

Prenos fazno stabilnega nizkošumnega oscilatorjevega signala v mobilnih omrežij 5G s tehniko prenosa radijskih signalov po optičnem vlaknu

Tomi Mlinar, Boštjan Batagelj, Mehmet Alp Ilgaz

Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana

E-pošta: tomi.mlinar@fe.uni-lj.si

Distribution of a low-phase-noise oscillator signal in the 5G mobile network by radio-over-fibre technology

Abstract - This paper presents a solution that needs only one low-phase-noise oscillator for many fifth-generation (5G) cellular network base-stations. The proposed approach can provide a solution that is especially suitable for high-capacity radio system based on millimeter-wave frequency bands, where the phase noise is one of the main limiting parameters. The stable and low-phase-noise signal can be generated by an advanced opto-electronic oscillator (OEO) and distributed to remote antenna units over a passive optical network (PON) by radio-over-fibre (RoF) technology. Besides the cost effectiveness, this solution can decrease the size and complexity of base-stations, the number of which will increase in 5G cellular networks due to a reduction in the cell size. This paper also presents the key building block for such a RoF system - highly-stable OEO.

1 Uvod

Od širokopasovnega mobilnega omrežja pete generacije (5G) se pričakuje, da bo moralo obdelati izjemno velike količine podatkovnega prometa v kratkem času in z zelo majhnimi zakasnitvami (pod 1 ms) [1]. Za zagotavljanje širokopasovnosti so primerna predvsem višja frekvenčna območja med 30 in 300 GHz [2]. Ker je na visokih frekvencah milimetrskih valov slabljenje signala in sipanje na vremenskih pojavih (dež, sneg, megla) zelo visoko, je razširjanje signala omejeno na relativno kratke razdalje – nekaj 100 metrov (piko celice) ali celo nekaj 10 metrov (femto celice).

V primerjavi s prejšnjimi generacijami mobilnih komunikacij (3G in 4G), ko se število baznih postaj ni bistveno povečalo [3], se v 5G pričakuje njihov znaten porast. Čeprav lahko že z danes znanimi tehnologijami naredijo fizično manjše bazne postaje, je težko zadostiti nekaterim kriterijem, ki se zahtevajo od prihodnje generacije baznih postaj, tj. znižanje energetske porabe, manjša kompleksnost in nižja cena.

Za učinkovito rabo frekvenčnega spektra in povečanje zmogljivosti brezžičnega omrežja se vpeljujejo nove modulacijske in združevalne tehnike [4], [5]. V vseh naštetih primerih je jasno, da igra pomembno vlogo pri razširjanju signala fazni šum [6].

Danes uporabljeni oddajniki in sprejemniki mobilnih sistemov imajo vgrajene nizkošumne oscilatorje za generiranje radijskih signalov, ki so potrebni za frekvenčno pretvorbo v sprejemno-oddajnih krogih in za njihovo časovno sinhronizacijo.

Ko želimo uporabljati radijske vmesnike v območjih višjih frekvenc [7], je vzdrževanje nizkega faznega šuma veliko težje, kot je to pri nižjih frekvencah [8], ker je v fizikalni naravi današnjih oscilatorjev, da se fazni šum poveča, če deluje oscilator na višjih frekvencah. Po našem mnenju je nizko šumni frekvenčni oscilator kritičen element za razvoj mobilnih omrežij 5G na višjih frekvencah milimetrskih valov, saj bo le tako mogoče ohraniti spektralno učinkovitost, ki jo poznamo na nižjih frekvencah.

Kot je opisano v tem prispevku, je ena od možnosti za znižanje stroškov in hkrati povečanje učinkovitosti omrežja v vpeljavi distribuiranih omrežnih elementov.

2 Osnove tehnologije prenosa radijskih signalov po optičnem vlaknu

Zveza po optičnem vlaknu je precej boljše od radijske zveze v smislu parametrov, ki opisujejo kakovost telekomunikacijske zveze [9]. Prvi parameter je *doseg zveze*, kjer prevladuje optično vlakno s slabljenjem 0,2 dB na kilometer zveze. Splošno znano je, da je pri radijski zvezi slabljenje signala na kilometer precej večje in se še povečuje z uporabljenimi frekvenco. Drugi parameter je *zmogljivost zveze*, ki se meri v količini prenesene informacije v časovni enoti. Pri optičnem vlaknu skoraj nimamo omejitev pri pasovni širini, čeprav se počasi le približujemo 'optičnemu zidu' [10].

Osnovna ideja tehnologije, ki omogoča prenos radijskih signalov po optičnem vlaknu (Radio-over Fibre – RoF) je v tem, da se za prenos signalov radijskih frekvenc (RF) uporabljajo optična vlakna, saj s tem izkoristimo njihovo nizko slabljenje in veliko pasovno širino [11]. Analogni RoF-prenos je tudi bolj učinkovit v primerjavi s sedanji tehniki digitalnega prenosa saj ne zahteva dodatne nepotrebne režije, kar pomeni, da nismo deležni zmanjšanja pasovne širine in povečanja zakasnitev. Ker ima optično vlakno veliko pasovno širino, z lahkoto omogoča prenos radijskih signalov različnih valovnih dolžin. Obstaja več načinov za prenos RF-signalov s tehnologijo RoF [11]. Najpreprostejši način za optičen prenos radijskega signala je z direktno modulacijo jakosti svetlobe laserske diode (LD) z RF-

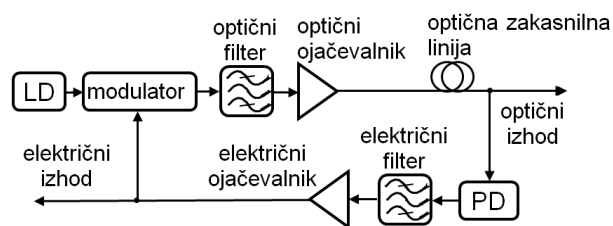
signalom in uporabo direktne detekcije (DD) na fotiodi (PD) za sprejem (demodulacijo) RF-signalov. Za prenos signalov višjih frekvenc, kot so npr. signali milimetrskih valov, pa intenziteta modulacija (IM) zaradi svoje omejene pasovne širine ni mogoča z direktno modulacijo toka LD. Na višjih frekvencah lahko intenziteta modulacijo izvedemo z zunanjim modulatorjem, ko deluje LD v CW-načinu. Kot zunanji modulator svetlobne jakosti se lahko uporabi elektroabsorpcijski modulator ali Mach-Zehnder modulator (MZM) [12]. Potem ko je izvedena intenziteta modulacija z RF-signalom, se signal prenese po optičnem vlaknu. Na drugem koncu optičnega vlakna se dogaja optoelektronska pretvorba, pri čemer PD sprejme optični signal in z metodo DD izloči RF-signal.

3 Optoelektronski oscilator

Visokozmogljiv oscilator z veliko spektralno čistostjo je ključni element vsakega brezžičnega komunikacijskega sistema. Za generiranje vseh vrst signalov radijskih frekvenc se uporabljajo različni načini: kvarčni oscilatorji, dielektrični resonatorji, safirni resonatorji ali zračno-dielektrični oscilatorji. Slabost teh načinov je v tem, da se fazni šum oscilatorja povečuje z višanjem frekvence.

Naprava, ki ni podrejena zgoraj opisanemu zakonu fizike, je optoelektronski oscilator (OEO), ki obstaja od zgodnjih devetdesetih let prejšnjega stoletja [13]. Od takrat se lastnosti OEO stalno izboljšujejo [14], [15], [16], [17].

Skica enozančnega OEO je prikazana na sliki 1. Najpomembnejša komponenta OEO je maloizgubno optično vlakno, ki deluje kot zelo dolga zakasnilna linija. Največja prednost OEO je faktor kakovosti resonatorja Q , ki je sorazmeren produktu časovne zakasnitve optičnega vlakna in frekvence oscilatorja. Ker izgube optičnega vlakna določa valovna dolžina uporabljene laserske diode (LD), so te teoretično enake pri signalu katere koli radijske frekvence. To posledično pomeni, da se resonatorjeva kvaliteta (Q) poveča, če se poveča frekvenca oscilatorja. Ali z drugimi besedami, če se poveča dolžina optične zveze, se bo zmanjšal fazni šum OEO [14]. To je teoretično ozadje, zakaj se z večanjem frekvence signala optoelektronskemu oscilatorju ne veča fazni šum.



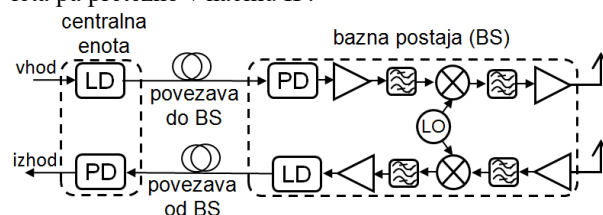
Slika 1. Optične, električne in optoelektrične komponente optoelektronskega oscilatorja (OEO) z eno zanko.

Enozančni OEO sestavljata optični in električni del. Vsak od njiju ima ločen signalni izhod – optični in električni. Po našem predlogu za prenos nizkošumnega signala oscilatorja bi uporabili optični izhod in signal preko optičnega vlakna prenesli do bazne postaje. Tu ga ponovno pretvorimo v električni signal.

4 Sistemski pristop

Danes je veliko baznih postaj vseh generacij povezanih s centralno krmilno enoto po optičnem vlaknu – tako omogočajo širokopasovno povezavo mobilnim uporabnikom. Informacijski signal se na večje razdalje iz centralne enote do bazne postaje običajno pošilja po optičnem vlaknu, na krajše razdalje – znotraj celice – pa brezžično. V bazni postaji se izvede pretvorba iz optičnega v RF-signal.

Splošni princip, ki se uporablja že vrsto let v mobilnih omrežjih vseh generacij, je prikazan na sliki 2. Kot učinkovit nadomestek koaksialnega kabla ali bakrenih parov se uporablja optično vlakno. Prenos signalov po optičnem vlaknu (preko LD in PD) je včasih potekal v načinih PDH, SDH ali ATM, zadnja leta pa pretežno v načinu IP.



Slika 2. Prenos signala po optičnem vlaknu v osnovnem pasu in obdelavo signala na strani bazne postaje.

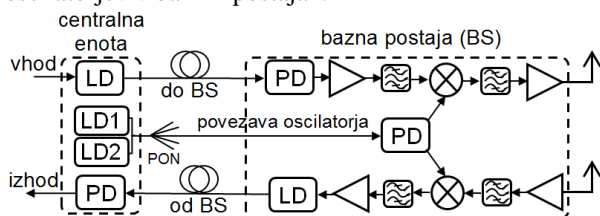
Pretvorba iz žičnega v brezžični signal se mora izvesti na vsaki bazni postaji. Na oddajni strani bazne postaje imamo mešalnik frekvence in referenčni nizkošumni lokalni oscilator (LO), ki pretvorita signal iz osnovnega pasu v moduliran nosilni signal, ki je primeren za prenos po brezžičnem kanalu. Podobna operacija se zgodi na sprejemni strani bazne postaje, ko z mešalnikom frekvence in nizkošumnim LO pretvorimo sprejeti visokofrekvenčni signal.

Če se za sprejem in oddajo signalov uporabljata ločeni frekvenci, je bazna postaja opremljena z dvema ločenima antenama. Seveda pa je mogoče uporabiti tudi eno samo anteno za sprejem in oddajo, če naredimo izhod sprejemnika povsem odbojen za signale, ko ta ne deluje [18] ali pa uporabimo magnetni cirkulator ali integrirani cirkulator [19], ki usmerja signale iz oddajnika v anteno in iz antene v sprejemnik. Ta rešitev je manj uporabna za dupleksne komunikacije, ker lahko del oddajnega signala seva v sprejemnik, če ni antena povsem impedančno prilagojena. Ker je moč oddajnega signala precej večja od moči sprejetega, lahko že relativno šibek oddajni signal na sprejemniku povsem prekrije sprejeti signal – za omilitev tega vpliva uporabljamo dušilno vezje [19].

Visokozmogljiva širokopasovna brezžična omrežja, ki temeljijo na ortogonalnem frekvenčno porzdeljenem

multipleksiranju (OFDM) ali novejša, ki temeljijo na ne-OFDM [5], zahtevajo vir RF-signala z zelo nizkim faznim šumom in visoko stabilnostjo. To pa zahteva temperaturno nadzorovano okolje bazne postaje. Dovolj natančen stabiliziran kristalni oscilator precej poveča kompleksnost bazne postaje in je zelo draga rešitev. Ker se v 5G pričakuje povečano število baznih postaj, bodo postala mobilna omrežja neekonomična, če bodo bazne postaje še naprej izdelane z današnjo tehnologijo. Zato predlagamo novo tehnologijo, ki lahko reši ta izziv s tem, da precizni oscilator premakne iz bazne postaje v centralno enoto, ki ima nadzorovano okolje.

Ena od možnih rešitev za izvedbo tovrstnega premika je generiranje mikrovalovnih signalov z optičnim heterodinskim mešalnikom [20] – LD se nahajata v centralni enoti, svetloba, ki jo oddajata pa se prenaša po optičnem vlaknu do bazne postaje. V bazni postaji se optična signala dveh različnih valovnih dolžin združita na PD, ki se nahaja v bazni postaji (slika 3). Generiranje RF-signala z optičnim mešalnikom odpravi potrebo po kakršni koli frekvenčni stabilizaciji lokalnih oscilatorjev v baznih postajah.



Slika 3. Prenos dveh optičnih signalov iz centralne postaje in optično mešanje za generiranje mikrovalovnega signala ali signala milimetrskih valov na PD v bazni postaji.

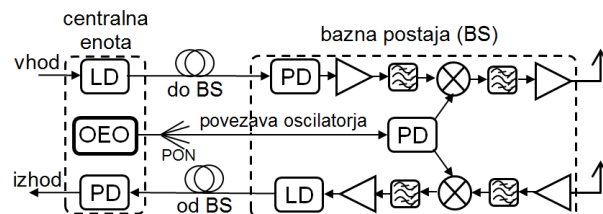
V tem prispevku predlagamo namesto dveh LD v centralni enoti uporabo nizkošumnega OEO. Slika 4 prikazuje primer integracije enozančnega OEO v sistem RoF – tako močno poenostavimo in pocenimo izvedbo bazne postaje. Nizkošumni signal iz optičnega izhoda OEO se prenaša iz centralne enote do bazne postaje po ločenem enorodovnem optičnem vlaknu. Nadalje predlagamo uporabo le enega OEO v centralni enoti in distribucijo njegovega signala do več baznih postaj s tehnologijo RoF preko pasivnega optičnega omrežja (PON). Če se nizkošumni signal oscilatorja prenaša od centralne enote po pasivnem optičnem omrežju, se močno zniža potrebno število oscilatorjev v omrežju. Prepričani smo, da bi v omrežju z veliko baznimi postajami in eno centralno enoto, opisan način prenosa RoF pomenil velik finančni prihranek.

Na oddaljeni bazni postaji zazna PD optični signal in generira RF-signal, primeren za frekvenčno pretvorbo podatkovnega signala v mešalniku. Če želimo dobiti RF-signal s foto detekcijo, potrebuje PD dovolj pasovne širine za ustrezno frekvenčno območje.

Rešitev, ki uporablja ločene optične linije za prenos podatkovnih signalov in signalov za mešanje, prikazuje slika 4. Seveda lahko signale iz vseh treh optičnih linij tudi združimo v eno optično vlakno, z uporabo tehnologije valovnega multipleksiranja (WDM).

Opozoriti je treba, da obstajajo tudi določene slabosti pri prenašanju oscilatorjevega signala iz centralne enote. Prva je ta, da je optični signal, ki nosi

oscilatorjev signal na izhodu iz OEO intenzitetno moduliran – znano je, da je amplitudna modulacija zelo občutljiva na barvno disperzijo optičnega vlakna, ki se seštevata z njegovo dolžino [22]. Ker se modulirani optični signal prenaša po optičnem vlaknu, povzroča barvna disperzija različne fazne premike na vsaki spektralni komponenti (nosilnem signalu in obeh stranskih komponentah).



Slika 4. Prenos nizkošumnega signala oscilatorja s tehniko RoF po optičnem vlaknu in optična detekcija na bazni postaji.

Fazni premik vsake spektralne komponente je odvisen od dolžine optičnega vlakna, oscilatorjeve frekvence in disperzijskega koeficienta. Posledično je jakost detektiranega signala odvisna od dolžine [21]. V primerih, ko je fazna zakasnitev med stranskimi komponentami na koncu optične linije 180° , bo destruktivno mešanje na PD negiralo celoten signal oscilatorja.

Kot kaže je prenašanje oscilatorjevega signala z intenzitetno moduliranim optičnim signalom uporabno le za frekvence do 10 GHz. Za višje oscilatorjeve frekvence lahko omejujoč pojav disperzije zmanjšamo z uporabo OEO, kjer se uporabi modulacija stranske komponente [23] z optičnim sitom ali posebno nadzirano MZM.

Poleg barvne disperzije lahko povzroči degradacijo prenesenega oscilatorjevega signala tudi polarizacijska disperzija (PMD) optičnega vlakna. To lahko zmanjšamo za uporabo optičnega vlakna z nizko polarizacijsko disperzijo.

Ne nazadnje moramo biti pri prenosu signala pozorni tudi na Rayleighovo sipanje optičnega vlakna in njegov prispevek k faznemu šumu [24].

5 Sklep

S povečevanjem zahtev po zmogljivosti omrežij pete generacije se povečujejo prednosti uporabe višjih frekvenčnih pasov (30 do 300 GHz) in majhnih celic. Ker želimo imeti tudi v bodočih sistemih 5G visoko spektralno učinkovitost, se tudi pri višjih frekvencah zahteva oscilatorje z visoko stabilnostjo in nizkim faznim šumom.

V tem prispevku smo predstavili tehnologijo prenosa radijskih signalov po optičnem vlaknu (RoF), ki je zelo primerna za prenos RF-signala iz stabilnega nizkošumnega optoelektronskega oscilatorja (OEO).

Ta prispevek skuša združiti ti dve tehnologiji tako, da prikaže način znižanja stroškov mobilnega komunikacijskega sistema z distribucijo oscilatorjevega signala iz enega OEO do mnogo baznih postaj. Pri tem se uporabi tehnika RoF. Za prenos oscilatorjevega signala predlagamo pasivno optično omrežje z drevesno topologijo.

Pomemben del tega prispevka je tudi omemba nekaterih pojavov, ki lahko vplivajo na prenos oscilatorjevega signala do bazne postaje. Omenili smo verjetne slabosti, kot so barvna disperzija, polarizacijska disperzija (PMD) in sipanje, ki se jim bomo posvetili v nadaljnjih raziskavah. Sistem IM-DD RoF je dovozen za barvno disperzijo optičnega vlakna, kar vpliva na oslabitev RF-moči z večanjem dolžine vlakna in frekvence. V prihodnjih raziskavah bomo raziskali lastnosti sistema z distribucijo oscilatorjevega signala z OEO in eksperimentalno ovrednotili omejitve takšnega sistema. Prav tako se bomo posvetili prenosu večfrekvenčnih signalov s tehnologijo RoF. Načrtujemo še raziskave novih tehnik stabilizacije referenčnega signala v kombinaciji s potlačitvijo stranskih komponent za OEO.

Ta prispevek opisuje rešitev, ki potrebuje le en nizkošumni oscilator za več baznih postaj mobilnega omrežja. Predlagana rešitev je še posebej primerna za širokopasovna omrežja pete generacije, ki bodo delovala na visokih frekvencah milimetrskih valov (nad 30 GHz), kjer je fazni šum močno omejujoč parameter. Z naprednim optoelektronskim oscilatorjem (OEO) lahko generiramo zelo stabilen signal z majhnim faznim šumom in ga distribuiramo do oddaljenih oddajnih anten s tehnologijo prenosa radijskih signalov preko optičnega vlakna (RoF). Predlagana rešitev pomembno zniža stroške izvedbe, poleg tega pa se zmanjša tudi kompleksnost in velikost baznih postaj 5G, katerih število naj bi pomembno naraslo. Ta prispevek prikazuje tudi ključne elemente prenosnega sistema RoF, katerih bistveni del je zelo stabilen OEO.

Zahvala

Avtorji prispevka se zahvaljujejo podjetju InLambda BDT, d. o. o., za posojeno raziskovalno opremo. Delo, opisano v tem prispevku, je nastalo v sodelovanju z ARRS – *Algoritmi in optimizacijski postopki v telekomunikacijskih programih in FiWIN5G – Innovative Training Network*, ki je bilo sofinancirano iz sklada Marie Skłodowska-Curie (št. pogodbe 642355) v okviru EU *Horizon 2020 – Research and Innovation Programme 2014–2018*.

Literatura

- [1] P. K. Agyapong, et al.: Design considerations for a 5G network architecture, *IEEE Comm. Mag.*, vol. 52, no. 11, pp. 65-75, Nov. 2014
- [2] W. Hong, K. H. Baek, Y. Lee, Y. Kim, S. T. Ko: Study and prototyping of practically large-scale mmWave antenna systems for 5G cellular devices, *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 9, pp. 63-69, Sept. 2014
- [3] W. Afrić and S. Z. Pilinsky: UMTS LTE downlink cell size calculation, *Proc. ELMAR*, 2012 Zadar, pp. 105-108, 2012
- [4] J. Vihriala, N. Ermolova, E. Lahetkangas, O. Tirkkonen and K. Pajukoski: On the Waveforms for 5G Mobile Broadband Communications, 2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conf., Glasgow, pp. 1-5, 2015
- [5] R. G. Clegg, S. Isam, I. Kanaras and I. Darwazeh: A practical system for improved efficiency in frequency division multiplexed wireless networks, *IET Commun.*, vol. 6, no. 4, pp. 449-457, March 6 2012
- [6] P. Robertson and S. Kaiser: Analysis of the effects of phase-noise in orthogonal frequency division multiplex (OFDM) systems, *IEEE Int. Conf. on Commun. ICC '95*, Seattle, WA, pp. 1652-1657 vol. 3., 1995
- [7] Z. Pi and F. Khan: An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems: *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 6, pp. 101-107, June 2011
- [8] Z. Pi, J. Choi and R. Heath: Millimeter-wave gigabit broadband evolution toward 5G: fixed access and backhaul, *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 4, pp. 138-144, April 2016
- [9] M. Vidmar: Optical-fiber communications: Components and Systems, *Inform. MIDEEM*, vol. 31, no. 4, pp. 246-251, 2001
- [10] B. Batagelj, V. Janyani, S. Tomažič: Research challenges in optical communications towards 2020 and beyond, *Inform. MIDEEM*, vol. 44, no. 3, pp. 177-184, 2014
- [11] Nathan J. Gomes, et al.: Radio over fiber transport for the support of wireless broadband services, *J. Opt. Netw.*, vol. 8, no. 2, pp. 156-178, Feb. 2009
- [12] John E. Mitchell: *Radio-over-Fiber (RoF) Networks in Broadband Access Networks: Technologies and Deployments*, Springer, 2009
- [13] R.T. Logan, L. Maleki, M. Shadaram: Stabilization of oscillator phase using a fiber-optic delay-line, *45th Annu. Symp. on Frequency Control*, pp. 508-512, May 1991
- [14] B. Batagelj, L. Bogataj and M. Vidmar: Key properties and design issues for an opto-electronic oscillator, *ICTON*, pp. 1-4, Budapest, 2015
- [15] L. Bogataj, M. Vidmar and B. Batagelj: A Feedback Control Loop for Frequency Stabilization in an Opto-Electronic Oscillator, *JLT*, vol. 32, no. 20, pp. 3690-3694, Oct. 15, 2014
- [16] L. Bogataj, M. Vidmar and B. Batagelj: Improving the Side-mode Suppression Ratio and Reducing the Frequency Drift in an Opto-Electronic Oscillator With a Feedback Control Loop and Additional Phase Modulation, *JLT*, vol. 34, no. 3, pp. 885-890, Feb., 2016
- [17] L. Bogataj, M. Vidmar and B. Batagelj: Opto-Electronic Oscillator With Quality Multiplier," *IEEE T. Microw. Theory*, vol. 64, no. 2, pp. 663-668, Feb. 2016
- [18] M. Vidmar: Use transmitting power FETs for antenna switching, *Microwaves & RF*, vol. 39, no. 7, pp. 81-86, 2000
- [19] A. Sabharwal, P. Schniter, D. Guo, D. W. Bliss, S. Rangarajan and R. Wichman: In-Band Full-Duplex Wireless Challenges and Opportunities, *IEEE J. Sel. Area. Comm.*, vol. 32, no. 9, pp. 1637-1652, Sept. 2014
- [20] J. Yao: *Microwave Photonics*, *JLT*, vol. 27, no. 3, pp. 314-335, Feb. 1, 2009
- [21] B. Batagelj, et al.: Convergence of fixed and mobile networks by radio over fibre technology, *Inform. MIDEEM*, vol. 41, no. 2, pp. 144-149, June 2011
- [22] H. Schmuck: Comparison of optical millimetre-wave system concepts with regard to chromatic dispersion, *Electron. Lett.*, vol. 31, no. 21, pp. 1848-1849, 12 Oct 1995
- [23] G. H. Smith, D. Novak and Z. Ahmed: Overcoming chromatic-dispersion effects in fiber-wireless systems incorporating external modulators, *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 45, no. 8, pp. 1410-1415, Aug 1997
- [24] James P. Cahill: *Rayleigh-Scattering-Induced Noise in Analog RF-Photonic Links*, PhD Dissertation, 2015