

# Prihodnost, načrtovanje in razvoj brezžičnih širokopasovnih omrežij

**Tomi Mlinar, Boštjan Batagelj**

*Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija  
E-pošta: tomi.mlinar@fe.uni-lj.si*

**Povzetek.** Širokopasovni dostop do interneta in drugih vsebin bi moral biti danes prisoten v vsakem gospodinjstvu, da o širokopasovnem priključku v poslovne namene niti ne izgublamo besed. Da ni povsem tako, kažejo statistični podatki, ki jih o širokopasovnih omrežjih vodi organizacija OECD. Z dokumentom Digitalna agenda za Evropo 2020, ki ga je leta 2010 izdala Evropska unija in s katerim je želela spodbuditi razvoj širokopasovnih omrežij v naslednjih desetih letih, so se postavili temelji in smernice gradnje širokopasovnih omrežij. Glede na trenutno stanje telekomunikacijskih omrežij v EU je nedvomno treba del energije in finančnih sredstev porabiti za razvoj in gradnjo brezžičnih širokopasovnih omrežij, saj s trenutnim tempom gradnje in pričakovanimi finančnimi vložki v optična ali druga žična omrežja ne bomo dosegli zastavljenih ciljev. O brezžičnih tehnologijah, ki že danes omogočajo spodobno hiter širokopasoven dostop in posledično moderne storitve (hiter dostop do interneta, interaktivno televizijo in telefonijo IP), je govor v pričujočem prispevku. Večina opisanih rešitev se že uporablja v Sloveniji ali pa bodo na trgu v kratkem.

**Ključne besede:** širokopasovni dostop, brezžične telekomunikacije, MMDS, DVB-T

## Future Planning and Development of Broadband Wireless Networks

Access to the broadband Internet and other contents should be made available in every household of today along with the broadband connection for business purposes which is equally important. As seen from the OECD statistics, it is not just entirely so. By drawing the Digital Agenda for Europe 2020 issued by the European Union (EU) in 2010, EU wants to promote development of broadband networks over the period of ten years. With this document EU lays down foundations and guidelines for setting up the broadband networks. Given the current state of the telecommunication networks in EU, its member states should put some more energy and financial resources into development and construction of the wireless broadband networks. As the current pace of construction and the scope of the expected financial investments in the optical and other wired networks will not achieve the goals set by EU. Some wireless technologies can provide a decent fast broadband access even today. So that the modern services, e.g. high-speed internet access, interactive TV and IP telephony, can be provided to households and companies for professional use. Most of the technical solutions described in the paper are being used in Slovenia or will be on its market soon.

## 1 UVOD

Širokopasovni dostop do večpredstavnih vsebin je danes ena temeljnih pravic vsakega državljana. Splošno prepričanje je, da je dolgoročno in na splošno najprimernejši tehnološki način, ki to zagotavlja (vsaj glede na tehnologije, ki jih poznamo danes), optično

vlakno do doma [1]. Čeprav je Slovenija po nekaterih kazalnikih o telekomunikacijski razvitosti med vodilnimi državami v Evropski uniji in celo v svetu [2] – po odstotku optičnih priključkov v celotnem številu širokopasovnih priključkov je med državami OECD na osmem mestu, po številu fiksnih (žičnih) širokopasovnih priključkov pa s slabimi 25 odstotki malo pod povprečjem OECD [2, 3] – pa je še vedno zelo oddaljen čas, ko bo imelo vsako slovensko gospodinjstvo na voljo širokopasovni priključek s prenosno hitrostjo vsaj 30 Mbit/s do leta 2020, kar je ena temeljnih zahtev Digitalne agende [4]. Tudi do izpolnitve prvega cilja Digitalne agende – osnovni širokopasovni priključek za vsakega državljana do konca leta 2013 – smo oddaljeni za približno 280.000 gospodinjstev. To pa je mogoče doseči le z brezžičnimi tehnologijami. Nekatere od njih so opisane v nadaljevanju.

Danes lahko prenosne hitrosti 30 Mbit/s omogočajo infrastrukture in tehnologije, kot so optični kabli, kabela omrežja s tehnologijo DOCSIS 3.x in v omejenem obsegu bakreni pari s tehnologijo xDSL. Podobne hitrosti so za brezžične tehnologije dosegljive predvsem teoretično, velik problem je simetričnost storitve in pri mobilnih omrežjih vpliv spremenljive gostote uporabnikov na celico.

## 2 KAJ RAZUMEMO POD IMENOM ŠIROKOPASOVNI DOSTOP

V dokumentih OECD [5] so zapisane definicije, ki opisujejo pojem širokopasovnosti. OECD je že pred leti določila, da je 256 kbit/s tista najnižja meja prenosne hitrosti, ko še lahko govorimo o širokopasovnem dostopu.

Na splošno je sprejet kot širokopasoven tisti priključek, ki omogoča spodoben dostop do vsebin na internetu. Ker se vsebine na internetu spreminjajo, postajajo bogatejše in prenosno potratnejše, se temu primerno premika (navzgor) tudi spodnja meja za širokopasovni priključek. Danes so uporabne hitrosti vsaj 2 Mbit/s do uporabnika in vsaj 1 Mbit/s od uporabnika. Govorimo o kakovosti uporabnikove izkušnje, stalni vključenosti in majhni zakasnitvi v omrežju. Tehnologija, na kateri teče določena storitev, mora preprosto zagotoviti minimalno kakovostno uporabnikovo izkušnjo. V preglednici 1 so prikazane minimalne prenosne hitrosti za nekatere storitve.

Preglednica 1: Minimalne prenosne hitrosti do uporabnika v Mbit/s za izbrane storitve

Storitev	Hitrost prenosa (Mbit/s)
Telefonija IP	0,5
Poslušanje radia na spletu	1
Brskanje po spletu	1,5
TV standardne ločljivosti (kodiranje MPEG4)	2
Komunikacija med dvema točkama	3
TV standardne ločljivosti (kodiranje MPEG2)	4
TV visoke ločljivosti (HD)	12
Prisotnost na daljavo v visoki ločljivosti	12
e-zdravje - diagnostika na daljavo	26
e-zdravje - virtualno zdravljenje	26
Izobraževanje v visoki ločljivosti	50
Hkratna uporaba več aplikacij	100

## 3 FREKVENČNI SPEKTER

Za brezžični dostop je po Digitalni agendi namenjenega približno 1.200 MHz frekvenčnega spektra v frekvenčnih pasovih od 400 MHz do 6 GHz, kar naj bi dopolnilo fiksne žične, kabelske in optične storitve. Manjši delež gospodinjstev bi pokrili tudi s pomočjo satelitskih komunikacij.

V analizi in tehnični rešitvi [6, 7] je obravnavano tudi zanimivo frekvenčno območje malo nad 10 GHz. Tu je na voljo sorazmerno širok frekvenčni pas (približno 600 MHz), katerega večji kos je že zdaj namenjen sistemom točka-točka ali točka-mnogo točk, v večini evropskih držav pa tudi ni preveč zaseden.

Na splošno pa so frekvenčna območja, ki so določena za fiksne brezžične dostopovne storitve [8], naslednja:

- 2,50–2,69 GHz,
- 3,410–3,800 GHz,
- 5,725–5,875 GHz,

- 10,150–10,650 GHz,
- 11,70–12,50 GHz,
- 24,5–26,5 GHz,
- 27,5–29,5 GHz,
- 31,8–33,4 GHz,
- 40,5–43,5 GHz.

## 4 SODOBNE ŠIROKOPASOVNE BREŽIČNE TEHNOLOGIJE

V svetu poznamo vrsto brezžičnih tehnologij, ki si s svojimi prednostmi in slabostmi lahko konkurirajo, velikokrat pa je med njimi mogoče sožitje ali celo kombinacija. Te omogočajo spodobno hiter dostop do internetnih vsebin, dostop do elektronske pošte, telefonija IP in podobno. Relativno preprosto in uporabno je tudi dostopanje do pretočnih videovsebin, kot so na primer videoposnetki na aplikaciji YouTube.

Malo težji zalogaj za tehnologije, ki temeljijo na protokolu IP, je navadna ali t. i. linearna televizija. Tudi če za stiskanje uporabimo kodiranje MPEG 4 (hitrost kodiranja je približno 6 Mbit/s), v pasovne širine nekaj 10 MHz, ki jih imajo navadno na voljo brezžični sistemi, ne spravimo veliko kanalov hkrati. Potem so tu še omejitve pri opremi (npr. Ethernet vmesniki 10/100 Mbit/s), načinu prenosa vsebine (unicast ali multicast) in podobno.

### 4.1 Mobilni brezžični dostop

Pri mobilnem širokopasovnem brezžičnem dostopu je tehnologija LTE (ang. Long Term Evolution) oziroma LTE Advanced (pravi predstavnik četrte generacije mobilnih komunikacij) tista, ki v eni tehnologiji združuje več tehnoloških izboljšav zadnjih let. S kombinacijo tehnike prostorskega multipleksiranja MIMO (ang. Multiple In Multiple Out) lahko omogoči prenosne hitrosti celo 1 Gbit/s ali več na uporabnika. Lastnost tehnologije LTE je v tem, da je podrejena hitremu prenosu podatkov uporabnikom, ki so lahko mobilni, vendar prenos govora ni več primarni namen te tehnologije. Tudi prenos slike s tehnologijo LTE je mogoč (IP TV, pretočni video), ni pa namenjen prenosu več hkratnih TV-programov linearne televizije, kot na primer s klasičnim oddajanjem prek mreže prizemnih oddajnikov digitalne televizije DVB-T (ang. Digital Video Broadcasting-Terrestrial).

### 4.2 Fiksni brezžični dostop

Pri opisovanju fiksnih brezžičnih omrežij se je uveljavilo več kratic, najbolj pa sta uveljavljeni dve: FWA (ang. Fixed Wireless Access) in BWA (ang. Broadband Wireless Access). Pomenita podobno in označujeta brezžične dostopovne sisteme točka–mnogo točk.

V skupino sistemov BWA/FWA se uvrščajo tudi sistemi MMDS (ang. Multimedia Multipoint Distribution System). Ti sistemi so bili na začetku svojega razvoja predvideni kot brezžični podaljšek kabelskim omrežjem, kjer njihova gradnja ni bila

ekonomsko upravičena. Omogočali so le enosmerno distribucijo televizijskih in radijskih kanalov. Tudi kratica je bila drugačna: Multipoint Microwave Distribution System. Z leti so se razvili in danes omogočajo dvosmerno širokopasovno komunikacijo. Njihov doseg je približno do razdalje 25 kilometrov. Obe strani (sprejemnik in oddajnik) uporabljata ozko usmerjene antene (lijak, parabolno zrcalo in podobno).

Frekvenčni spekter, namenjen prvim sistemom MMDS, je bil okrog 2,6 GHz. Še danes na tem pasu deluje vrsta sistemov v nekaterih evropskih državah, Kanadi, ZDA in Indiji. Pozneje je ITU dodelila sistemom MMDS še frekvenčni pas okrog 12 GHz, ki si ga delijo s satelitskimi sistemi. Širina frekvenčnega pasu, ki ga zasedajo sodobni sistemi MMDS, je od 300 do 400 MHz v odtoku (distribucija TV-programov) in nekaj 10 MHz v pritoku (internet in VoIP). Za odtok in pritek se danes uporabljata dve ločeni frekvenčni območji, razmišlja pa se tudi o poenotenju sistemov na istem frekvenčnem območju (npr. 10 GHz).

Pri zdajšnjem stanju tehnologije lahko računamo s hitrostmi 10 Mbit/s na širokopasovni brezžični priključek, kar je za večino gospodinjstev, ki druge možnosti za takšno hitrost ne bodo imela še vrsto let, povsem sprejemljivo. Z vpeljavo te tehnologije lahko tudi zelo hitro izpolnimo osnovni cilj Digitalne agende, ki pričakuje od vseh držav članic EU, da bodo do konca leta 2013 zagotovile vsakemu državljanu vsaj osnovni širokopasovni priključek.

V skupino sistemov oziroma tehnologij, ki omogočajo enosmerno širokopasovno povezavo, uvrščamo različne izvedenke sistema DVB. Ta standard je namenjen enosmernemu prenosu digitalnih televizijskih kanalov (radiodifuziji). V skupino sistemov/tehnologij, ki omogočajo dvosmerno, predvsem internetno širokopasovno povezavo, uvrščamo (preglednica 2) WiFi, WiMAX, satelitski internet in razne hibridne rešitve.

Uporaben način za hiter dostop do širokopasovnega interneta je prek satelitskega interneta. Hitrosti na priključek dosegajo spodobnih 10 Mbit/s do uporabnika in 4 Mbit/s od uporabnika, priključek je na voljo tako rekoč čez noč, cene priključkov in mesečne naročnine pa se že bližajo konkurenčnim. Slabost te rešitve je, da terminal komunicira s satelitom v geostacionarni orbiti, zakasnitve so za marsikatero storitev prevelike, zemeljski komplet pri uporabniku pa zahteva uporabo približno 80 centimetrov velike parabolične antene.

Nekatere različice zgoraj nešteti tehnologij se uporabljajo v različnih hibridnih izvedbah dvosmernih širokopasovnih sistemov, ki so razvite ter v uporabi tudi v Sloveniji. Dve od njih sta opisani v nadaljevanju.

#### 4.2.1 MMDS 1

Hibridno rešitev, imenovano MMDS 1 [6, 7], je v okviru projekta gradnje odprtih širokopasovnih omrežij (GOŠO 2) sestavilo ljubljansko podjetje Iskra Sistemi, d. d.

Kombinacija tehnologij DVB-S in WiMAX je rešitev, ki kombinira zmožnost dveh tehnologij in zmogljivost dveh frekvenčnih območij. Tehnologija DVB-S se uporablja za prenos televizijskih (in radijskih) kanalov, tehnologija WiMAX pa za dvosmerni prenos internetnega in govornega prometa. Deluje na dveh frekvenčnih območjih, 12 GHz za prenos televizije (DVB-S) in 3,5 GHz za dostop uporabnikov do interneta in telefonije IP (WiMAX). Širina frekvenčnega pasu, ki je na voljo za prenos televizije, je 400 MHz, širina frekvenčnega pasu za internet in telefonijo pa je 2 x 21 MHz. Modulacija v sistemu DVB-S je QPSK, v sistemu WiMAX pa prilagodljiva QAM.

Zmogljivost tega sistema je približno naslednja:

- televizija: približno 150 televizijskih kanalov na uporabnika (kodiranje MPEG-4, 6 Mbit/s),
- internet/telefonija: če računamo s 4 Mbit/s na uporabnika, ena postaja WiMAX zadostuje za 350 uporabnikov (16 QAM, FEC = 3/4, kanal širine 7 MHz).

#### 4.2.2 MMDS 2

Hibridno rešitev, imenovano MMDS 2 [6, 7], je razvilo mariborsko podjetje Globtel, d. o. o. To je verjetno edini produkt te vrste na trgu, ki je integriran in deluje kot enoten sistem.

Za prenos digitalne televizije se uporablja standard DVB-T, za prenos podatkov in telefonijo (IP) pa se uporablja DVB-C (DOCSIS). Terminalno opremo na strani uporabnika sestavljajo parabolno zrcalo, set-top-box in modem. Terminalna postaja je v stalni brezžični povezavi s centralno postajo, ki je v njenem vidnem polju. V odtoku (povezava navzdol) se uporabljajo modulacije 16 QAM do 256 QAM in v dotoku (povezava navzgor) modulacije QPSK do 128 QAM. Vsak sektor centralne postaje ima na voljo pasovno širino 300 MHz za dotok in odtok. Širina enega transportnega kanala v odtoku je 8 MHz in v dotoku 6,4 MHz.

Lastnosti in zmogljivost tega sistema so naslednje:

- televizija: več kot 100 digitalnih televizijskih kanalov na uporabnika (širina kanala 8 MHz, prilagodljiva modulacija QAM, kodiranje MPEG 2 ali MPEG 4, 4 do 8 Mbit/s, DVB-T),
- internet/telefonija: do 35 Mbit/s pri povezavi navzdol (kanal 8 MHz, 8 kanalov, DOCSIS) in do 5 Mbit/s pri povezavi navzgor (kanal 6,4 MHz, 8 kanalov, DOCSIS); če računamo s prenosno hitrostjo 2 Mbit/s na uporabnika, lahko na odtoku ponujamo storitev približno 2500 uporabnikom (8 kanalov po 8 MHz, 16 QAM) in na dotoku 1600 uporabnikom (8 kanalov po 6,4 MHz, 16 QAM).

Obe hibridni rešitvi, tako MMDS 1 kot MMDS 2, omogočata storitev brezžičnega trojčka, na istem sistemu pa lahko hkrati ponuja storitve več ponudnikov storitev.

Preglednica 2: Primerjava brezžičnih dostopovnih tehnologij

	WiFi	WiMAX	Satelitski internet	Hibrid MMDS 1	Hibrid MMDS 2
Tehnologija/standard	IEEE 802.11	IEEE 802.16	DVB-S2	DVB-S + WiMAX	DVB-T + DVB-C (DOCSIS)
Licenca/ODRF	ne	da	ne	da	ne za 5GHz, da za 12 GHz
Velikost pokrivanja	nekaj 10 m	nekaj 100 m	površina več 1000 km <sup>2</sup>	do 15 km	do 15 km
Vidnost med oddajnikom in sprejemnikom	NLoS	NLoS	LoS	LoS	LoS
Internet	da	da	da	da	da
VoIP	da	da	opcija	da	da
TV	ne	ne	opcija	da	da
Frekvenčno območje	2,4 in 5 GHz	po standardu 2-66 GHz, tipično 2,3-2,5 in 3,5-3,7 GHz	20 in 30 GHz	3,5 in 12 GHz	5 in 12 GHz
Širina kanala	do 40 MHz	1,25 do 20 MHz	2,5 GHz	400 MHz (na 12 GHz), 20 MHz (na 3,5 GHz)	400 MHz (na 12 GHz), 8/6,4 MHz (na 5 GHz)
EIRP	20 do 36 dBm	43 dBm (bazna postaja), 23 dBm (terminal)	50 dBW (satelit), 48,4 dBW (terminal)	43 dBm (BS WiMAX), 47 dBm (MMDS)	do 65 dBm (bazna postaja), do 58 dBm (terminal)
Modulacija	QPSK do 64QAM	QPSK do 64QAM (bazna postaja), QPSK do 16QAM (terminal)	prilagodljiva QAM	QPSK, prilagodljiva QAM	QPSK, 16QAM do 256QAM (DL), QPSK do 128QAM (UL)
Maks. hitrost prenosa podatkov	do 600 Mb/s (2x20 MHz+MIMO) (DL)	do 1 Gb/s, tipično 20-40 Mb/s (DL)	20 Mb/s (DL), 6 Mb/s (UL)	20 Mb/s (DL), 4 Mb/s (UL)	do 35 Mb/s (DL), do 5 Mb/s (UL)
Proizvajalec opreme	Linksys, D-Link, Netgear, Cisco,...	Huawei, Motorola,...	Eutelsat,...	BMB Electronic, ...	Globtel

## 5 NAČRTOVANJE ŠIROKOPASOVNIH BREŽIČNIH OMREŽIJ

Pri načrtovanju širokopasovnega brezžičnega omrežja moramo vsaj v osnovi predvideti, kakšne storitve naj bi omogočalo to omrežje. Iz tega lahko izračunamo njegove zmogljivosti in ekonomsko upravičenost gradnje [9].

Tehnični parametri, ki jih ocenjujemo, ko postavljamo širokopasovno brezžično omrežje:

- sobivanje z drugimi sistemi brez motenj,
- na voljo dovolj pasovne širine,
- vidno polje med oddajnikom in sprejemnikom,
- kakovosten signal v vseh razmerah (npr. neko minimalno razmerje  $S/N$  za  $BER=10^{-6}$ ) oziroma dovolj velika razpoložljivost zveze (vsaj 99),
- možnost prilagajanja stopnje modulacije (npr. QPSK do 1024 QAM),
- uporaba različnih tehnik, ki omogočajo velike zmogljivosti zveze (npr. XPIC in MIMO).

### 5.1 Načrtovanje zmogljivosti sistema

Tehnika MIMO je relativno zrela tehnologija, ki pa zaradi svoje kompleksnosti, dimenzij in posledično tudi cene še vedno ni doživela večjega razcveta. Res pa je, da se njen dobiček pozna že pri najpreprostejši konfiguraciji 2x2 MIMO, kjer sta v uporabi po dve anteni na oddajni in sprejemni strani. V tem primeru se zmogljivost poveča za faktor 2, na splošno pa je dobiček enak manjši številki v zmnožku, če ti dve nista enaki (npr. 4x2). Da podvojimo zmogljivost zveze, lahko z isto anteno oddajamo na dveh ortogonalnih polarizacijah hkrati. Zaradi neoptimalnosti pri izdelavi

anten in motenj v kanalu so skoraj neizogibni vplivi ene polarizacije na drugo. XPIC (ang. Cross Polar Interference Cancellation) je tehnika, ki te motnje zmanjša na minimum in se izvaja na sprejemni strani. Dobitek v zmogljivosti je dvakraten.  $n$ QAM (ang. Quadrature Amplitude Modulation) je modulacija, ki se uporablja že dlje časa, večja procesorska moč in razvoj filtrov pa sta omogočila, da se ob primernih pogojih v radijskem kanalu lahko uporabljajo tudi modulacije precej višjih redov, kot npr. 512QAM, 1024QAM in celo več. Dobitek pri zmogljivosti zaradi večje stopnje modulacije je zapisan z enačbo (1)

$$n = 2^m \quad (1)$$

kjer je  $m$  red modulacije QAM. Na primer za 1024QAM, kjer je  $m = 10$ , je dobiček v zmogljivosti kanala 10-kratno.

Iz spektralne učinkovitosti nekaj bit/s/Hz smo v zadnjem času prišli celo na več deset bit/s/Hz, kar nam omogoča visoke prenosne hitrosti v relativno ozkem prenosnem pasu. Pri dobrih razmerah v kanalu (npr.  $S/N=25$  dB) in z uporabo MIMO 4x4 lahko dosežemo prenosno hitrost 1 Gbit/s v kanalu širine 28 MHz ali pa 2 Gbit/s v kanalu širine 56 MHz (slika 2).

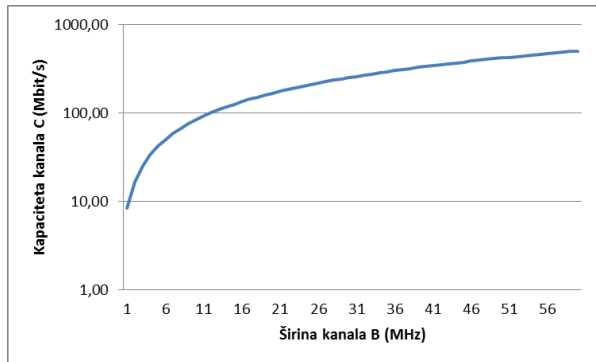
Razvoj tehnologije ima torej pomembno vlogo pri omogočanju večjih prenosnih zmogljivosti. Opazen je napredek na področju modulacij in kodiranja oziroma popravljanja napak, pomembno vlogo pa igrajo občutljivejši in selektivnejši filtri v sprejemnikih (nizek fazni šum).

Z vidika frekvenčnega spektra, ki ga ima operater na voljo, je pomembna zmogljivost prenosnega kanala oziroma spektralna učinkovitost sistema. Zmogljivost

kanala  $C$  je odvisna od širine kanala  $B$ , jakosti signala  $S$  in jakosti šuma  $N$ . Zmogljivost kanala izračunamo s Shannonovo enačbo (2).

$$C = B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad \left[ \frac{\text{bit}}{\text{s}} \right] \quad (2)$$

Z enačbo (2) izračunamo, kakšno hitrost lahko teoretično ponudimo uporabniku, če uporabljamo določeno modulacijo in imamo na voljo določeno širino frekvenčnega pasu.



Slika 2: Hitrost prenosa  $C$  v odvisnosti od širine kanala  $B$  in razmerja signal-šum  $S/N$  ( $=25$  dB)

Iz slike 2 lahko razberemo, da moramo, če želimo uporabnikom omogočiti npr. prenosno hitrost 100 Mbit/s, uporabiti modulacijo 64 QAM in imeti 20 MHz širok kanal, ali pa modulacijo 256 QAM, za kar zadošča 15 MHz širok kanal. To seveda velja v dobrih razmerah v radijskem kanalu.

Pri izbiri vrste digitalne modulacije smo vedno v precepu med učinkovitostjo in kakovostjo prenesene informacije. Z digitalnimi modulacijami prihajajo do izraza prednosti zmogljivih mikroprocesorjev, veliko pomanjkljivosti komunikacijske povezave lahko preprosto popravimo s programsko opremo. Informacijo lahko kriptiramo, uporabimo določeno metodo za popravo napak, digitalni signalni procesorji pa omogočijo uporabo ožjega frekvenčnega pasu za neko storitev.

Preglednica 3: Zmogljivost kanala (v MHz) za različne stopnje modulacij QAM

Modulacija	S/N (dB)	Širina kanala		
		10 MHz	8 MHz	6 MHz
4QAM	13,6	27,8	22,2	16,7
16QAM	20,5	41,4	33,1	24,8
32QAM	24,4	49,2	39,4	29,5
64QAM	26,6	53,6	42,9	32,2
256QAM	31,5	63,5	50,8	38,1

Za primer izračunamo skupno zmogljivost sistema, ki ima na voljo 100 MHz pasovne širine (10 kanalov po 10 MHz). Iz preglednice 3 za modulacijo 16QAM (kodiranje 7/8) izračunamo skupno zmogljivost vseh kanalov, ki je 414 Mbit/s. Za to potrebujemo dobre razmere v kanalu ( $S/N=20,5$  dB). Če želimo vsakemu uporabniku ponuditi hitrost prenosa 10 Mbit/s, lahko naše storitve uporablja približno 1000 uporabnikov (faktor 1:25).

## 5.2 Načrtovanje moči in pokrivanja sistema

Pri načrtovanju radijske zveze je treba upoštevati še nekaj obveznih fizikalnih robnih pogojev (BER, dopustno velikost presiha, razpoložljivost, ...), dobro pa je upoštevati tudi čisto praktične razloge, kot so npr. velikost in oblika antene, mesto montaže in podobno. Iz teh robnih pogojev izhaja tudi izbira delovnega frekvenčnega območja za radijsko zvezo. Oblika antene je za zveze točka-točka parabolno zrcalo in ima veliko smernost (širina glavnega snopa je nekaj kotnih stopinj). Praviloma večji premer antene pomeni tudi večji dobitek. Antene na višjih frekvencah imajo to prednost, da so relativno manjše in jih je lažje vključiti v prostor, predvsem v urbana naselja.

Potrebno oddajno moč  $P_{Tx}$  izračunamo iz enačbe za bilance zveze (3)

$$P_{Tx} - L_{Tx} + G_{Tx} - L_{FS} + G_{Rx} - L_{Rx} - P_{Rx} \quad [dB] \quad (3),$$

kjer so  $L_{Tx}$  izgube med oddajnikom in oddajno anteno,  $G_{Tx}$  dobitek oddajne antene,  $L_{FS}$  izgube na prenosni poti,  $G_{Rx}$  dobitek sprejemne antene,  $L_{Rx}$  izgube med sprejemno anteno in sprejemnikom in  $P_{Rx}$  minimalna potrebna sprejemna moč za izbrano storitev in kakovost zveze. Izgube v praznem prostoru  $L_{FS}$  izračunamo z enačbo (4)

$$L_{FS} = 92,4 + 20 \cdot \log(f) + 20 \cdot \log(d) \quad [dB] \quad (4),$$

kjer je  $f$  frekvenca v GHz in  $d$  razdalja v kilometrih. Minimalno potrebno moč na sprejemni strani  $P_{Rx}$  izračunamo z enačbo (5)

$$P_{Rx} = -174 + 10 \cdot \log(B_N) + F_N + \left( \frac{S}{N} \right)_{\min} \quad [dBm] \quad (5),$$

kjer je  $B_N$  pasovna širina sprejemnika (v MHz),  $F_N$  šumno število in  $(S/N)_{\min}$  minimalno zahtevano razmerje signal/šum (v dB) za določeno kakovost storitve. Iz pasovne širine sprejemnika in šumne temperature  $T_0$  ( $=290$  K) lahko z enačbo (6) izračunamo moč termičnega šuma  $P_N$

$$P_N = k_0 \cdot T_0 \cdot B_N \quad \left[ \frac{W}{MHz} \right] \quad (6),$$

kjer je  $k_0$  Boltzmannova konstanta ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  W/(K Hz)).

Ko imamo moči znane, lahko izračunamo pokrivanje oziroma doseg sistema. To izračunamo z enačbo (7) za gostoto pretoka moči  $S_{Tx}$  na razdalji  $d$  (v m) od oddajnika

$$S_{Tx} = \frac{P_{Tx} \cdot G_{Tx}}{4\pi \cdot d^2} \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (7)$$

in enačbo (8) za gostoto pretoka moči  $S_{Rx}$  na sprejemni strani

$$S_{Rx} = S_{Tx} \cdot A_{ef} = \frac{4\pi \cdot P_{Rx}}{\lambda^2 \cdot G_{Rx}} \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (8).$$

Za ponazoritev razmer, naredimo primer za brezžični sistem, ki deluje na frekvenci 12 GHz, ima oddajno moč 5 dBW, dobitok oddajne antene 18 dBi in dobitok sprejemne antene 30 dBi. Rezultati so zajeti v preglednicah 4 in 5.

Preglednica 4: Gostota pretoka moči  $S$  na razdalji  $d$  od oddajnika pri konstantnem dobitku antene ( $G$ =konst.) in spremenljivem dobitku antene ( $G$ =spr.)

$d$ (km)	$S_{Tx}$ (dBW/m <sup>2</sup> ) G=konst.	$S_{Tx}$ (dBW/m <sup>2</sup> ) G=spr.
5	-60,0	-79,0
10	-66,0	-78,0
15	-69,5	-76,5
20	-72,0	-72,0
25	-74,0	-81,0
30	-75,5	-87,5
40	-78,0	-95,0
45	-79,1	-98,1
50	-80,0	-100,0

Preglednica 5: Potrebne gostote pretoka moči  $S$  na sprejemni strani za signal z bitnim pogreškom  $BER=10^{-6}$  in želeno prenosno hitrostjo

Prenosna hitrost (Mbit/s)	$P_{Rx}$ (dBm)	$S_{Rx}$ (dBW/m <sup>2</sup> )
2	-86,0	-103,0
4	-83,0	-100,0
8	-80,0	-97,0
16	-77,0	-94,0

Kot razberemo iz preglednic 3 in 4, potrebujemo za prenosno hitrost 16 Mbit/s na sprejemni strani gostoto pretoka moči okrog -94 dBW/m<sup>2</sup>, kar pomeni, da lahko v idealnih razmerah priključimo uporabnike do razdalje dobrih 40 kilometrov. V praksi moramo računati na občasno slabše razmere v radijskem kanalu zaradi dežja in druge vplive, tako da je dejanski doseg za to storitev nekoliko manjši.

## 6 SKLEP

Razvoj tehnologije je omogočil izdelavo brezžičnih širokopasovnih sistemov, ki kot sestavljeni ali samostojni sistemi uporabnikom omogočajo spodobno hitre brezžične širokopasovne povezave do interneta (2 Mbit/s in več) in telefonije, hkrati pa tudi sprejem več deset televizijskih programov (tudi več kot sto). Pri nekaterih izvedbah teh sistemov so sestavni deli iz serijske proizvodnje, kar zagotavlja dostopno ceno končnega izdelka. Dva od takšnih sistemov, ki združujeta tehnologiji DVB-S in WiMAX oziroma DVB-T in DVB-C (DOCSIS), se uporabljata tudi v Sloveniji in sta plod domačega razvoja. Dobra lastnost obeh sistemov je tudi ta, da omogočata hitro izpolnitev prvega cilja Digitalne agende – širokopasovni dostop do interneta za vse državljane Slovenije do konca leta 2013.

## LITERATURA

- [1] Batagelj B.: Možnosti izvedb optičnega dostopnega omrežja z arhitekturo točka-točka. Elektrotehniški vestnik., 2010, letn. 77, št. 5, str. 259–266.
- [2] OECD Broadband Portal (<http://www.oecd.org/sti/broadband/oecd-broadband-portal.htm>)
- [3] Batagelj B.: Deployment of fiber-to-the-home in the Slovenian telecommunications market, Fiber integr. opt., 2013, vol. 32, 1, str. 1–11;
- [4] Digital Agenda for Europe (<http://ec.europa.eu/digital-agenda/>)
- [5] OECD Broadband Subscriptions Criteria, 2010 (<http://www.oecd.org/sti/broadband/oecd-broadband-subscriber-criteria2010.htm>).
- [6] Mlinar, T.: Analiza dvosmernih širokopasovnih dostopnih tehnologij v gigaherčnem frekvenčnem območju, Inštitut za EMS, februar 2013.
- [7] Batagelj, B.: Izdelava tehnične rešitve MMDS v frekvenčnem pasu 10 GHz, Fakulteta za elektrotehniko, marec 2013.
- [8] Načrt uporabe radijskih frekvenc (NURF 2), Uradni list RS, št. 66/12, popr. 68/12.
- [9] Mlinar, T.: Analiza primernosti RF pasov pod 15 GHz za širokopasovno povezavo infrastrukture LTE, Inštitut za EMS, september 2013.

**Tom Mlinar** je diplomiral in magistriral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, doktoriral pa na Fakulteti za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Redno je zaposlen na Inštitutu za EMS in dopolnilno na Fakulteti za elektrotehniko. Njegovo raziskovalno delo zajema vse vrste radijskih komunikacij. Posveča se celostnim analizam telekomunikacijskih trgov, alternativnemu brezžičnemu dostopu in širokopasovnim komunikacijam. Je avtor ali soavtor številnih strokovnih in poljudnoznanstvenih prispevkov, urednik več zbornikov, urednik in soavtor knjige Elektromagnetna sevanja ter dolgoletni programski vodja strokovnega seminarja Radiokomunikacije.

**Boštjan Batagelj** je docent na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Raziskovalno delo opravlja v Laboratoriju za sevanje in optiko, kjer se med drugim ukvarja z dostopnimi telekomunikacijskimi omrežji. V Centru odličnosti za biosenzoriko, instrumentacijo in procesno kontrolo (COBIK) je predsednik strokovnega sveta zavoda. Poleg tega na Fakulteti za elektrotehniko predava predmete Optične komunikacije, Radijske komunikacije in Satelitske komunikacije.