastalo smer snopa neposredno nadzira in usmerja. Tako je mogoče

spremljati gibanje kateregakoli satelita na nebu ne glede na to, kako ali kam se premika, celo brez mehanskih premikajočih se delov [34].

Oblikovanje snopa se lahko izvede digitalno, kot v primeru oblikovanja snopov na satelitih serije Inmarsat 4, ali pa z uporabo analognih sredstev, kot je v praksi na sistemu Boeing Spaceway [35]. Omejitev pri uporabi digitalnega oblikovanja snopov je povezana z zahtevami po povečani masi in moči digitalnega procesorja, ki lahko s številom antenskih elementov in pasovno širino hitro naraste. Pri tovrstnem oblikovanju snopa se pojavi vstavitveno slabljenje (angl. insertion loss), ki se povečuje s številom antenskih elementov (delitev signalne poti) in številom snopov. Zaradi tega je treba v sistem vgraditi ojačevalnike, da ohranijo moč signalov na uporabnem nivoju [35].

Alternativna rešitev je lahko uporaba optičnih tehnik oblikovanja snopov. Ti vključujejo elektrooptične in optoelektrične pretvornike s fotonskimi faznimi sukalniki za preoblikovanje snopa, kot prikazuje slika 6. Ta tehnologija je lahko vgrajena v fotonska integrirana vezja (angl. photonic integrated circuit – PIC), posledica česar so majhna velikost in teža in majhno vstavitveno slabljenje ter potencialno nizki stroški izdelave in namestitve [36]. Ker se oblikovanje snopa izvaja optično, se lahko za celoten frekvenčni obseg od L-pasu do K-pasu in še višjih frekvenc uporabita enaka zasnova in tehnologija. Poleg tega lahko posamezne PIC-e štejemo za gradnike, pri čemer je sistem potrebnega obsega in funkcionalnosti sestavljen le iz teh blokov. Tak pristop lahko z nizkimi stroški in ugodnimi lastnostmi, kot so majhna masa, poraba moči in vstavitveno slabljenje, zagotovi obsežne in zapletene mreže sevalnih snopov [37].



Slika 6. Skupina anten s fotonskimi faznimi sukalniki (angl. photonic phase shifter – PPS).

Antenski sevalni del se lahko tudi integrira z mešalnikom, kar je eden od zadnjih primerov uporabe MWP na satelitih iz ThalesAlenia. Thales ima strateški načrt za nadomestitev klasičnih mikrovalovnih enot z enotami MWP, kar bi prineslo velike prednosti. Vsekakor pa v nadaljnjem razvoju ne moremo pričakovati, da bi se optični sistemi MWP spremenili v popolnoma optične, saj optične frekvence nimajo tako velikih prednosti pri razširjanju skozi ozračje kot mikrovalovi.

Pri ozkopasovnih signalih je dokaj preprosto narediti fazne zakasnitve. Ti principi pa ne delujejo, ko želimo prenašati širokopasovne signale, saj je signal vsake

frekvence deležen različne zakasnitve. Če želimo narediti širokopasovno nastavljive antenske snope, potrebujemo prave zakasnitve. Treba je izdelati zakasnitve na samem PIC, saj se le tako lahko zmanjšata prostor in teža. Na PIC lahko dosežemo zakasnitev do 1 ns, več pa je omejeno z naraščanjem vstavitvenega slabljenja zaradi daljših svetlovodov [37].

5 ZAKLJUČEK

Področje vesoljskih tehnologij je eno izmed najbolj konservativnih panog in s težavo sprejema nove tehnologije, če obstoječe tehnologije, ki so že preizkušene v vesoljskem okolju, brezhrebno delujejo. Kljub temu je vesoljska tehnika tehnologijo MWP že sprejela – sprva v projektih satelitskega daljinskega zaznavanja, zdaj pa se vedno bolj uveljavlja tudi na področju satelitskih komunikacij. Seveda so najbolj sprejeti projekti MWP, ki so na Zemlji že dobro uveljavljeni in preizkušeni. Še vedno pa je treba vso opremo MWP, ki se uporablja na Zemlji, prilagoditi mehanskim vibracijam med vzletom in 15-letnemu preživetju v vesoljskem okolju na geostacionarni tirnici (vakuum, toplotni raztezki, ionizirna sevanja ...). Ne nazadnje pri uvajanju MWP na satelite ne smemo pozabiti, da v vesoljskem okolju napake niso zaželenne. Iz tega razloga mora tudi MWP najprej doseči točko izjemne zanesljivosti, saj servisiranje satelitov ni preprosto.

Sedanji sistemi MWP temeljijo na vlaknih in diskretnih sestavnih delih, kar omejuje energetska učinkovitost, prilagodljivost, razširljivost in posledično veliko uporabo v sistemih. Integrirana mikrovalovna fotonika (IMWP) poskuša premostiti te omejitve z vključitvijo teh sistemov v PIC. IMWP pa je še vedno v povojih in kaže, da bo v naslednjih letih treba razviti še veliko znanja ter tehničnega in znanstvenega načrtovanja, da ustvarimo tehnologijo, ki bo uporabna tudi v vesoljski tehniki [38].

Od uspešne uvedbe MWP in IMWP v satelitski tehniki si ne nazadnje ometamo tudi začetek množične uporabe na Zemlji – v sektorjih, ki niso neposredno povezani z vesoljsko industrijo. Ta potencialna področja so:

1. telekomunikacije, kjer sta cilj povečanje zmogljivosti omrežja in zmanjšanje zakasnitev pri prenosu podatkov;
2. avtomobilska industrija: za izdelavo senzorjev v avtonomnih vozilih, kot sta lidar in radar;
3. pametna mesta: za povezovanje diskretnih in izvedbo distribuiranih senzorjev.

LITERATURA

- [1] J.-M. Bockel, "The future of space industry, General Report", Economic and security committee, NATO parliamentary assembly, France, november 2018.
- [2] "Online Index of Objects Launched into Outer Space", dosegljivo: <http://www.unoosa.org/oosa/osoindex/search-ng.jsp>, dostopano, 28. 12. 2020.

- [3] A. Murtaza, S. J. H. Pirzada, T. Xu and L. Jianwei, "Orbital Debris Threat for Space Sustainability and Way Forward (Review Article)", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 61000-61019, 2020.
- [4] K. Buchholz, "The Countries with the Most Satellites in Space", julij, 2020, dosegljivo: <https://www.statista.com/chart/17107/countries-with-the-most-satellites-in-space/>, dostopano: 28. 12. 2020.
- [5] Ž. Andrejč, B. Batagelj, "Vrednotenje tehničnih lastnosti komunikacijskega omrežja majhnih satelitov Starlink", *Elektrotehniški vestnik*. 2021, letn. 88, št. 1/2, str. 1–7, dosegljivo: <https://ev.fe.uni-lj.si/1-2-2021/Andrej.pdf> dostopano: 10. 10. 2021.
- [6] T. Rodič, D. Matko, K. Oštir, B. Batagelj, M. Peljhan, T. Zwitter, B. Malič, T. Šuštar "Small satellites technologies from newcomers perspective – Slovenian case Space.si", *Proceedings of the 45th Symposium. Small Satellites Systems and Services Symposium*, Madeira, Portugal, 31 May – 4 June 2010, Centre National d'Études Spatiales: = CNES, str. 1–11, 2010.
- [7] Leon Pavlovič "Slovenija gre v vesolje: zahtevnost tehnologije na krogu satelita", *Elektrotehniški vestnik* 83(3):81–86, 2016.
- [8] A. de Concini, J. Toth, S. Dustdar, "The future of the European space sector How to leverage Europe's technological leadership and boost investments for space ventures", 2019.
- [9] J. Seeds in K. J. Williams, "Microwave Photonics", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, no. 12, pp. 4628–4641, 2006.
- [10] Stavros Iezekiel, "Microwave photonics: Devices and Applications", Wiley-IEEE Press, oktober 2009.
- [11] C. Lim, Y. Tian, C. Ranaweera, T. A. Nirmalathas, E. Wong and K. Lee, "Evolution of Radio-Over-Fiber Technology," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 6, pp. 1647–1656, 2019, doi: 10.1109/JLT.2018.2876722.
- [12] B. Boštjan, P. Leon, N. Luka in T. Sašo, "Convergence of fixed and mobile networks by radio over fibre technology", *Informacije MIDEM*, vol. 4, no. 2, junij 2011.
- [13] J. Capmany, J. Mora, I. Gasulla, J. Sancho, J. Lloret in S. Sales, "Microwave Photonic Signal Processing", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 4, pp. 571–586, februar 2013.
- [14] Kristjan Vuk Baliž, "Izvedba visokofrekvenčnih sit s tehniko mikrovalovne fotonike", Univerza v Ljubljani – Fakulteta za elektrotehniko, magistrsko delo, Ljubljana, 2019.
- [15] H. Kaushal, G. Kaddoum, "Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 57–96, 2017.
- [16] E. Joseph Friebele, Michael E. Gingerich, in David L. Griscom, "Survivability of optical fibers in space", *Proc. SPIE 1791, Optical Materials Reliability and Testing: Benign and Adverse Environments*, februar 1993.
- [17] Krištof Oštir, "Daljinsko zaznavanje", Ljubljana: Založba ZRC, 250 str., 2006.
- [18] "SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) Mission", <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/smos/space-segment/instrument>, dostopano: 10. 10. 2021
- [19] I. Corbella, A. Camps, F. Torres in J. Bara, "Analysis of noise-injection networks for interferometric-radiometer calibration", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 48, no. 4, pp. 545–552, april 2000.
- [20] C. Gabarró et al., "Impact of the Local Oscillator Calibration Rate on the SMOS Measurements and Retrieved Salinities", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 51, no. 9, pp. 4633–4642, september 2013.
- [21] M. Martín-Neira and J. M. Goutoule, "MIRAS: A two dimensional aperture synthesis radiometer for Soil Moisture and Ocean Salinity observations", *ESA Bull.*, vol. 92, pp. 95–104, 1997.
- [22] A. M. Zurita, I. Corbella, M. Martín-Neira, M. A. Plaza, F. Torres in F. J. Benito, "Towards a SMOS Operational Mission: SMOSops-Hexagonal", *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 6, no. 3, pp. 1769–1780, junij 2013.
- [23] M. Martín-Neira, et al., "Microwave interferometric radiometry in remote sensing: An invited historical review", *Radio Sci.*, 49, 415–449, 2014, doi:10.1002/2013RS005230.
- [24] Boštjan Batagelj, "Satelitske komunikacije: študijsko gradivo", Ljubljana: Laboratorij za sevanje in optiko, 2018.
- [25] Davor Žonta, "Prenos satelitskega signala v frekvenčnem pasu Ka", Univerza v Ljubljani – Fakulteta za elektrotehniko, diplomsko delo VSS, Ljubljana, 2016.
- [26] V. C. Duarte, J. G. Prata, C. F. Ribeiro, et al. Modular coherent photonic-aided payload receiver for communications satellites. *Nat Commun* 10, 1984 (2019). dosegljivo: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10077-4>
- [27] J. Anzalchi, P. Inigo, B. Roy, "Application of photonics in next generation telecommunication satellites payloads", *International Conference on Space Optics – ICSO 2014*, november 2017.
- [28] María Felpeto, "Successful launch of the HISPASAT Amazonas 5 satellite", september 2017, dosegljivo: https://www.hispasat.com/contenidos/notas-de-prensa/0/288-np-amz5-post-exito_eng.pdf, dostopano: 10. 10. 2021.
- [29] M. A. Piqueras, et al., "A Ka-Band Single String Photonic Payload Flight Demonstrator for Broadband High Throughput Satellite Systems and an In Orbit Demonstrator of Optical RF distribution on board satellites", *International Conference on Space Optics – ICSO 2018*, 2018, Chania, Greece.
- [30] K. Van Gasse, et al, "Ka-to-L-band frequency down-conversion using a micro-photonics III-V-on-silicon mode-locked laser and Mach-Zehnder modulator", *International Conference on Space Optics*, France, 2016.
- [31] V. Polo, M.A. Piqueras, J. Martí, "Photonic Payloads for Next Generation 5G Satellite Networks", *IEEE Future Networks Tech Focus*, Volume 3, Issue 3, November 2019.
- [32] "OPTIMA: Towards a demonstration of photonic payloads for telecom satellites", dosegljivo: <https://www.photonic-payload-optima.eu>, dostopano: 10. 10. 2021.
- [33] P. Miklavčič, M. Vidmar in B. Batagelj, "Patch-monopole monopulse feed for deep reflectors", *Electronics Letters*, vol. 54, no. 24, str. 1364–1366, december 2018.
- [34] R. Mayo and S. Harmer, "A cost-effective modular phased array", *2013 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*, Waltham, MA, 2013, pp. 93–96, doi: 10.1109/ARRAY.2013.6731807.
- [35] Peter McNeil, "Analog vs. Digital Beamforming", dosegljivo: <https://blog.pasternack.com/antennas/analog-vs-digital-beamforming>, dostopano: 10. 10. 2021.
- [36] C. Porzi et al., "Photonic Integrated Microwave Phase Shifter up to the mm-Wave Band With Fast Response Time in Silicon-on-Insulator Technology", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 19, pp. 4494–4500, 2018.
- [37] Patrik Ritoša, "Vzbujanje prilagodljive antene z uporabo optične obdelave radiofrekvenčnega signala", doktorska disertacija, 2009.
- [38] "European Network for the High Performance Integrated Microwave Photonics", dosegljivo: <https://euimwp.eu/>, dostopano: 10. 10. 2021

ZAHVALA

Delo je bilo opravljeno v okviru raziskovalnega programa Informacijsko komunikacijske tehnologije za kakovostno življenje – ICT4QoL (št. P2-0246), ki ga sofinancira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna ter akcije COST CA16220 »European Network for High Performance Integrated Microwave Photonics«.