

Določanje pomena in kakovosti radijskega dostopnega omrežja s centraliziranim optoelektronskim oscilatorjem

Mehmet Alp Ilgaz, Boštjan Batagelj

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

Povzetek. V delu je predstavljena možnost za vključitev optoelektronskega oscilatorja (OEO) v radijsko dostopno omrežje sodobnih mobilnih komunikacijskih sistemov. Trenutno radijsko dostopno omrežje v vsaki oddaljeni radijski enoti uporablja lokalni oscilator (LO) s frekvenčnim množilnikom za frekvenčno pretvorbo podatkovnega signala v višje frekvenčno področje, pri čemer množenje povzroči nezaželeno naraščanje faznega šuma v komunikacijskem sistemu. To dejstvo pomeni težave pri uvajanju novih generacij radijskih dostopnih omrežij na višjih frekvencah, ker fazni šum omejuje modulatorsko stopnjo in celično pokrivanje. V članku je opisan nov pristop za poenostavitev oddaljenih radijskih enot z uvedbo centraliziranega OEO, ki je zmožen proizvodnje signala z zelo nizkim faznim šumom v mikrovalovnem in milimetrskem valovnem področju. Predlagana sta namestitve oscilatorja v centralni postaji radijskega dostopnega omrežja in razdeljevanje v posamezne oddaljene radijske enote prek distribucijske pasivne optične infrastrukture, s čimer se onemogoči kvarni vpliv okoljskih sprememb na delovanje oscilatorja. Predlagani sistemski načrt je primeren za visokozmogljivo prihajajočo peto generacijo (5G) in bodočo šesto generacijo (6G) mobilnih omrežij, ki bosta delovali v milimetrskem področju.

Ključne besede: optoelektronski oscilator, fazni šum, barvna razpršitev, radijsko dostopno omrežje, milimetrski valovi

Determining the importance and quality of a radio access network with a centralized optoelectronic oscillator

With the 3G and 4G technologies increasingly crowding the radiofrequency spectrum, 5G must operate on new frequency bands and even higher frequencies. This brings into the play additional frequency bands as well as a millimeter-wave band with its own unique challenges, such as an atmospheric-signal loss and network-components cabling issues. Since the millimeter-wave cabling is a very critical element in terms of their reliability and robustness, the weakest link in a millimeter-wave system can be implemented using low-loss optical fibers instead of coaxial cables, which brings the use of the optical technologies to the radio-access networks (RAN).

The paper investigates the possibility of implementing an optoelectronic oscillator (OEO) in RAN of modern mobile-communication systems. The current RAN uses a local oscillator (LO) with a frequency multiplier in each remote radio unit to convert the data signal to a higher frequency range resulting in an undesirable increase in the phase noise in the communication system. This leads to difficulties when introducing a new generation of RANs of a higher frequency, since the phase noise limits the modulation rate and cell coverage. The paper presents a new approach to simplify the remote radio unit by introducing a centralized OEO to generate a signal with a very low phase noise in the microwave and millimeter wave range. An oscillator is proposed to be installed in the central station to distribute its signal through a passive optical infrastructure, thus avoiding negative effects of environmental changes on the oscillator operation. The

presented solution is suitable for the upcoming high-performance fifth-generation (5G) and future sixth-generation (6G) of the mobile networks which will be operating in a millimeter-wave band.

The challenges of placing OEO in the central station of a next-generation RAN are solved by using adjustable dispersion compensators as their chromatic dispersion is a significant limiting factor in transmitting millimeter-wave signals over an optical fiber. The approach is supported by measurements of the oscillation signal purity degradation during distribution caused by the passive infrastructure and preamplification. For a 20 km single-mode fiber transmission and 20 dB gain with an erbium-doped fiber amplifier (EDFA), the measured phase-noise degradation is 4 dB at frequency offset of 1 kHz and 6 dB at frequency offset of 10 kHz from the center frequency of 10 GHz.

Keywords: opto-electronic oscillator, phase noise, chromatic dispersion, radio access network, optical distribution network, millimetre wave

1 UVOD

Stalno povečevanje količine prenesenih podatkov po javnem mobilnem omrežju [1] narekuje posodobitev, ki se lahko izvede z drobljenjem radiofrekvenčnih (RF) celic v obstoječih omrežjih ali uvedbo nove tehnološke generacije, ki bo imela na razpolago več radijskega spektra in ga tudi učinkoviteje izrabljala [2]. Ker je uvedba novih lokacij za antenske sisteme stare generacije

draga in tudi okoljsko nezaželena, se je mnogo ponudnikov mobilnih storitev tudi v Evropi že odločilo za prehod iz četrte v peto generacijo (5G) javnih mobilnih omrežij [3].

Zaradi vse bolj prisotne natrpanosti RF-spektra s tehnologijama 3G in 4G, bosta 5G in 6G morali delovati v novih frekvenčnih pasovih, kar privede do uporabe dodatnih frekvenčnih področij in tudi milimetrskega frekvenčnega pasu, ki ima svoje edinstvene izzive [4], vključno z izgubami signala v ozračju in povezovanja omrežnih elementov. Ker je kabel za milimetrske valove zelo pomemben element z vidika zanesljivosti in robustnosti, ga lahko nadomestimo z optičnim vlaknom, ki ima tudi nižje izgube v primerjavi s koaksialnim kablom [5], kar vnaša uporabo optičnih tehnologij v radijsko dostopovno omrežje (angl. radio access network – RAN) [6].

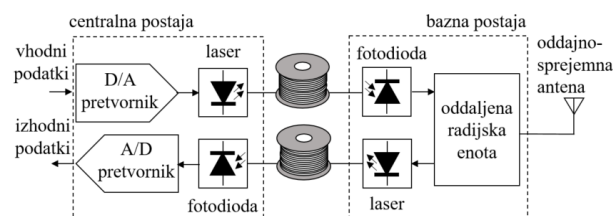
Uvedba optičnih in optoelektronskih tehnologij v RAN odpira možnosti nadgradnje in potencialne prednosti, ki jih še dodatno nadgrajuje tehnologija integrirane mikrovalovne fotonike [7]. Namen tega prispevka je prikazati pomen uvedbe naprave, imenovane optoelektronski oscilator (OEO), v RAN in tudi ovrednotiti kakovost na ta način generiranega in distribuiranega signala iz ene centralne na več oddaljenih lokacij.

Članek je razdeljen v 5 poglavij. V sledečem poglavju so predstavljene tehnologija generiranja signala v 4G in njene omejitve. Nato so predstavljeni numerologija tehnologije 5G, njene sedanje omejitve in predlogi za izboljšave. V nadaljevanju so predstavljeni še rešitev v obliki centraliziranega OEO in rezultati praktičnih poskusov. V zaključku so navedene prednosti centraliziranega OEO in njegove uporabe v RAN.

2 RADIJSKO OMREŽJE 4G

RAN je mogoče opredeliti kot del mobilnega komunikacijskega sistema, ki se uporablja za zagotavljanje komunikacije med končnimi napravami, kot so mobilni telefoni, in jedrnim omrežjem. Celična bazna postaja, nameščena na antenski stolp, je najbolj reprezentativna oblika RAN, ki se je z različnimi pristopi skozi leta izboljševala in na osnovi katere je bila poimenovana posamezna razvojna generacija, kot so 2G, 3G, 4G itd. Zaradi manjših izgub ter manjše porabe prostora in energetske učinkovitosti je bila v radijskem omrežju 4G razvita porazdeljena bazna postaja, ki jo v grobem razdelimo na tri dele: osnovnopasovno enoto (angl. baseband unit – BBU), oddaljeno radijsko enoto (angl. remote radio unit – RRU) in oddajno-sprejemni antenski sistem. BBU, ki je nameščen v telekomunikacijskem prostoru centralne postaje, generira in procesira digitalizirane osnovnopasovne RF-signale, poleg tega pa prek omrežnega vmesnika omogoča povezavo z jedrnim omrežjem. RRU iz digitaliziranega osnovnopasovnega signala ustvari analogni signal, ki ga prek koaksialnih kablov pošilja anteni, ta pa ga oddaja v prostor. V nasprotni smeri pa RRU sprejeti analogni

signal pretvori v digitalnega in ga pošlje v obdelavo BBU. RRU je pri distribuirani arhitekturi običajno nameščen na stolpu blizu antene, kar pomeni, da je dolžina koaksialnih kablov krajša kot pri centralizirani arhitekturi, posledično pa so tudi izgube znatno manjše, saj večina prenosne poti med BBU in anteno poteka prek optičnih vlaken z izjemno nizkim slabljenjem v primerjavi z izgubami signala v daljših koaksialnih kablkih [8]. Druga prednost komunikacij po optičnem vlaknu v primerjavi s povezavami z električnimi kabli ali radijskimi zvezami je velika zmogljivost. Zaradi velike pasovne širine optičnega vlakna se optična komunikacija prednostno uporablja namesto električnih kablov ali radijskih povezav. Namesto digitaliziranih osnovnopasovnih RF signalov se med BBU in RRU za prenos radijskega signala prek optičnega vlakna lahko uporablja tudi analogni komunikacijski sistem, poimenovan radio, prek vlakna [9], ki ga prikazuje slika 1. V sistemu radia prek vlakna je možno prenašati radijske signale tudi v mikrovalovnem in milimetrskem valovnem področju [10].



Slika 1: Radijsko dostopovno omrežje (RAN) na osnovi tehnologije radio prek vlakna. [11]

V trenutnem konceptualnem pristopu RAN se vhodni podatkovni signal do sprejemne fotodiode RRU prenaša po optičnem vlaknu. Fotodetektor v bazni postaji se uporablja za pretvorbo signala iz optične v električno domeno. Zelo pomemben člen pa so digitalne oddajno-sprejemne enote z analogno-digitalnimi in digitalno-analognimi pretvorniki in radijskimi enotami, katerih zmogljivosti tudi direktno vplivajo na učinkovitost in stroške RAN. [12]

V vsakem RRU, ki je sestavni del bazne postaje, se uporabljata ena ali več frekvenčnih pretvorbenih stopenj, ki skrbijo za pretvorbo signala vmesne frekvence navzgor in navzdol v frekvenčnem spektru, kot prikazuje slika 2. Oddajno-sprejemna enota uporablja arhitekturo vmesne frekvence, ki generira radiofrekvenčni signal s procesom pretvorbe navzgor na oddajni poti, pri čemer se signal pretvarja z nižjih na višje frekvence, ter pretvornik navzdol na sprejemni poti, pri čemer se signal pretvarja z višje frekvence na nižjo. Lokalni oscilator (LO) in ustrezni frekvenčni množilnik sta ključna elementa za kakovost frekvenčne pretvorbe navzgor ali navzdol za signale, ki prihajajo v RRU ali iz njega [11, 13]. Električno pasovno prepustno sito se uporablja za filtriranje neželenih signalov.

Eden od glavnih izzivov trenutne konfiguracije je uporaba LO za signalno pretvorbo navzgor in navzdol v vsakem RRU [11]. Slabost današnjega električnega LO

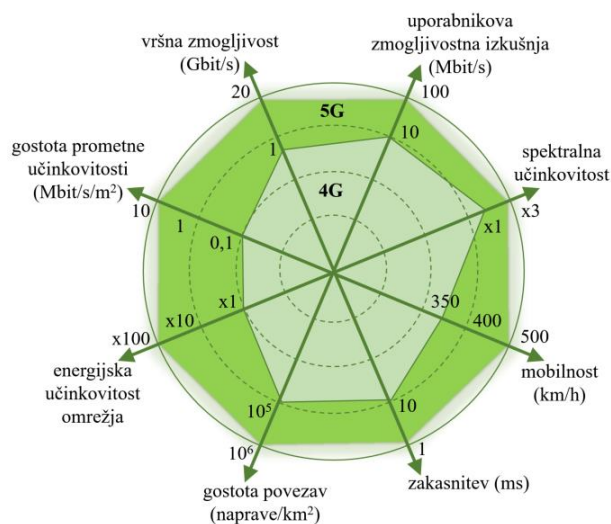
je povečevanje faznega šuma signala z množenjem na potrebno delovno frekvenco, kar kvarno vpliva na razmerje med nosilcem in šumom [14] in ima neposredne negativne posledice na zmogljivost omrežja [15]. Poleg tega uporaba LO v vsakem RRU povečuje zahtevnost baznih postaj. Dodatno na signal LO lahko vpliva temperatura okolice zaradi nenadzorovanega okolja, kar lahko povzroči neželen premik frekvence signala LO.



Slika 2: Prikaz zgradbe oddaljene radijske enote.

3 RADIJSKO OMREŽJE 5G

V naslednjih generacijah javnega mobilnega omrežja, tako imenovani peti generaciji (5G) in šesti generaciji (6G), je eden od ciljev povečati največjo hitrost prenosa podatkov [16]. Preostale glavne zahteve za 5G so prikazane na sliki 3. V ta namen je poleg mikrovalovnih signalov načrtovana tudi uporaba signalov milimetrskega valovanja [17] ter povečanje števila RRU [18] in izvedba omrežja z manjšimi celicami. Tudi zaradi povečane spektralne učinkovitosti je fazni šum LO v področju milimetrskih valov ključnega pomena za učinkovitost omrežja naslednje generacije.



Slika 3: Pričakovane zahteve za peto generacijo [7].

3.1 Prilagodljiv radijski vmesnik v 5G

Že v 4G se je za reševanje popačenja signala zaradi večpotja uporabljala tehnika ortogonalnega frekvenčnega razvrščanja (angl. orthogonal frequency-division multiplex), kjer so frekvenčni podnosilniki

razmaknjeni (angl. subcarrier spacing – SCS) za 15 kHz. Pri širjenju radijskega signala po prostoru se zaradi širjenja signala po več poteh lahko pojavijo motnje med posameznimi simboli (angl. intersymbol interference – ISI) in motnje med nosilci signalov (angl. intercarrier interference – ICI). S pomočjo OFDM se je mogoče izogniti ISI tako, da se pred vsak simbol vstavi prazen interval, ki mora biti večji od največje zakasnitve. Za izločitev ICI pa se vrine ciklična predpona v obliki zadnjega dela simbola.

V 4G se za promet v smeri proti uporabnikom uporablja način ortogonalnega frekvenčnega sodostopa (angl. orthogonal frequency-division multiple access – OFDMA), v smeri od uporabnika pa frekvenčno porazdeljeni sodostop z enojnim nosilnikom (angl. single carrier – frequency division multiple access), ki predvsem rešuje slab izkoristek končne ojačevalne stopnje. Za uvedbo neposredne komunikacije med napravami (angl. device-to-device – D2D) pa se OFDMA v 5G uvaja v obeh smereh. OFDMA ima dvodimenzionalen sodostop, pri čemer je vsakemu uporabniku dodeljen časovno-frekvenčni vir. Dodeljevanje se izvaja na bazni postaji in algoritem mora ob vsaki dodelitvi upoštevati več kriterijev, kot so kakovost radijske zveze, motnje, prioriteta, kakovost storitve ipd.

V 5G je radijski vmesnik bolj prilagodljiv, saj so poleg razmika 15 kHz za SCS uvedeni tudi razmiki 30 kHz, 60 kHz in 120 kHz. Povečan SCS je obvezen v frekvenčnem področju milimetrskih valov zaradi prisotnega večjega faznega šuma. Pravzaprav je v frekvenčnem področju milimetrskih valov mogoče za SCS uporabiti zgolj 60 in 120 kHz, ker je fazni šum oscilatorjev v oddajniku prevelik, da bi podnosilnike bolj zgostili. Če bi imeli oscilatorje z manj faznega šuma, bi lahko tudi pri višjih frekvencah uporabljali SCS s 15 kHz in 30 kHz, kar bi omogočilo izvedbo večjih celic in izboljšalo spektralno učinkovitost.

4 UVEDBA CENTRALIZIRANEGA OPTOELEKTRONSKEGA OSCILATORJA

Spektralno učinkovitost je mogoče izboljšati z uporabo oscilatorjev z nizkim faznim šumom. Električni oscilatorji, ki jih uporabljamo danes, se soočajo z resnim izzivom: vsakič ko se frekvenca množi, se fazni šum poveča za približno 6 dB [19]. Da bi se izognili tej fizikalni omejitvi, je bil izoblikovan predlog nadomestitve električnega oscilatorja z mikrovalovnim fotskim oscilatorjem, ki pa se ni uveljavil zaradi relativno kompleksne strukture integrirane resonančne tunelske diode. [20] Predlagana alternativna možnost za izvedbo RAN je uporaba OEO [21], ki je sposoben proizvajati signal z zelo nizkim faznim šumom tudi v področju mikrovalov in milimetrskih valov, saj njegov fazni šum ni odvisen od delovne frekvence zaradi lastnosti optične kasnilne linije.

Ideja centralnega generiranja in razdeljevanja signalov milimetrskih valov je bila predlagana že leta 1998 v [22], vendar je z uporabo OEO predlagan nov pristop, pri katerem se ne potrebuje električno-optične pretvorbe v centralni postaji in ni treba izrabljati nelinearnosti optičnega vlakna [23], kar je tehnično zelo zahtevna rešitev.

4.1 Optoelektronski oscilator (OEO)

OEO je že dlje časa dobro poznana naprava za ustvarjanje visokofrekvenčnih signalov. Znanstveni sferi sta ga pred približno 25 leti predstavila Maleki in Yao [24–27], skozi leta pa se je dopolnjeval in izboljševal [28]. Ena od glavnih prednosti OEO je neodvisnost faznega šuma od delovne frekvence zaradi lastnosti resonatorja [29]. OEO namreč kot kasnilno linijo uporablja optično vlakno z nizkimi izgubami, ker pa je faktor kakovosti (Q-faktor) OEO odvisen od dolžine optičnega vlakna [25], lahko OEO doseže Q-faktor od nekaj tisoč do sto tisoč v odvisnosti od dolžine optičnega vlakna. Tako je OEO sposoben ustvarjati visokofrekvenčne signale z nizkim faznim šumom [30]. Najmanjši fazni šum OEO je bil dosežen pri -163 dBc/Hz z odmikom 6 kHz od nosilca [31].

OEO ima tudi lastne omejitve [32–34], pri čemer je glavni izziv enozančnega OEO dolgoročna stabilnost. Na frekvenco signala, ki ga ustvarja OEO, vpliva temperatura okolice. Temperaturna nihanja povzročijo časovna spreminjanja frekvence OEO, katerega frekvenčni odmik znaša 8 ppm/K [35].

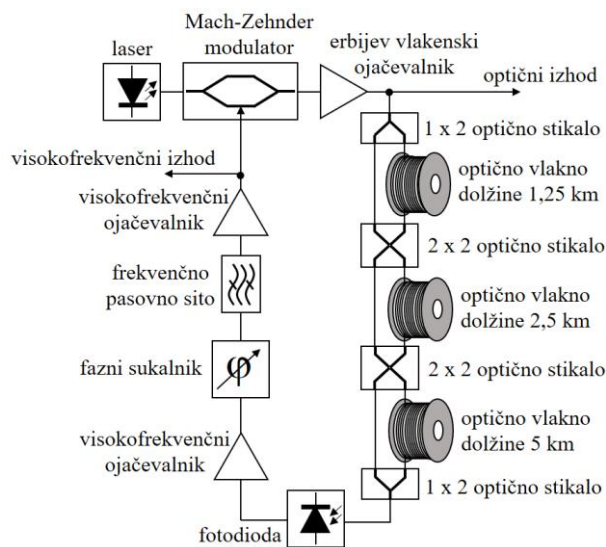
Dodaten nezaželen pojav pri OEO je večrodovno delovanje, saj OEO ne proizvaja samo glavnega frekvenčnega rodu, temveč se generirajo tudi višji rodovi, ki so prisotni v frekvenčnem spektru. Glavni razlog za tovrstne nezaželene stranske rodove je velika pasovna širina električnega pasovno propustnega sita [36]. Razdalja med osnovnim rodom in stranskimi rodovi je opredeljena kot prosto spektralno področje (angl. free spectral range – FSR), ki je določeno z dolžino optične kasnilne linije.

Pri načrtovanju OEO je eden od glavnih ciljev najti rešitev za dušenje stranskih rodov in izboljšanje razmerja slabljenja stranskega rodu (SMSR). V skladu s tem je predlagan nov praktičen pristop za določitev FSR in SMSR pri OEO [37], ki ga prikazuje slika 4. Pristop je kombinacija avtomatskega izbirnika poti po optičnih vlaknih z ustreznimi dolžinami in enozančnega OEO. Ker ima avtomatski izbirnik optičnih vlaken dve 1×2 optični stikali in dve 2×2 optični stikali, ima možnost izbire optične poti z osmimi različnimi vrednostmi. Ta pristop je koristen pri preiskovanju, testiranju in karakterizaciji električnih pasovno propustnih sit, ki se uporabijo v zanki OEO.

4.2 Centraliziran optoelektronski oscilator

Zelo pomembna motivacija pri omrežjih z večjim številom majhnih celic je poenostavitev RRU. Trenutno

imajo RRU električne LO za pretvorbo podatkovnega signala navzgor in navzdol. Da bi se poenostavil RRU, se je predlagala odstranitev LO in uporaba OEO v centralni postaji RAN [38–40]. To prinaša tudi prednost pri enostavnejši stabilizaciji oscilatorja v bolj nadzorovanem okolju v primerjavi z RRU. Poleg tega pri tem ne potrebujemo dodatne naprave za temperaturno stabilizacijo LO v vsakem RRU, kar zmanjša električno porabo omrežja. S predlaganim pristopom namestitve OEO v centralno postajo je torej omogočena boljša možnost temperaturne stabilizacije oscilatorja, kar vodi v zmanjšano frekvenčno lezenje in posledično povečanje stabilnosti omrežja.



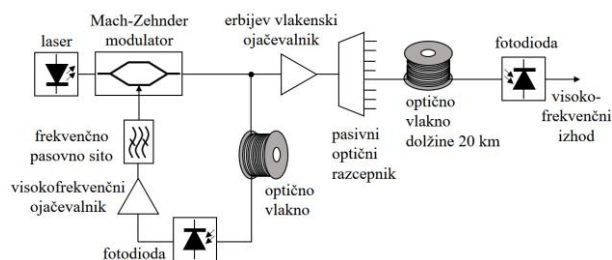
Slika 4: Postavitev OEO za merjenje FSR in SMSR.

Trenutni 4G in prejšnje generacije, 2G in 3G, so imeli slabosti, kot so visoke zakasnitve, nizke bitne zmogljivosti itd. [41], pri naslednji generaciji 5G RAN pa se pričakuje, da bodo uporabljeni signali milimetrskih valov [17]. V področju milimetrskih valov je eden od ključnih izzivov fazni šum [42]. Prisotnost faznega šuma namreč omejuje prenosno zmogljivost radijskega sistema.

Čeprav je OEO po faznem šumu primerna izboljšava, ga zaradi ekonomskih in tehničnih razlogov na žalost ni mogoče neposredno uporabiti kot zamenjavo za električni LO v RRU. Zato je najbolj primerna rešitev, da se OEO uporablja kot generator visokokakovostnega visokofrekvenčnega signala v centralni postaji RAN, od koder se njegov signal distribuira na več RRU prek optičnega distribucijskega omrežja (ODN).

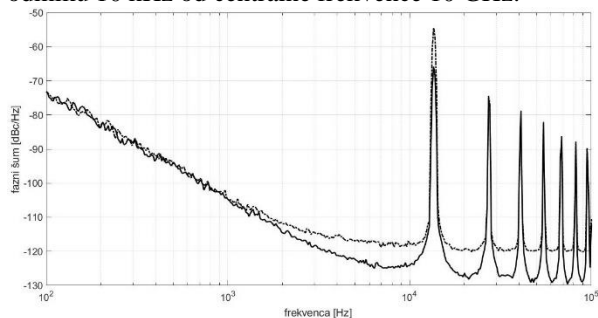
Na žalost ima razdeljevanje visokofrekvenčnega signala iz OEO prek optičnega omrežja omejitve zaradi barvne disperzije [43]. Barvna disperzija je zelo prevladujoča pri frekvencah nad 20 GHz, saj povzroča fazne zasuke v signalu oscilatorja ter s tem velike izgube moči za prenašane signale [39]. V ta namen se že vrsto let izvajajo izčrpne raziskave, s katerimi se proučuje vpliv izgube moči zaradi barvne disperzije [44]. Za

razdeljevanje signala iz OEO prek ODN je predlagan pristop kompenzacije barvne disperzije na valovni dolžini 1550 nm s pomočjo nastavljivega modula za kompenzacijo disperzije v obliki Braggove periodične strukture [45] ali enobočni prenos signala z oscilatorja. V obeh primerih je mogoče popolnoma kompenzirati vpliv disperzije pri različnih dolžinah vej optičnega distribucijskega omrežja po pasivnem optičnem razcepniku, kot prikazuje slika 5.



Slika 5: Distribucija signala iz OEO prek pasivnega optičnega razcepnika v optičnem distribucijskem omrežju.

Najpomembnejši parameter pri smiselnosti uvedbe centraliziranega OEO je dodani fazni šum, ko se signal prenaša iz centralne postaje v RRU. Eksperimentalna verifikacija, ki jo prikazuje slika 5, omogoča meritev faznega šuma signala v RAN. To je izvedeno tako, da je enozančni OEO nameščen v centralni postaji RAN, signal iz njega pa se prek pasivnega optičnega omrežja prenese v RRU. Iz meritev faznega šuma signala iz OEO in signala, ki ga prejme RRU, se izmeri in nato primerja parameter poslabšanja faznega šuma pri različno dolgih vlaknih [46]. Meritve degradacije čistosti signala iz OEO, ki jih prikazuje slika 6, pri distribuciji skozi 20 km optičnega enorodovnega vlakna, ki je v pasivni infrastrukturi, in s predhodnim 20 dB ojačenjem z EDFA privede do poslabšanja faznega šuma za 4 dB na frekvenčnem odmiku 1 kHz in 6 dB pri frekvenčnem odmiku 10 kHz od centralne frekvence 10 GHz.



Slika 6: Primerjava faznega šuma oscilatorjevega signala v centralni postaji (polna črta) in v RRU (prekinjena črta).

5 ZAKLJUČEK

V članku je predlagana možnost za vključitev OEO v RAN visokozmogljive prihajajoče pete generacije (5G) in bodoče šeste generacije (6G) mobilnih omrežij. V nasprotju s trenutno rešitvijo, kjer ima vsak RRU svoj

električni LO za frekvenčno pretvorbo podatkovnega signala, je v tem članku predlagana uvedba centraliziranega OEO, pri katerem fazni šum ne narašča linearno s povečevanjem frekvence oscilatorja, kar bistveno olajša uvajanje novih generacij, ki delujejo na višjih frekvencah v primerjavi z uporabljenimi frekvenčnimi področji trenutnih mobilnih omrežij. S predlaganim centraliziranim OEO se poenostavijo RRU-ji, saj posamezni RRU ne potrebuje več LO. Signal centraliziranega OEO je razdeljen v posamezne RRU prek distribucijske pasivne optične infrastrukture z drevesno topologijo. Poleg tega je s tovrstno sistemsko rešitvijo OEO umeščen v centralno postajo, kjer je lažje nadzorovati okoljske spremembe, ki vplivajo na njegove lastnosti delovanja.

Izzivi umeščanja OEO v centralno postajo RAN naslednje generacije so premoščeni s nastavljivimi kompenzatorji disperzije, ki je pri prenosu visokofrekvenčnih signalov prek optičnega vlakna izrazito omejujoč dejavnik. Predlagani sistemski načrt je podkrepjen z meritvami degradacije čistosti signala z OEO pri distribuciji skozi pasivno infrastrukturo in s predhodnim ojačenjem. Pri 20-kilometrnem prenosu po enorodovnem vlaknu in 20 dB ojačenju z EDFA pride do poslabšanja faznega šuma za 4 dB na frekvenčnem odmiku 1 kHz in 6 dB pri frekvenčnem odmiku 10 kHz od centralne frekvence 10 GHz.

ZAHVALA

Delo je bilo opravljeno v okviru raziskovalnega programa ARRS (št. P2-0246) in FiWiN5G – Innovative Training Network, ki ga je financiral evropski okvirni program Obzorje 2020 Research and Innovation Programme 2014–2018 pod okriljem Marie Skłodowska-Curie Action (št. pogodbe 642355).

LITERATURA

- [1] "IMT traffic estimates for the years 2020 to 2030," ITU, Geneva, Switzerland, Rep. M.2370-0, Jul. 2015. [Online]. Dostopno na: http://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2370-2015-PDF-E.pdf (dostopano 1. 6. 2021).
- [2] T. Mlinar, B. Batagelj "Prihodnost, načrtovanje in razvoj brezžičnih širokopasovnih omrežij", *Elektrotehniški vestnik*, 80(4), str. 165–170, 2013, <http://ev.fe.uni-lj.si/4-2013/Mlinar.pdf>.
- [3] <http://5gobservatory.eu>
- [4] A. V. Lopez, A. Chervyakov, G. Chance, S. Verma and Y. Tang, "Opportunities and Challenges of mmWave NR", *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 2, pp. 4–6, april 2019, doi: 10.1109/MWC.2019.8700132.
- [5] J. Ratkoceri, B. Batagelj, I. Humar Iztok "Upgrade of a hybrid fiber/coax broadband access based on a techno-economic analysis and prediction of the traffic growth", *Elektrotehniški vestnik*, 85(3), str. 95–102, 2018, <http://ev.fe.uni-lj.si/3-2018/Ratkoceri.pdf>.
- [6] B. Batagelj, L. Pavlovič, L. Naglič, S. Tomažič "Convergence of fixed and mobile networks by radio over fibre technology", *Informacije MIDE M*, 41(2), str. 144–149, 2011.
- [7] B. Batagelj, J. Capmany, E. G. Udvary "5th-Generation Mobile Access Networks Assisted by Integrated Microwave Photonics", 2019 International Workshop on Fiber Optics in Access Networks (FOAN), 2019, str. 1–6, doi: 10.1109/FOAN.2019.8933807.
- [8] M. Vidmar "Optical-fibre communications: Components and Systems," *Inform. MIDE M*, 31(4), str. 246–251, 2001.

- [9] Nathan J. Gomes, Maria Morant, Arokiaswami Alphones, Béatrice Cabon, John E. Mitchell, Christophe Lethien, Mark Csörnyei, Andreas Stöhr, Stavros Iezekiel "Radio-over-fiber transport for the support of wireless broadband services [Invited]", *J. Opt. Netw.* 8, 156–178 (2009).
- [10] A. M. Zin, M. S. Bongsu, S. M. Idrus and N. Zulkifli, "An overview of radio-over-fiber network technology," *International Conference On Photonics 2010*, Langkawi, 2010, pp. 1–3, DOI: 10.1109/ICP.2010.5604429.
- [11] S. Sadjina, R. S. Kanumalli, A. Gebhard, K. Dufrière, M. Huemer and H. Pretl "A Mixed-Signal Circuit Technique for Cancellation of Interferers Modulated by LO Phase-Noise in 4G/5G CA Transceivers", *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 65(11), str. 3745–3755, 2018, DOI: 10.1109/TCSI.2018.2861460
- [12] Marc Stackler, "High Speed Data Converters Enable Flexible RF Sampling Architectures", *Microwave Journal*, marec 13, 2019, <https://www.microwavejournal.com/articles/31909>
- [13] S. Dixit and H. Katiyar, "Performance of OFDM in Time Selective Multipath Fading Channel in 4G Systems", 2015 Fifth International Conference on Communication Systems and Network Technologies, Gwalior, 2015, str. 421–424, DOI: 10.1109/CSNT.2015.107
- [14] S. Andersson, L. Sundström and S. Mattisson, "Design considerations for 5G mm-wave receivers," 2017 Fifth International Workshop on Cloud Technologies and Energy Efficiency in Mobile Communication Networks (CLEEN), Turin, 2017, pp. 1–5, DOI: 10.23919/CLEEN.2017.8045912.
- [15] Atilla Hilt. "Availability and Fade Margin Calculations for 5G Microwave and Millimetre-Wave Anyhaul Links," in *Appl. Sci.* 2019, 9, 5240, DOI: 10.3390/app9235240
- [16] P. K. Agyapong, M. Iwamura, D. Staehle, W. Kiess and A. Benjebbour, "Design considerations for a 5G network architecture," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 11, pp. 65–75, Nov. 2014, DOI: 10.1109/MCOM.2014.6957145
- [17] R. Chakraborty, N. Kumari, M. Mousam, and A. Mukherjee, "The Future of 5G and Millimetre Waves," 2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), Coimbatore, pp. 1679–1683, 2018, DOI: 10.1109/ICECA.2018.8474584.
- [18] Jonathan Rodriguez, "Small Cells for 5G Mobile Networks," in *Fundamentals of 5G Mobile Networks*, Wiley, 2014, pp.63–104, DOI: 10.1002/9781118867464.ch3
- [19] Ali Zaidi, Fredrik Athley, Jonas Medbo, Ulf Gustavsson, Giuseppe Durisi, Xiaoming Chen, "Chapter 4 - Mathematical Modeling of Hardware Impairments," in *5G Physical Layer, Principles, Models and Technology Components*, Academic Press, 2018, Pages 87–118.
- [20] B. Romeira et al, "Microwave Photonics Oscillators for Femtocellular Access Networks" 15th Conference on Networks and Optical Communications, Faro, Portugal, June 2010.
- [21] A. G. Correa-Mena et al., "Generation and distribution of microwave signals by using optoelectronic oscillators," *IEEE 58th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, Fort Collins, CO, 2015, pp. 1–3, DOI: 10.1109/MWSCAS.2015.7282073.
- [22] T. Marozsak et al., "A new optical distribution approach for millimetre wave radio," *International Topical Meeting on Microwave Photonics. Technical Digest (including High Speed Photonics Components Workshop)* (Cat. No.98EX181), Princeton, NJ, USA, 1998, pp. 63–66, DOI: 10.1109/MWP.1998.745501
- [23] Tayyab Mehmood, and Salman Ghafoor, "Millimeter-wave signal generation and transmission to multiple radio access units by employing nonlinearity of the optical link," in *International Journal of Communication Systems*, vol.32, no.1, 2019, pp.1–11, DOI: 10.1002/dac.3830.
- [24] X. S. Yao and L. Maleki, "High frequency optical subcarrier generator," in *Electronics Letters*, vol. 30, no. 18, pp. 1525–1526, 1 Sept. 1994, DOI: 10.1049/el:19941033
- [25] L. Maleki, "The optoelectronic oscillator," in *Nature Photon*, vol. 5, pp. 728–730, 2011, DOI: 10.1038/nphoton.2011.293.
- [26] R. T. Logan, L. Maleki and M. Shadaram, "Stabilization of oscillator phase using a fibre-optic delay-line," *Proceedings of the 45th Annual Symposium on Frequency Control 1991*, Los Angeles, CA, USA, 1991, pp. 508–512, DOI: 10.1109/FREQ.1991.145943.
- [27] L. Maleki, "The opto-electronic oscillator (OEO): Review and recent progress", 2012 European Frequency and Time Forum, Gothenburg, 2012, pp. 497–500, DOI: 10.1109/EFTF.2012.6502432.
- [28] Mehmet Alp Ilgaz, Boštjan Batagelj "Opto-electronic oscillators for micro- and millimeter wave signal generation", *Electronics*, Apr.-1 2021, no. 7, 857, str. 1–19, ISSN 2079–9292. <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/7/857>
- [29] B. Batagelj, L. Bogataj and M. Vidmar, "Key properties and design issues for an opto-electronic oscillator," 2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Budapest, 2015, pp. 1–4, DOI: 10.1109/ICTON.2015.7193351.
- [30] M. Vidmar "Extending Leeson's Equation," *Inform. MIDEM*, 51(2), str. 135–146, 2021.
- [31] D. Eliyahu, D. Seidel and L. Maleki, "Phase noise of a high performance OEO and an ultra low noise floor cross-correlation microwave photonic homodyne system," 2008 IEEE International Frequency Control Symposium, Honolulu, HI, 2008, pp. 811–814, DOI: 10.1109/FREQ.2008.4623111
- [32] M. A. Ilgaz, L. Bogataj, B. Batagelj and M. Vidmar, "Electronic stabilization methods for a singleloop opto-electronic oscillator," 2016 46th European Microwave Conference (EuMC), London, 2016, pp. 1393–1396, DOI: 10.1109/EuMC.2016.7824613.
- [33] T. Hao et al., "Toward Monolithic Integration of OEOs: From Systems to Chips," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 19, pp. 4565–4582, Oct. 2018, DOI: 10.1109/JLT.2018.2825246
- [34] S. Romisch, J. Kitching, E. Ferre-Pikal, L. Hollberg and R. L. Walls, "Performance evaluation of optoelectronic oscillators," *Proceedings of the 1999 Joint Meeting of the European Frequency and Time Forum and the IEEE International Frequency Control Symposium* (Cat. No.99CH36313), Besancon, France, 1999, vol. 2, pp. 561–564, DOI: 10.1109/FREQ.1999.841367.
- [35] D. Eliyahu, K. Sariri, M. Kamran and M. Tokhmakhian, "Improving short and long term frequency stability of the optoelectronic oscillator," in *Proc. IEEE Int. Freq. Control Symp./PDA Exhib.*, New Orleans, USA, 2002, pp. 580–583, DOI: 10.1109/FREQ.2002.1075948.
- [36] O. Okusaga et al., "Spurious-mode suppression in optoelectronic oscillators," 2010 IEEE International Frequency Control Symposium, Newport Beach, CA, 2010, pp. 539–543, DOI: 10.1109/FREQ.2010.5556272.
- [37] Mehmet Alp Ilgaz, Andrej Lavrič, Temitope Odedeyi, Izzat Darwazeh, Boštjan Batagelj. Adjustable testing setup for a single-loop optoelectronic oscillator with an electrical bandpass filter. *Turkish journal of electrical engineering and computer sciences*, 28(3), str. 1293–1302, 2020, DOI: 10.3906/elk-1907-186, <http://journals.tubitak.gov.tr/elektrik/issues/elk-20-28-3/elk-28-3-7-1907-186.pdf>
- [38] M. A. Ilgaz, B. Batagelj, "Preliminary idea for a converged fixed and mobile network infrastructure with 5G using Radio-over-Fibre technology and an Opto-Electronic Oscillator in the millimetre-wave range," *Proc. ICTON 2016*, str. 1–4, Trento, Italija, julij 2016, paper Tu.P.5. DOI: 10.1109/ICTON.2016.7550476
- [39] M. A. Ilgaz, B. Batagelj "Proposal for the distribution of a low-phase-noise oscillator signal in the forthcoming fifth-generation mobile network by radio-over-fibre technology," in *ELMAR 2016*, pp.13–16, Zadar, Hrvaška, september 2016. DOI: 10.1109/ELMAR.2016.7731744.
- [40] T. Mlinar, B. Batagelj, and M. A. Ilgaz, "Prenos fazno stabilnega nizkošumnega oscilatorjevega signala v mobilnih omrežjih 5G s tehniko prenosa radijskih signalov po optičnem vlaknu," in *ERK 2016*, str. 65–68, Portorož, Slovenija, september 2016.
- [41] W. Hong, K. Baek, Y. Lee, Y. Kim and S. Ko, "Study and prototyping of practically large-scale mmWave antenna systems for 5G cellular devices," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 9, pp. 63–69, September 2014, DOI: 10.1109/MCOM.2014.6894454.

- [42] D. R. Bolton, D. A. Robertson and G. M. Smith, "Phase noise of sources for multiplication to mmwave frequencies," 2005 Joint 30th International Conference on Infrared and Millimetre Waves and 13th International Conference on Terahertz Electronics, Williamsburg, VA, USA, 2005, pp. 74–75 vol. 1, DOI: 10.1109/ICIMW.2005.1572413.
- [43] M. A. Ilgaz, E. Udvary, B. Batagelj, "Influence of Fibre Chromatic Dispersion on the Performance of Analogue Optical Links for an Opto-electronic Oscillator within a 5G Network Structure," ERK 2016, str. 69–72, Portorož, Slovenija, september 2016.
- [44] Kasthuri Palanichamy, Prakash Poornachari, Ganesh Madhan M. "Performance Analysis of Dispersion Compensation Schemes with Delay Line Filter", *Informacije MIDEEM*, Vol. 50, No. 4 (2020), str. 285–292, DOI: <https://doi.org/10.33180/InfMIDEEM2020.406>
- [45] M. A. Ilgaz, K.V. Baliz, and B. Batagelj, "A Flexible Approach to Combating Chromatic Dispersion in a Centralized 5G Network," in *Opto-Electronics Review*, vol. 28, no. 1, pp.35–42 DOI: 10.24425/opelre.2020.132498
- [46] M. A. Ilgaz, A. Lavrič, B. Batagelj. Phase-noise degradation of an optically distributed local oscillator in a radio access network. *Radioengineering*, 30(1), str. 10–15, april 2021, DOI: 10.13164/re.2021.0010. https://www.radioeng.cz/fulltexts/2021/21_01_0010_0015.pdf

Mehmet Alp Ilgaz se je rodil 17. junija 1989 v Konaku v Turčiji. Po končani srednji šoli je šolanje nadaljeval na univerzi Yeditepe University v Istanbulu in leta 2012 diplomiral. Drugostopenjski magistrski študij je nadaljeval na univerzi Alma Mater Studiorum Universita di Bologna in ga leta 2015 zaključil. V študijskem letu 2016/17 se je vpisal na doktorski študijski program Elektrotehnika na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani in doktoriral leta 2020. Zaposlen je kot raziskovalec na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo reševanje elektromagnetnih problemov s pomočjo simulacij, pri čemer je velik del raziskovanja do zdaj usmerjal v načrtovanje in uporabo optoelektronskega oscilatorja kot visokokvantitetnega generatorja mikrovalovnih frekvenc na področju telekomunikacij. V sklopu doktorske naloge je za namene mobilnih omrežij pete in nadaljnjih generacij predlagal uporabo optoelektronskega oscilatorja v radijskem dostopnem omrežju, kjer se inovativno združuje kakovostni oscilator s tehniko razdeljevanja njegovega signala do baznih postaj po optičnem omrežju.

Boštjan Batagelj je leta 2003 doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer je trenutno izredni profesor na Katedri za informacijske in komunikacijske tehnologije. Poučuje strokovne predmete Satelitske komunikacije in navigacija, Tehnološke osnove multimedije, Optične komunikacije in Radijske komunikacije. Raziskovalno delo opravlja v Laboratoriju za sevanje in optiko, kjer se ukvarja s fizičnim nivojem prenosnih in dostopovnih telekomunikacijskih omrežij, zasnovanih na radijski in optični tehnologiji. Je avtor več kot 300 člankov, izumitelj pri desetih patentih in soustanovitelj dveh zagonskih podjetij, sodeluje pa tudi pri domačih in mednarodnih raziskovalnih projektih s področja radijskih in optičnih tehnologij.