

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za Elektrotehniko

Tatjana Ržarova

VERIFIKACIJA IN VALIDACIJA RADIJSKE ENOTE
NA PODORČJU E-BAND

Magistrsko delo

Mentor: prof. dr. Matjaž Vidmar

Ljubljana, 2015

Zahvala

Iskreno se zahvaljujem svojemu mentorju, prof. dr Matjažu Vidmarju za vso pomoč, čas ter priložene nasvete. Za spodbudo, pomoč, strokovno usmerjanje in predvsem prilagodljivost se zahvaljujem sodelavcem iz Aviata. Zahvalila bi se rada tudi svoji družini, ki mi je omogočila študij in mi z vso ljubeznijo in potrpljenjem stala ob strani v vseh dobrih in slabih trenutkih. Hvala tudi Blažu za potrpljenje in moralno pomoč pri študiju in izdelavi naloge.

Kazalo slik

Slika 1: Nezaščitena radijska zveza 1+0	5
Slika 2: WTM3300 v komori	6
Slika 3: Trasa za radijsko zvezo z WTM3300	6
Slika 4: Merilne glave	7
Slika 5: WTM3300 radijska zveza	7
Slika 6: Radijski spekter	8
Slika 7: Odvisnost atmosferskega slabljenja od frekvence	8
Slika 8: Slabljenje zaradi dežja v odvisnosti od frekvence	9
Slika 9: Odvisnost dobitka parabolične antene od frekvence	9
Slika 10: Prirobnica kovinskega pravokotnega valovoda za področje E-band	10
Slika 11: Vezava merilnih inštrumentov za merjenje izhodne moči oddajnika	11
Slika 12: S parametri ojačevalnika	12
Slika 13: Vezava merilnih inštrumentov za merjenje neželene oddaje	12
Slika 14: Princip superheterodinskega sprejemnika	13
Slika 15: Funkciji image shift in image suppress	14
Slika 16: Vezava inštrumentov za merjenje spektralne maske oddajnika	15
Slika 17: Spektralna maska oddajnika na področju E-band	15
Slika 18: Jakost vektorja napake	16
Slika 19: Vezava merilnih inštrumentov za meritev vektorja napake	17
Slika 20: Pogostost napak v odvisnosti od modulacije	19
Slika 21: Vezava merilnih inštrumentov za merjenje praga sprejemnika	19
Slika 22: Programske enote kontrolne zanke za ATPC	20
Slika 23: Vezava merilnih inštrumentov za ročno preverjanje kontrolne zanke ATPC	21
Slika 24: Vezava merilnih inštrumentov za avtomatsko preverjanje kontrolne zanke ATPC	22
Slika 25: Delovanje zveze z omogočenim ACM	23
Slika 26: Izkoristek časa pri omogočenim ACM	23
Slika 27: Delovanje zveze z omogočenima ACM in ATPC	24
Slika 28: Vezava merilnih inštrumentov za preverjanje avtomatske modulacije	24
Slika 29: Pogostost napak v digitalni radijski zvezi	25
Slika 30: Odvisnost BER-a od jakosti sprejetega signala	26
Slika 31: Vezava merilnih inštrumentov za preverjanje residualnega BER-a	26
Slika 32: Vezava merilnih inštrumentov za kalibracijo valovodov in smernega sklopnika	28
Slika 33: Fiksno slabljenje radijske poti preko sosmernega sklopnika	28
Slika 34: Fiksno slabljenje radijske poti na izhodu smernega sklopnika	28
Slika 35: Vezava merilnih inštrumentov za kalibracijo nastavljivega slabilnika	29
Slika 36: Frekvenčna odvisnost slabljenja nastavljivega slabilnika	29
Slika 37: Izgube nastavljivega slabilnika	30
Slika 38: Pogrešek oddajne moči na sobni temperaturi	31
Slika 39: Pogrešek oddajne moči na temperaturi $T=-33^{\circ}\text{C}$	32
Slika 40: Pogrešek oddajne moči na temperaturi $T=+55^{\circ}$	33
Slika 41: Lo frekvence spektralnega analizatorja PXA N9030A	34
Slika 42: Meja gostote moči oddajnika	34
Slika 43: Neželene emisije WTM3300 na frekvenčnem področju od 60 do 76 GHz	35
Slika 44: Neželene emisije WTM3300 na frekvenčnem področju od 71 do 90 GHz	35
Slika 45: Spektralna maska oddajnika na 85.75 GHz	36
Slika 46: Jakost vektorja napake v odvisnosti od oddajne moči pri QPSK	38
Slika 47: Jakost vektorja napake v odvisnosti oddajne moči pri QAM16	38
Slika 48: Jakost vektorja napake v odvisnosti od oddajne moči pri QAM64	39

Slika 49: Oddajna moč in nivo sprejetega signala v odvisnosti od nastavljenega slabljenja	41
Slika 50: Temperaturni profil za merjenje RBER	44
Slika 51: Odvisnost med BER in FER	44
Slika 52: Rezultat meritev RBER na WTM3300	45

Seznam uporabljenih simbolov

V magistrski nalogi so uporabljene naslednje veličine in simboli:

Veličina / oznaka		Enota	
Ime	Simbol	Ime	Simbol
frekvenca	f	hertz	Hz ali s^{-1}
jakost signala	P ali RSL	decibel ali decibel-miliwatt	dB ali dBm
slabljenje na enoto dolžine	a	decibel-meter ali decibel-kilometer	dB/m ali dB/km
hitrost prenosa	r	bit-sekunda	b/s
dolžina	l	meter	m

Povzetek

Z magistrskim delom se skuša najti najbolj primerno rešitev za verifikacijo in validacijo naprave na področju E-band. Pri razvoju naprave sta omenjena postopka potrebna za preverjanje, ali ta izpolnjuje določene zahteve in specifikacije ter služi svojemu namenu. Na primeru mikrovalovne radijske enote so predstavljene metode in merilne tehnike, ki so specifične za omenjeno frekvenčno območje. Predlagani merilni procesi so primerni za fiksne radijske sisteme na področju E-band s povezavami točka-točka ter vzpostavljene nezaščitene zveze 1+0.

V delu se osredotočamo na merjenje parametrov mikrovalovne enote kot oddajnika, sprejemnika ali celotnega sistema. Merilne metode na področju od 71 do 86 GHz so posebne, saj smo v večini primerov omejeni z merilno instrumentacijo. Predlagane so najbolj optimalne tehnike merjenja radijskih parametrov in ocenjevanja, ali ti parametri zadoščajo določenim zahtevam.

Merilne metode in specifikacije na področju E-band so natančno opisane. Merili smo parametre mikrovalovnega sistema na različnih frekvencah in pri različnih temperaturah. Predstavljeni in analizirani so rezultati, ki smo jih dobili pri merjenju radijske enote WTM3300.

Ključne besede: verifikacija, validacija, področje E-band, merilne metode, merilni inštrumenti

Abstract

The purpose of this thesis is to find the most appropriate solution for verifying and validating the device in the E-band area. Both processes are necessary in the development stage of the device so that we can properly establish whether the device is meeting certain requirements and specifications and whether it serves its purpose. The methods and measuring techniques, which are specific for the E-band area, are presented by the microwave radio unit example. The proposed measurement processes are suitable for fixed radio systems in the mentioned area, through the point-to-point links, and the established unprotected configuration 1+0.

The thesis's focus is on the measuring of the parameters, of the microwave device either as a transmitter, a receiver or the system as a whole. The measuring methods applied in the 71 - 86 GHz frequency area, are specific because of the measuring instruments restraint that takes place most of the time. Nevertheless the thesis suggests the optimal measuring techniques for the radio parameters and assessments that determine whether these parameters satisfy certain requirements.

Also the measuring methods and specifications in the E-band area are described in detail. The parameters of the microwave system were measured at different frequencies and temperatures. The results gathered by measuring the radio unit WTM3300 were analyzed and presented in the thesis.

Key words: verification, validation, E-band, measurement methods, instruments

1 Uvod

Razvoj naprave od ideje do same izdelave je dolgotrajen proces, ki je sestavljen iz več faz. Na začetku, ko je prisotna le ideja, raziskujemo in postavljamo hipoteze. Sledi najbolj pomembna faza, sestavljena iz načrtovanja, razvoja in testiranja. V končni fazi, ko je naprava že narejena, preverjamo njeno uporabnost ter jo skušamo izboljšati.

Testiranje in merjenje parametrov sta zelo pomembna dela razvoja. Končno s tem zagotavljamo pravilno delovanje naprave. Preverjamo, ali naprava zadošča vnaprej določenim specifikacijam ter ali izpolnjuje zahteve končnega uporabnika. Potrebno je izmeriti vsak parameter posebej in oceniti, ali zadošča zahtevam, ki smo jih zastavili pri načrtovanju. Na ta način verificiramo napravo, kar pomeni, da preverjamo, ali so izpolnjeni vsi zastavljeni pogoji. Drugi način testiranja naprave je validacija, s katero ugotovimo, ali so zahteve končnega uporabnika izpolnjene. V tem delu preverimo, kako je izdelana naprava kompatibilna z napravami drugih proizvajalcev. Ko je naprava že izdelana in v uporabi, jo lahko še zmeraj verificiramo, saj je potrebno izboljšati njeno uporabnost.

Cilj magistrske naloge sta verifikacija in validacija radijske enote, ki deluje na področju E-band. Merjenje parametrov mora biti v skladu s standardom za fiksne radijske sisteme s povezavo točka-točka ETSI 302 217-3. Opisane so metode merjenja parametrov mikrovalovne enote in potrebna merilna instrumentacija. Verificiramo in validiramo delovanje radijskega sistema kot oddajnika, sprejemnika ali v celoti. Najbolj optimalno je izmeriti in oceniti lastnosti sistema na najnižji, srednji in najvišji frekvenci. Preverimo tudi temperaturno območje pravilnega delovanja enote.

Zaradi enostavnega licenciranja in velike razpoložljive pasovne širine je uporaba radijskih zvez na področju E-band zmeraj bolj pogosta. Elektronika za sisteme, ki delujejo na teh frekvencah je danes enostavno dobavljiva in razmeroma poceni. Fizične lastnosti sistemov so prav tako ugodne za načrtovanje radijskih zvez. Na tem frekvenčnem področju so izgube zaradi dežja, megle in oblakov zanemarljive. Atmosfersko slabljenje, okoli 0.5 dB/km, je zelo nizko v primerjavi s slabljenjem na nižjih frekvencah okoli 60 GHz.

S preverjanjem izhodne moči in oddajnega spektra verificiramo radijsko enoto kot oddajnik. Z merilnikom moči izmerimo pogrešek oddajne moči in ocenimo, ali je ta znotraj

vneprej določenih mej. Dobljeni vrednosti na zaslonu merilnika prištejemo izgube radijske poti, ki jih pred začetkom merjenja umerimo. Spektralne maske in morebitno neželena oddaja pomerimo s spektralnim analizatorjem. Zaradi merjenja na visokih frekvencah področja E-band potrebujemo za razširitev frekvenčnega območja delovanja spektralnega analizatorja zunanji mešanik. Pri verificiranju radijske enote kot oddajnika, šriporočljivo je pomeriti tudi vektor napake.

Delovanje mikrovalovne enote kot sprejemnika ocenimo z merjenjem njegovega praga pri vzpostavljeni zvezi. Izmerimo, kolikšna je najnižja jakost sprejetega signala, pri kateri sprejemnik še zmeraj deluje, ter kakšno je maksimalno slabljenje radijske poti. Odstopanje izmerjene vrednosti od predpisane ne sme biti višje kot 3 dB.

Kadar verificiramo neko napravo, je potrebno preveriti njeno delovanje v celoti, kot sistem. Analiziramo kontrolne zanke za avtomatsko nastavljanje moči ter adaptivno modulacijo. Prehod med različnimi vrednostmi pri avtomatskem nastavljanju moči mora biti v odvisnosti od rezervne marže in jakosti sprejetega signala brezhiben in brez izgub. Enako tudi pri preklopu med modulacijami v primeru, ko je adaptivno nastavljanje modulacije omogočeno, niso dovoljene napake na radijski zvezi. Tudi merjenje residualnega BER-a, pogostost napak pri kateri je zveza še zmeraj delujoča, je del systemskega verificiranja. To je dolgotrajen proces, s katerim merimo BER radijske zveze pri dovolj visoki jakosti sprejetega signala.

V nadaljevanju so opisane merilne metode za merjenje parametrov radijske enote na področju E-band. Meritve in analize so bile v skladu z evropskim standardom za fiksne radijske sisteme ETSI 302 217-3, kjer so natančno določene omejitve parametrov za vsako frekvenčno področje.

2 Validacija in verifikacija

Validacija in verifikacija sta neodvisna postopka, ki ju ponavljamo skozi celotno fazo razvoja naprave. Oba procesa imata dva osnovna cilja, in sicer odkrivanje napak ter pomanjkljivosti naprave, ki jo razvijamo. Hkrati ocenjujemo uporabnost izdelka in preverjamo, če služi svojemu namenu.

Validacija je zunanji postopek in zagotavlja, da naprava izpolnjuje zahteve končnega uporabnika. Z modeliranjem in simulacijami, kot delom validacije, lahko napovemo možne napake in pomanjkljivosti, ki se pojavijo v razvojni fazi. Zahteve za validacijo, specifikacije in predpise lahko potem uporabimo kot osnovo že v fazi načrtovanja naprave. Z validacijo tudi potrjujemo, da naprava izpolnjuje zastavljene zahteve, kot je na primer kompatibilnost z napravami drugih proizvajalcev.

Verifikacija je namenjena preverjanju delovanja naprave. Gre za ponovljiv postopek, s pomočjo katerega ocenimo, ali naprava izpolnjuje specifikacije in pogoje, ki smo jih zastavili na začetku razvojne faze. Verificiramo lahko že v sami razvojni fazi ali kasneje, ko je naprava v proizvodnji. V razvojni fazi so zahteve za verifikacijo naprave strožje in morajo ustrezati vnaprej določenim specifikacijam. Tudi preizkus naprave v tej fazi je zahtevnejši in obsežnejši. Tekom razvoja preverjamo parametre in funkcionalnosti naprave. Testiramo tudi design, namestitvev in njeno delovanje. Na začetku razvojne faze simuliramo del ali celotno napravo, kasneje pa vse to preverimo na že izdelani napravi. Ko preizkusimo vse vnaprej določene parametre, lahko potrdimo, da je delovanje naprave pravilno, in naprava gre lahko v proizvodnjo. Končna verifikacija naprave, ki se izvaja, kadar je naprava v proizvodnji, je postopek, ki končno potrди, ali naprava izpolnjuje vse zahteve in deluje znotraj določenih specifikacij. Takrat ne preverjamo vsake funkcionalnosti posebej, temveč grobo preverimo delovanje naprave.

Lahko rečemo, da pri verifikaciji preverjamo, kako dobro je naprava načrtovana, pri validaciji pa njeno uporabnost.

3 WTM3300

Radijske zveze na frekvenčnem področju od 71 do 86 GHz se zaradi preprostega licenciranja in razpoložljive pasovne širine vedno bolj uporablja za hrbtenične strukture v celičnih omrežjih. Na tem frekvenčnem področju lahko zelo poceni zgradimo Ethernet omrežje z velikimi hitrostmi prenosa.

WTM3300 je zunanja radijska enota za mikrovalovne zveze, ki deluje na frekvenčnem področju E-band z 10GHz razmika med oddajno in sprejemno frekvenco ter 250MHz širine med kanali. Je v skladu z evropskim standardom EN 302 217-3 za fiksne radijske sisteme s povezavo točka –točka. Za priklop take radijske enote potrebujemo RJ45 PoE vmesnik. Dostop za nastavitve parametrov je omogočen preko grafičnega vmesnika. S tako radijsko enoto lahko vzpostavimo nezaščiten zvezo 1+0.



Slika 1: Nezaščiten radijska zveza 1+0

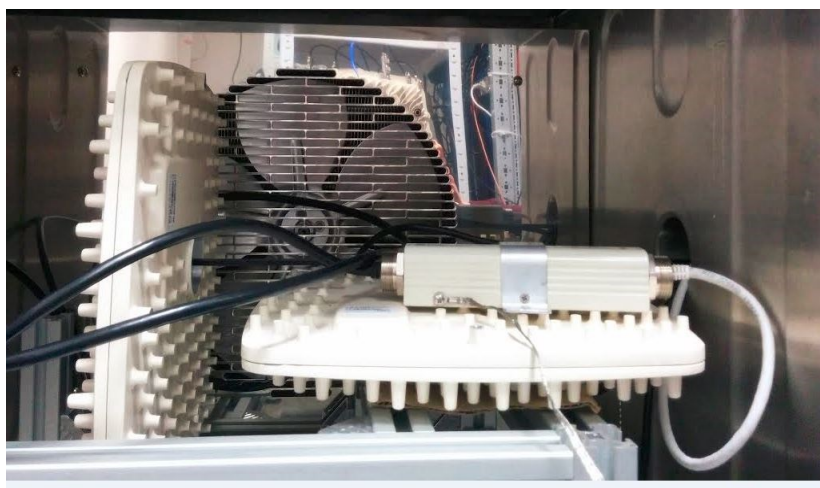
Tako načrtovana radijska enota lahko doseže hitrost prenosa do 1 Gbit/s, odvisno od nastavljene modulacije. Največjo hitrost prenosa 1Gbp/s dosežemo z modulacijo QAM64. Različne modulacije, skupaj z njihovimi parametri, so predstavljene v spodnji tabeli.

Tabela 1: Parametri radijske enote WTM3300

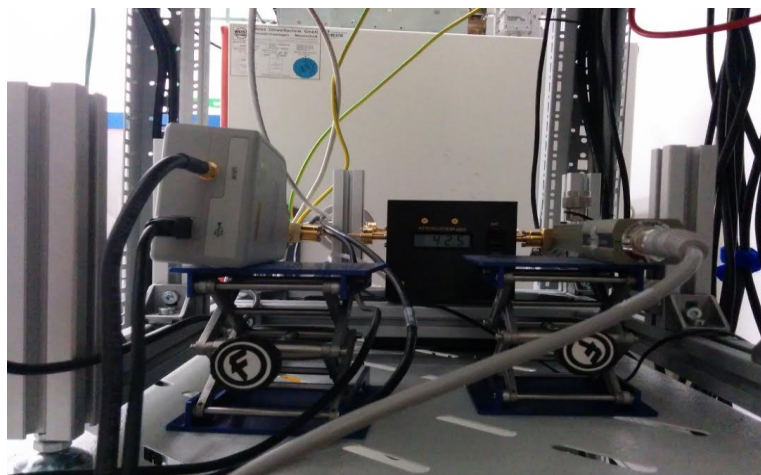
Modulacija	Hitrost prenosa [Mb/s]	Sistemiški dobitek [dB]	Prag sprejetega signala @ 10^{-6} BER [dBm]	Izhodna moč [dBm]
Strong QPSK	200	90	-76	14
QPSK	360	87	-73	14
QAM16	630	81	-69	13
QAM64	1000	73	-60	11

WTM3300 podpira tako fiksno kot tudi avtomatsko kontrolo izhodne moči in adaptivno nastavljanje modulacije, ki omogočata nastavljanje parametrov glede na trenutno stanje zveze in zagotavljata delovanje pri slabših pogojih. Zagotovljeno temperaturno področje pravilnega delovanja je od -33°C do $+50^{\circ}\text{C}$.

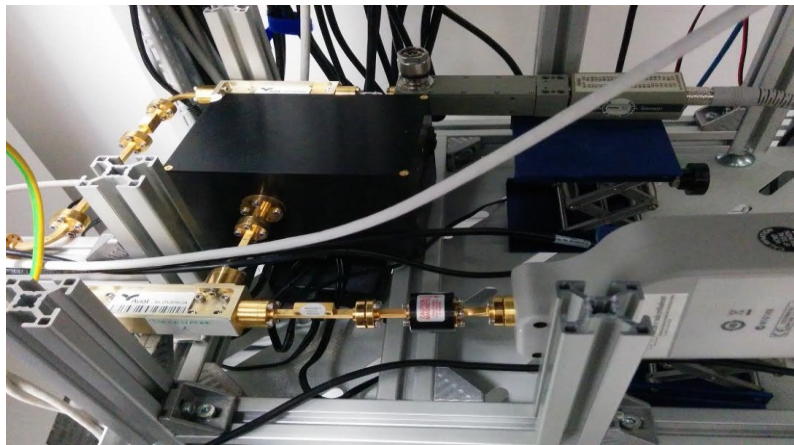
Na spodnjih slikah je prikazana radijska zveza mikrovalovne enote WTM3300 skupaj z merilnimi inštrumenti. Na Sliki 2 sta dve radijski enoti (oddajnik in sprejemnik) v komori, saj merimo parametre tudi na različnih temperaturah.



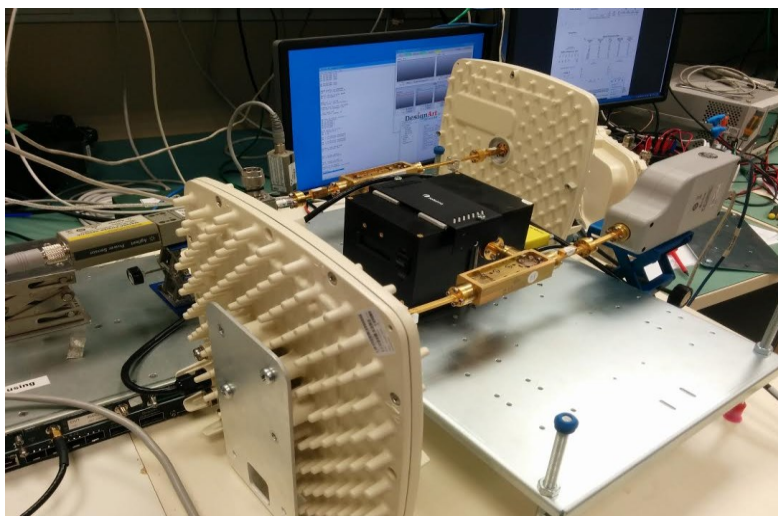
Slika 2: WTM3300 v komori



Slika 3: Trasa za radijsko zvezo z WTM3300



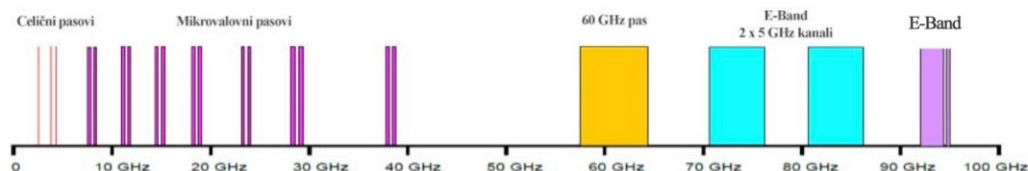
Slika 4: Merilne glave



Slika 5: WTM3300 radijska zveza

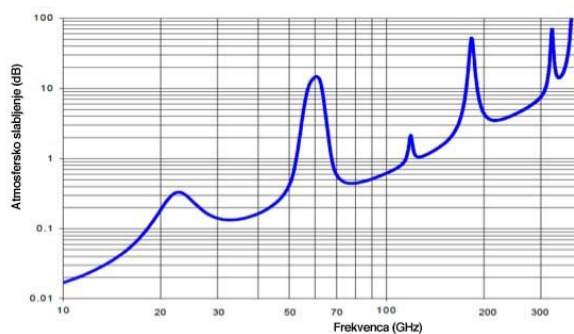
4 E-band

Mikrovalovna enota WTM3300 oddaja in sprejema na področju E-band. Na spodnji sliki je prikazan radijski spekter do 100 GHz. Vidimo, da je področje E-band razdeljeno le na dva 5 GHz pasova, in sicer od 71 do 76 GHz ter od 81 do 86 GHz, kar je redkost na nižjih frekvencah radijskega spektra. To je obenem tudi najširši spekter, ki je bil kadarkoli dodeljen.



Slika 6: Radijski spekter

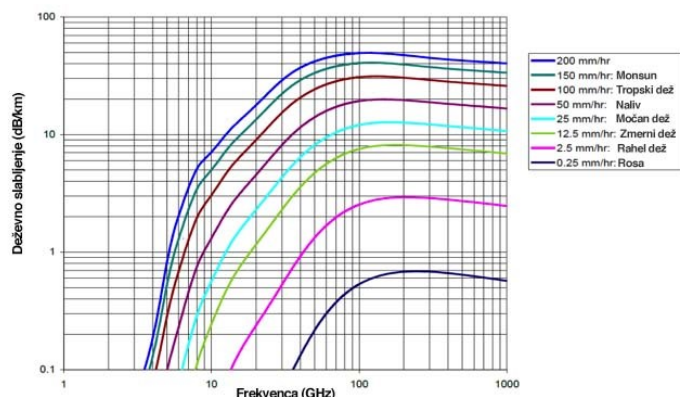
Atmosfersko slabljenje radijskih valov je odvisno od frekvence. Do 18 GHz je slabljenje zaradi atmosfere zelo nizko, okoli 0.3 dB/km ali manj. Na frekvencah med 23 in 60 GHz se zaradi absorpcije vodne pare to poveča. Na 60 GHz je prenos na večjih razdaljah omejen, saj takrat slabljenje zaradi kisika doseže do 15 dB/km. Na zelo visokih frekvencah, okoli 100 GHz in več, kjer se pojavijo številni efekti absorpcije molekul, je prenos prav tako omejen. Čisto okno vidimo med 70 in 100 GHz, saj na tem področju atmosfersko slabljenje doseže komaj 0.5 dB/km. To je zelo ugodno za prenos velikih hitrosti na večjih razdaljah ter za načrtovanje radijskih sistemov na tem področju.



Slika 7: Odvisnost atmosferskega slabljenja od frekvence

Na domet zveze lahko vpliva tudi slabljenje zaradi dežja, prikazano na sliki 4. Na primer močne padavine, okoli 25 mm/h, lahko povečajo izgube na področju E-band za okoli

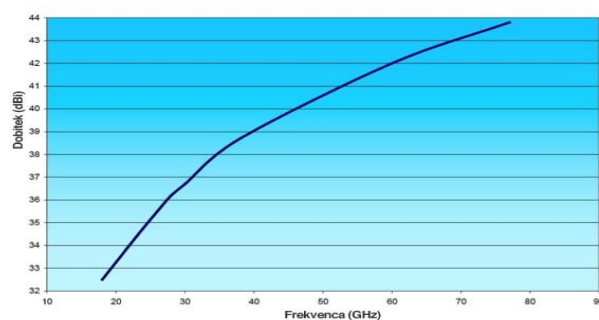
10 dB/km. Tropski dež s padavinami 100 mm/h pa pomeni dodatnih 30 dB/km slabljenja. Pri načrtovanju radijskih zvez zato upoštevamo tudi vrednosti tovrstnih izgub.



Slika 8: Slabljenje zaradi dežja v odvisnosti od frekvence

Dobra lastnost brezžičnega področja E-band je to, da je odporno na oblake in meglo. Gosta megla z vidnostjo 50 m in gostoto okoli 0.1 g/m^3 doda zanemarljivih 0.4 dB/km k slabljenju. Razlog za to so delci oblakov in megle, ki so znatno manjši od valovne dolžine radijskega signala na tem področju (okoli 4 mm).

Fizične lastnosti sistemov na tako visokih frekvencah, kot je področje E-band so zelo ugodne za načrtovanje radijskih zvez. Na spodnji sliki vidimo, kako dobitok 30 cm parabolične antene skoraj linearno narašča s frekvenco. Na frekvenci okoli 18 GHz ima taka antena dobitok približno 32.5 dBi, pri višjih frekvencah, cca. 80 GHz, ima enaka antena 45 dBi dobitka. Lahko izračunamo, da ima na področju E-band radijska zveza večji dobitok za okoli 12.5 dBi. Če vsak dobitok, večji za 6 dBi, pomeni podvojeni domet zveze, sklepamo, da bo ta na višjih frekvencah štirikrat tolikšni, kot bi ga imeli na nižjih frekvencah. Prednost področja E-band je danes enostavno dobavljiva elektronika, ki je bila v preteklosti izredno draga.



Slika 9: Odvisnost dobitka parabolične antene od frekvence

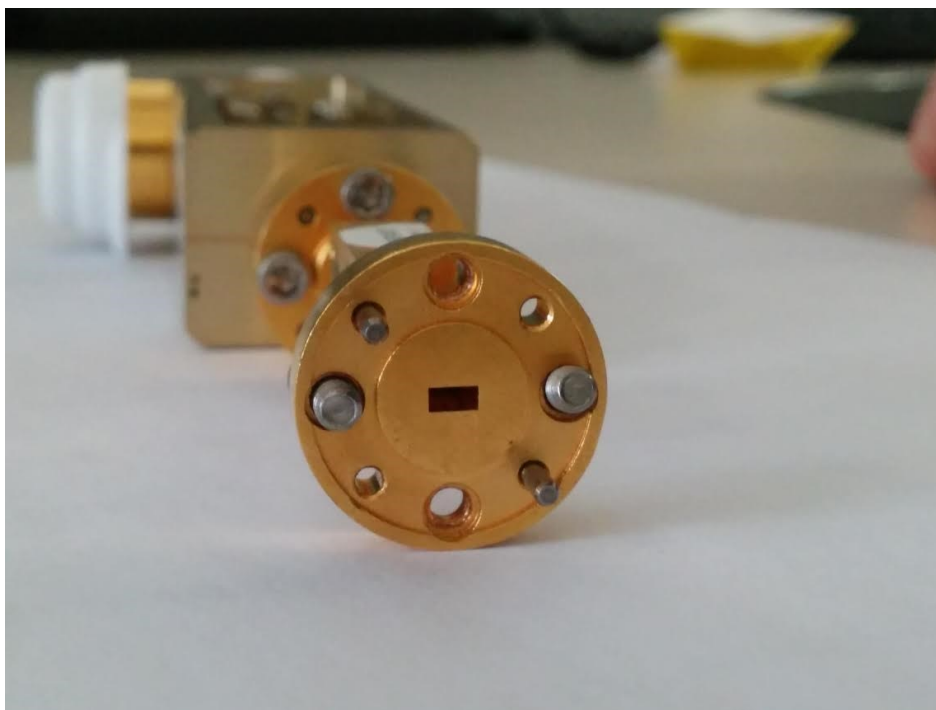
4 Radijski oddajnik

Za validacijo radijske enote kot oddajnika je potrebno pomeriti njeno izhodno moč ter morebitno oddajo izven dodeljenega radijskega spektra. Priporočljivo je pomeriti tudi velikost vektorja napake, čeprav ta ni definiran v standardu za fiksne radijske sisteme s povezavo točka–točka.

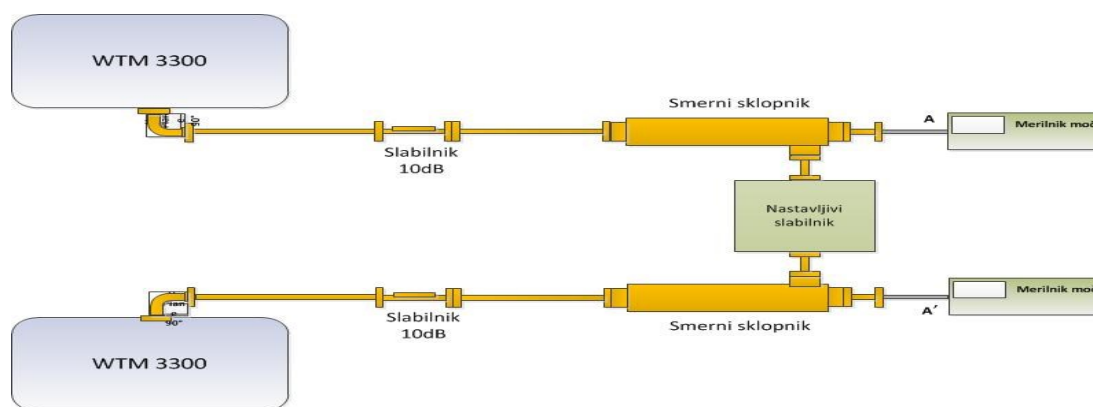
4.1 Izhodna moč

Najprej pomerimo izhodno moč oddajnika (angl. Transmit Power Output). Preverjamo, če je pomerjena vrednost na merilniku moči enaka nastavljeni izhodni moči na oddajniku. Na izhodu oddajnika preko smernega sklopnika zajamemo izhodni signal in pomerimo njegovo jakost. Vezava merilnih inštrumentov je prikazana na spodnji sliki.

Pri visokih frekvencah je koaksialni kabel popolnoma neuporaben, saj izgube v prenosnem vodu naraščajo s frekvenco. Takrat za povezavo med inštrumenti uporabimo valovode. Na področju E-band so najbolj primerni pravokotni kovinski valovodi WR12 z notranjimi izmerami 3.0988 mm x 1.5494 mm. Na spodnji sliki je prikazana prirobnica takega kovinskega valovoda. Prav tako so tudi slabniki in smerni sklopniki valovodni. Pred meritvijo običajno izmerimo izgube valovodov.



Slika 10: Prirobnica kovinskega pravokotnega valovoda za področje E-band



Slika 11: Vezava merilnih inštrumentov za merjenje izhodne moči oddajnika

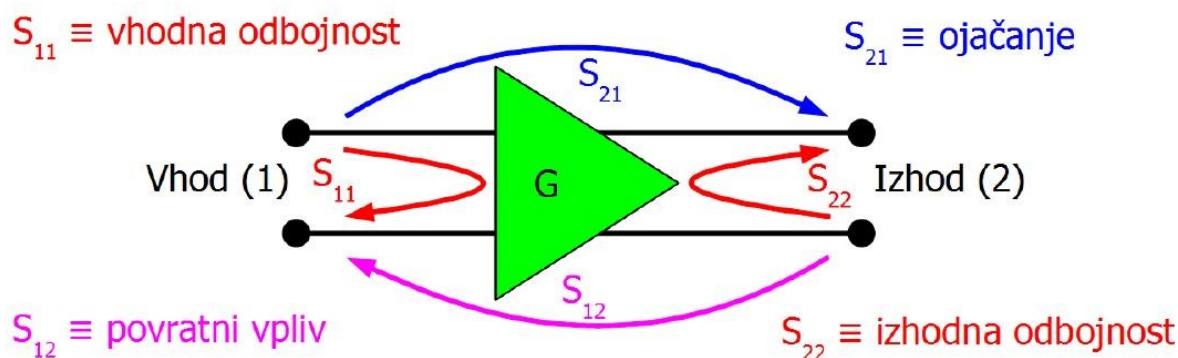
Nastavimo izhodno moč oddajnika in merimo moč v referenčni točki A ali A'. Vrednosti, ki jo odčitamo iz merilnika moči, prištejemo še morebitne izgube od oddajnika do točke, v kateri merimo oddajno moč.

Pri merjenju je potrebno skrbno izbrati ustrezno merilno glavo. Obstajata dve vrsti, in sicer bolometriške in diodne. Bolometriške merilne glave (termočlenske ali termistorske) merijo le povprečno moč. Diodne merilne glave pretvarjajo izmenično napetost mikrovalovnega izvora v enosmerno in imajo večjo občutljivost (do -70 dBm) ter hitrejši odziv. Zato se za merjenje nizkih moči v praksi uporablja diodne merilne glave, saj je takrat napaka pri merjenju manjša. V primeru merjenja visokih moči pa je slednja manjša pri termočlenski merilni glavi.

4.2 Neželena oddaja

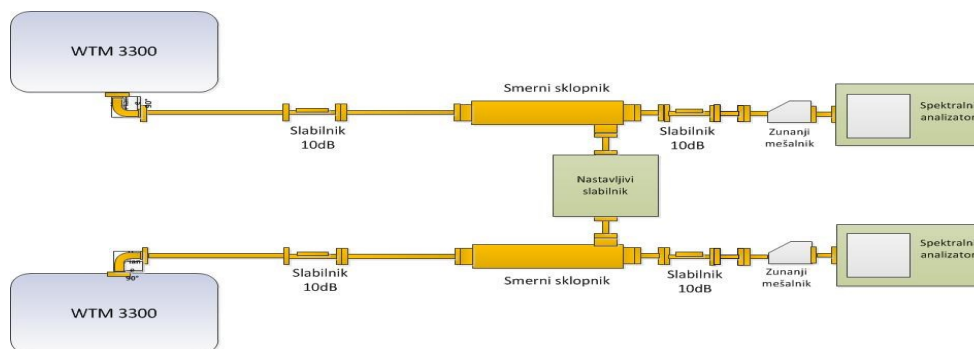
Idealnega oddajnika, ki oddaja samo na eni frekvenci, ni, saj vsak oddajnik seva neželene signale izven svojega območja delovanja. Neželena oddaja (ang. Spurious Emission) je lahko rezultat nelinearnosti oddajnika, parazitnega osciliranja, višjih harmonikov, intermodulacijskih produktov ipd. Parazitno osciliranje ojačevalnika se pojavi pri povratni vezavi iz izhoda ojačevalnika nazaj na njegov vhod. Na tak način zagotovimo pozitiven povratni odziv na neki frekvenci. Zaradi skupne vezave se lahko med vhomom in izhodom pojavijo parazitne kapacitivnosti (Millerjeva kapacitivnost). Te omejujejo delovanje ojačevalnika, znižujejo vhodno impedanco in njihov vpliv na povratno vezavo je zelo škodljiv. Ojačevalnik s čim manjšo parazitno kapacitivnostjo je stabilnejši. Njegovo stabilnost opišemo z Rolletovim faktorjem stabilnosti, ki je odvisen od matrike S. Želimo doseči čim manjši povratni vpliv S_{12} in tem večjo ojačenje S_{21} . Takrat je Rolletov faktor $K > 1$. Nestabilnost

ojačevalnika je odvisna tudi od frekvence in je vidna le v določenem frekvenčnem pasu. Oscilator in ojačevalne stopnje proizvajajo harmonike, ki so večkratniki želene frekvence. Harmoniki se običajno nahajajo zelo daleč od želenega spektra in motijo ostale uporabnike frekvenčnega spektra. Oddajanju višjih harmonikov se ne moremo izogniti. Za to obstajajo določena pravila, ki omejujejo tako neželjeno oddajanje.



Slika 12: S parametri ojačevalnika

Na spodnji sliki je prikazana vezava merilnih inštrumentov za merjenje neželene emisije oddajnika, ki ga povežemo preko slabilnika na spektralni analizator. Za meritev visokih frekvenc potrebujemo zunanji mešalnik, s katerim razširimo frekvenčno območje spektralnega analizatorja.



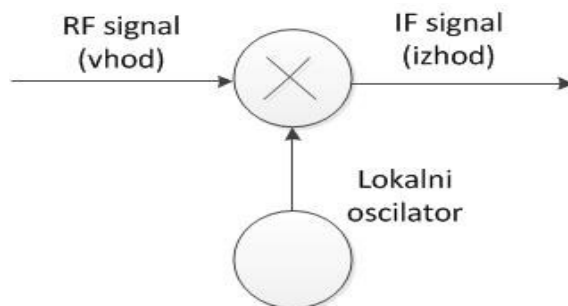
Slika 13: Vezava merilnih inštrumentov za merjenje neželene oddaje

Zunanji mešalnik med oddajnikom in vhom spektralnega analizatorja deluje na principu superheterodinskega sprejemnika (Slika 12), ki zmanjša frekvenco oddajnika f_{RF} na IF frekvenco, ki je sprejemljiva za spektralni analizator. Za tako pretvorbo frekvence potrebuje lokalni oscilator. Na sliki 11, na kateri je narisana vezava inštrumentov, za tovrstno

meritev lokalnega oscilatorja ni, saj »pametni« mešalnik LO frekvenco dobi od spektralnega analizatorja. Dobljena IF frekvenca zadošča naslednji enačbi:

$$f_{IF} = |f_{RF} - n * f_{LO}|, \quad (1)$$

kjer je n mnogokratnik harmonika.



Slika 14: Princip superheterodinskega sprejemnika

Na zaslonu spektralnega analizatorja se lahko pojavijo tudi neželeni odzivi zunanjega harmonskega mešalnika, saj ta proizvaja produkte mešanja LO frekvence z vhodnim signalom. Tvrstne signale lahko odpravimo ročno oziroma z računanjem ali s pomočjo vgrajenih funkcij v spektralnem analizatorju. Na voljo sta dve funkciji: *Image shift* in *Image suppress*.

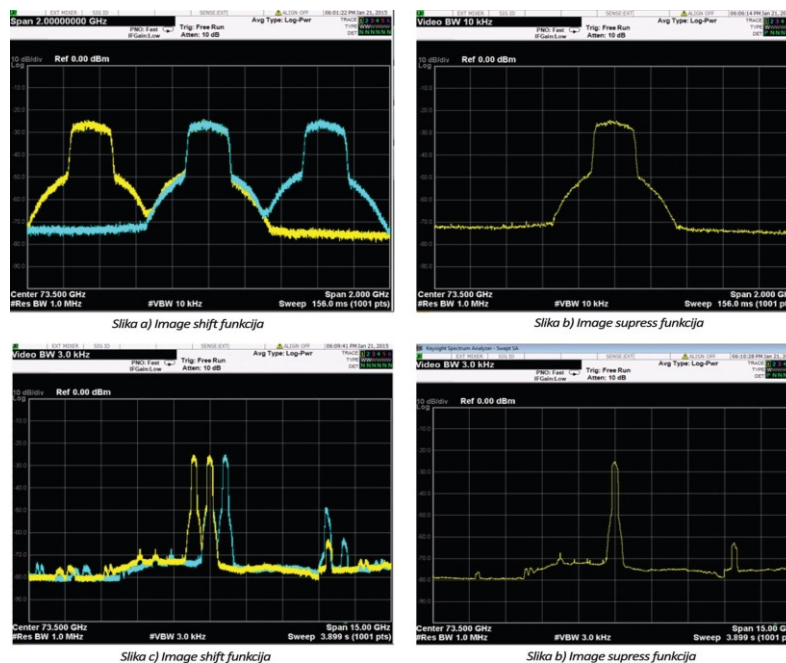
Image shift funkcija identificira želene signale in pri tem ne odstrani neželenih signalov z zaslona, ampak povzroči le njihov premik. Na tak način koristni signali ostanejo nespremenjeni. To metodo izvaja s premikom LO frekvence spektralnega analizatorja. Premaknemo jo s frekvenco, ki je enaka razmerju med dvakratno IF frekvenco in harmonika, ki ga uporabljamo. Matematično zapisano:

$$F_{\text{shift}} = 2 * F_{\text{if}} / N, \quad (2)$$

kjer je N harmonik, uporabljen za mešanje signala.

Kot nadgradnja te funkcije na spektralnem analizatorju je na voljo še funkcija *image suppress*, ki odstrani neželene signale na zaslonu. Vsak prikazan signal je sestavljen iz dveh preletov (angl. sweeps), od katerih se en izvede z LO v *image shift* funkciji. Na zaslon dobimo dva signala. Pojavi se tudi signal s premikom frekvence. Le tisti signal, ki je nespremenjen in večji od šuma, je veljaven in želeni signal.

Na sliki so prikazani primeri meritev z omogočeno funkcijo *image shift* ali *image suppress*.



Slika 15: Funkciji *image shift* in *image suppress*

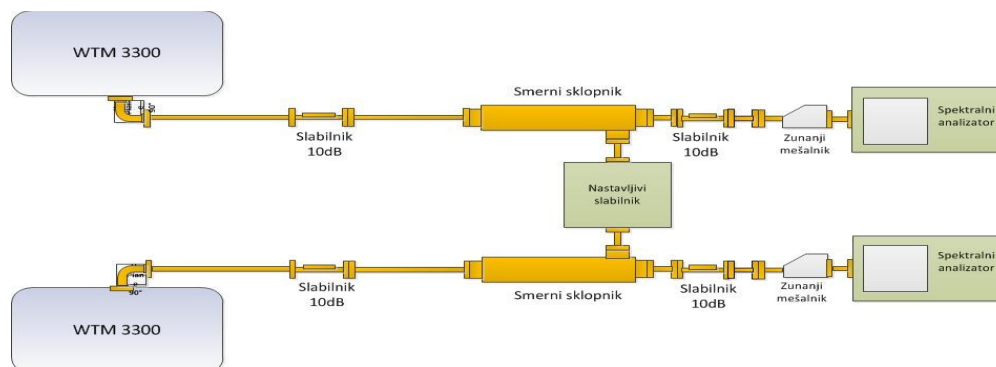
Ko merimo s spektralnim analizatorjem, moramo biti previdni pri nastavljanju medfrekvenčnega in video sita. Medfrekvenčno IF sito je prepustno sito, ki se nahaja pred detektorjem. Tako sito določa frekvenčno ločljivost signala. Z nastavljanjem medfrekvenčnega sita nastavljamo ločljivost in čas preleta frekvenčnega področja. Takoj za detektorjem je nizkoprepustno video sito, s katerim povprečimo in gladimo signal ter zmanjšamo šum.

Če pri merjenju neželene oddaje video in medfrekvenčno sito nista ustrezno nastavljena, lahko opazimo »lažni« signal.

4.3 Spektralne maske

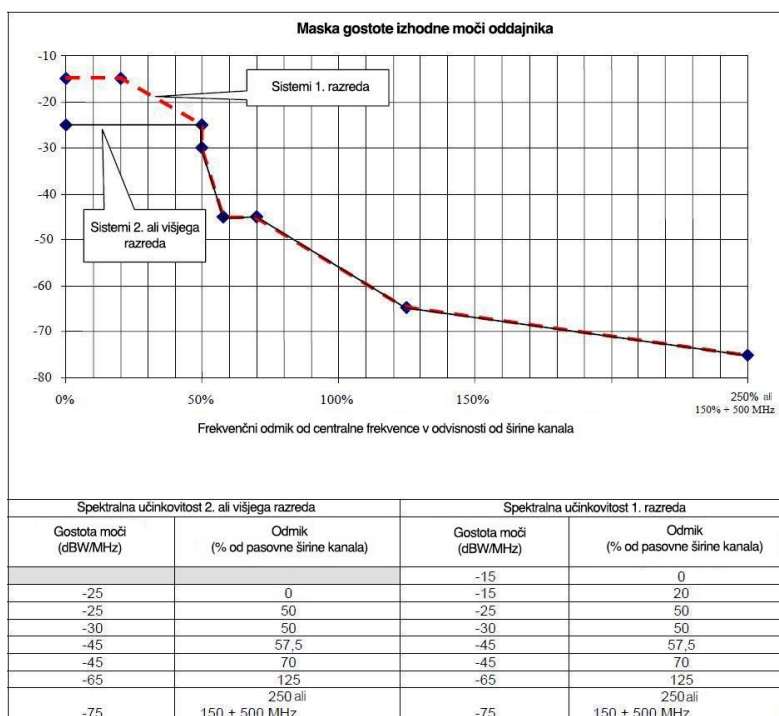
Dovoljeno sevanje oddajnika na frekvencah izven določene pasovne širine določa spektralna maska (angl. Spectrum Mask). Omejitve spektralne maske so odvisne od nastavljene modulacije. S spektralno masko lahko opazimo tudi morebitno odstopanje oddajne frekvence in nelinearnost oddajnika.

Na izhod oddajnika povežemo preko zunanjega mešalnika spektralni analizator. Pri nastavljeni maksimalni moči merimo oddajni spekter. Enako kot pri merjenju neželenih oddaj moramo biti pozorni na nastavljena video in medfrekvenčna sita.



Slika 16: Vezava inštrumentov za merjenje spektralne maske oddajnika

V evropskem standardu ETSI EN 302 217-3 v 1.3 1, aneks UC za fiksne radijske sisteme na področju E-band so definirane spektralne maske. Merimo jih na območju zrcalno od centralne frekvence do 250% pasovne širine (slika 12). Omejitve za oddajo so različne za vsako modulacijo. Za modulacijo QPSK je ta manj stroga, saj takrat oddajnik seva z največjo močjo, za modulacijo QAM 16 in višje pa je gornja meja oddaje strožja. Okvir za maske je prikazan na spodnji sliki .



Slika 17: Spektralna maska oddajnika na področju E-band

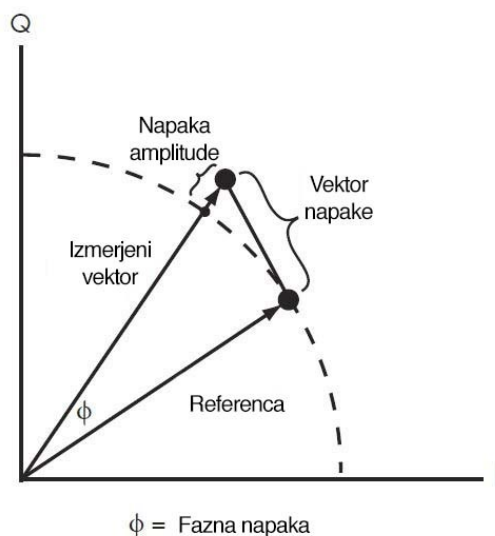
4.4 Jakost vektorja napake

Za oceno večnivojskih in večfaznih modulacij, kot sta M-QAM in M-PSK, izmerimo jakost vektorja napake (angl. Error Vector Magnitude), ki upošteva amplitudno in fazno popačenje signala. To je parameter, ki nam poda neko sliko, kako dober je oddajnik.

Na spodnji sliki je narisani IQ-diagram, v katerem sta referenčni in izmerjeni vektor modулacije. Razlika med njima predstavlja vektor napake. Jakost tega vektorja izračunamo kot razmerje med močjo, ki jo ima vektor napake P_{napake} ter močjo idealnega vektorja $P_{\text{referenčni}}$.

$$\text{EVM [dB]} = 10 \log \left(\frac{P_{\text{napake}}}{P_{\text{referenčni}}} \right), \quad (3)$$

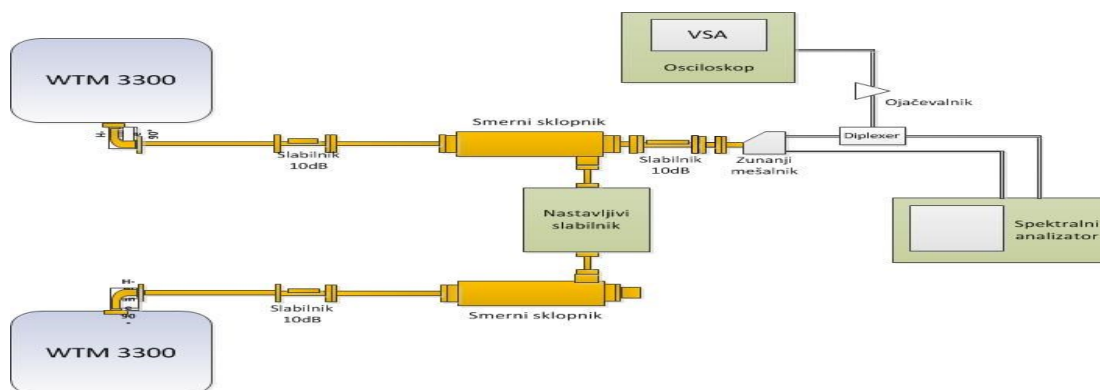
ali
$$\text{EVM [\%]} = \sqrt{P_{\text{napake}} / P_{\text{referenčni}}} * 100 \quad (4)$$



Slika 18: Jakost vektorja napake

Za meritev vektorja napake potrebujemo diplexer, ojačevalnik, zunanji mešalnik, spektralni analizator in osciloskop. Vezava merilnih inštrumentov je prikazana na spodnji sliki. Izhodni signal oddajnika peljemo preko zunanjega mešalnika v diplexer, na katerega povežemo tudi spektralni analizator. LO frekvenca spektralnega analizatorja se v diplexerju meša s signalom oddajnika. Dobljeno IF frekvenco naprej peljemo preko ojačevalnika na

osciloskop, na katerem je programska oprema VSA. Končno ta izračuna EVM, amplitudno in fazno napako ter odstopanje frekvence.



Slika 19: Vezava merilnih inštrumentov za meritev vektorja napake

5 Radijski sprejemnik

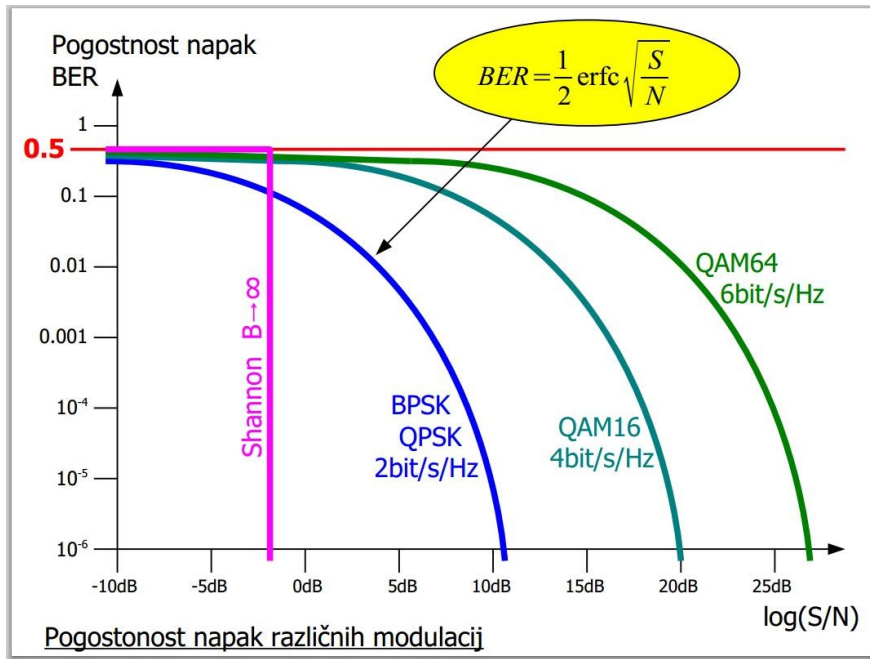
5.1 Prag sprejemnika

V radijski zvezi skušamo izvorni signal preslikati v želeni visokofrekvenčni signal. To lahko naredimo s kodiranjem ali modulacijo izvornega signala. Na ta način dobimo signal, ki je manj občutljiv na nelinearnosti ojačevalnika v oddajniku. Na drugi strani zveze je potrebno ta signal demodulirati. Najenostavnejši modulaciji sta amplitudna in frekvenčna. Pri amplitudni modulaciji oddajamo tudi nosilec, saj tako dosežemo enostavnejšo demodulacijo. Amplitudna modulacija z nosilcem ima izhodno razmerje signal–šum dosti slabše od visokofrekvenčnega razmerja signal–šum. Če pade jakost signala (ang. Receive Signal Strength Indicator) na vrednost, pri kateri je razmerje signal–šum okoli 10 dB, se delovanje demodulatorja poruši in zveza pade. Tik preden razmerje signal–šum doseže minimalno vrednost in zveza pade, jakost sprejetega signala doseže nivo, pri katerem še vedno sprejema. Tej vrednosti rečemo prag sprejemnika (ang. Receiver Threshold). Frekvenčni demodulatorji z znižanim pragom delujejo tudi pri razmerjih okoli 5dB.

Na primer, pri simetrični modulaciji BPSK z dvema različnima kazalcema je meja odločanja sprejemnika premica. V odvisnosti od tega, na kateri strani premice se nahaja konica kazalca, se sprejemnik odloči za logično enko oziroma logično ničlo. Pri tako načrtovanem sprejemniku, kadar je meja odločanja simetrična, je verjetnost napake obeh vrst enaka. Izračunamo jo z matematično funkcijo $\operatorname{erfc}(x)$, ki jo dobimo tabelirano.

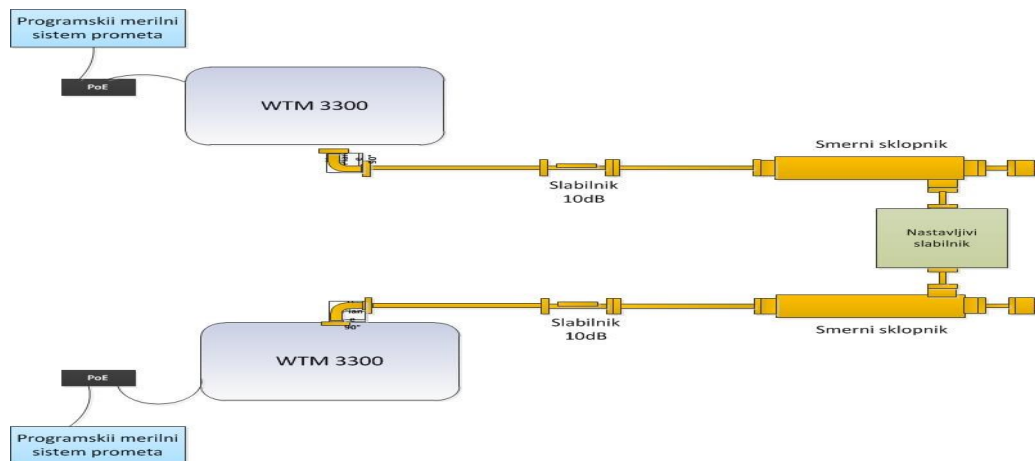
$$P = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{S}{N}} \right) \quad (5)$$

Pogostost napak za različne vrste modulacij je prikazana na spodnji sliki.



Slika 20: Pogostost napak v odvisnosti od modulacije

Prag sprejemnika izmerimo, kadar je število bitnih napak dovolj veliko. Jakost signala, pri kateri pogostost bitnih napak (ang. Bit Error Rate) doseže vrednost 10^{-6} , lahko smatramo kot prag sprejemnika.



Slika 21: Vezava merilnih inštrumentov za merjenje praga sprejemnika

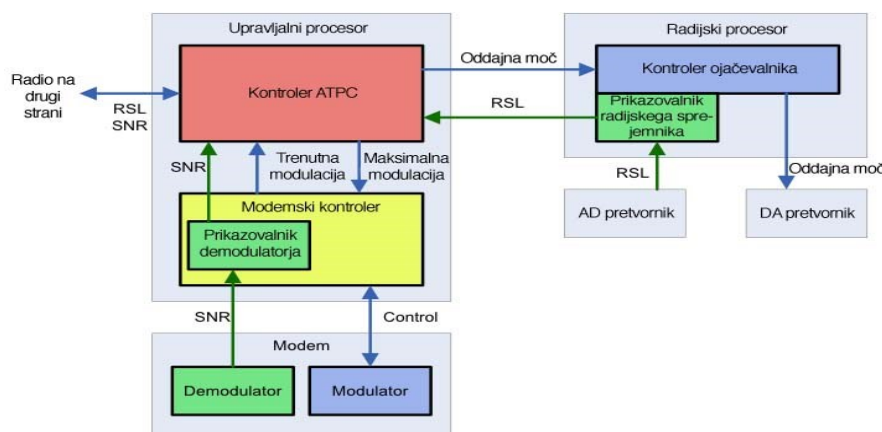
Vezava merilnih inštrumentov je prikazana na zgornji sliki. Prag sprejemnika merimo pri vzpostavljeni zvezi z maksimalno oddajno močjo. Z nastavljanjem slabilnika spreminjamo jakost sprejemnega signala na radijski enoti. To ponavljamo in opazujemo FER (angl. Frame Error Rate). Ko ta doseže 0,05% celotnega prometa je pogostost bitnih napak okoli 10^{-6} . Pri tem nivoju signala je sprejemnik dosegel svoj prag oz. vrednost, pri kateri sprejemnik še

sprejema ter obdeluje promet. Takrat je zveza še zmeraj delujoča. Če je jakost sprejemnega signala nižja od določenega praga, zveza ni delujoča in je potrebno zmanjšati izgube na radijski poti.

6 Radijski sistem

6.1 ATPC

Samodejno nastavljanje izhodne moči (ATPC – angl. Automatic Transmit Power Control) dosežemo s kontrolno povratno zanko. Za delovanje kontrolne zanke izhodne moči potrebujemo tri programske enote: upravljalno, radijsko in modemsko programsko enoto.



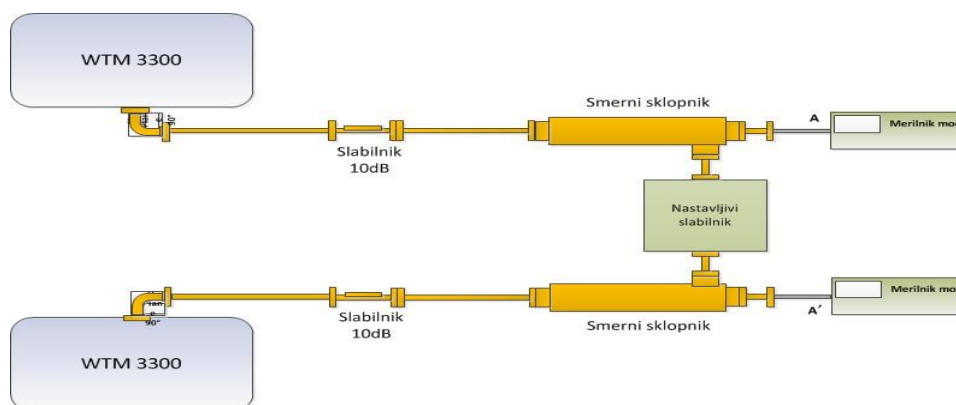
Slika 22: Programske enote kontrolne zanke za ATPC

V upravljalni enoti, ki je najbolj pomembna za lokalni radio, je ATPC kontroler, ki komunicira z upravljalno enoto na drugi strani zveze. Tako pridobi potrebne podatke o sistemu na drugi strani zveze, in sicer jakost sprejetega signala (angl. Receive Signal Strength) in razmerje signal–šum (angl. Signal to Noise Ratio). Na podlagi teh in nastavljene rezervne marže (angl. Fade Margin) se nato odloči, ali je potrebna nastavitev izhodne moči.

ATPC kontroler se odloča o nastavljanju moči tudi na podlagi lastnega nivoja sprejetega signala in razmerja signal–šum. Analogno-digitalni pretvornik (angl. Analog Digital Converter) preko serijske povezave sporoči ATPC kontrolerju, kakšna je trenutna vrednost jakosti sprejetega signala. Ta preveri, ali se je zgodila večja sprememba, in v primeru, da se je, ustrezno nastavi moč. Podobno demodulator bere razmerje signal–šum iz modema in o

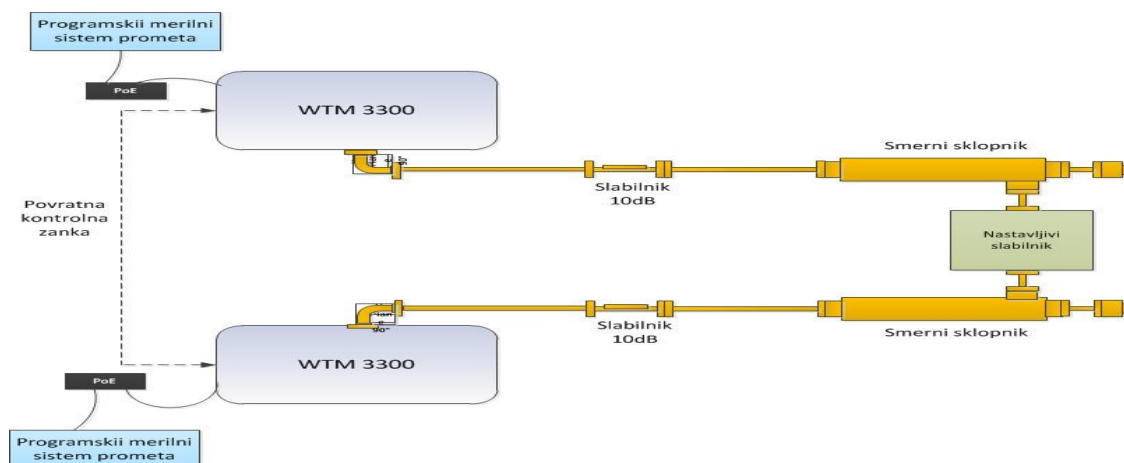
tem obvešča ATPC kontroler, ki se nato odloči o nastavljanju izhodne moči oddajnika, v kolikor je to potrebno. Upravljalna enota oba parametra posreduje sistemu, ki se nahaja na drugi strani zveze.

Delovanje kontrolne zanke ATPC lahko preverimo ročno ali avtomatsko. Vezava merilnih inštrumentov za ročno preverjanje ATPC je prikazana na spodnji sliki. Merilnik moči povežemo na oddajnik in spreminjamo slabljenje na nastavljivem slabilniku. Na zaslonu merilnika opazujemo, kako se ATPC spreminja v odvisnosti od nivoja sprejetega signala in razmerja signal–šum.



Slika 23: Vezava merilnih inštrumentov za ročno preverjanje kontrolne zanke ATPC

Za avtomatsko preverjanje ATPC potrebujemo tudi programsko opremo za merjenje prometa. Pri vzpostavljeni radijski zvezi nastavimo slabilnik tako, da je jakost sprejetega signala dovolj visoka in da je izhodna moč oddajnika minimalna. Z zveznim večanjem slabljenja potem opazujemo, kako se spreminja oddajna moč. Ta prehod mora biti brezhiben in brez izgub prometa, ki ga izmerimo s pomočjo programske merilne opreme.

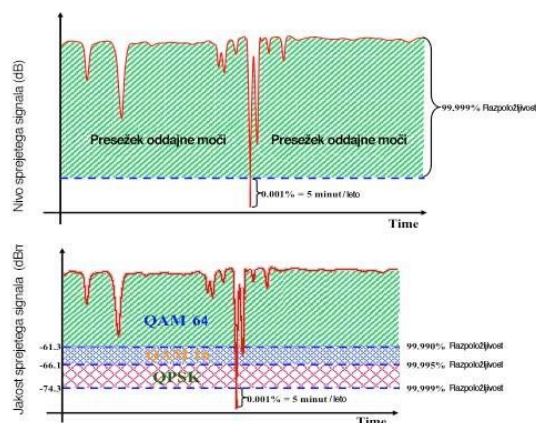


Slika 24: Vežava merilnih inštrumentov za avtomatsko preverjanje kontrolne zanke ATPC

6.2 ACM

Radijsko zvezo običajno načrtujemo tako, da bo 99,999% časa pravilno delovala brez izgube paketov. Z nastavljanjem rezervne marže (ang. Fade margin) zaščitimo zvezo pred izpadi. Ker je ta uporabljena le nekaj minut letno, jo lahko v preostalem času izkoristimo za večanje pasovne širine. To dosežemo z adaptivnim nastavljanjem modulacije (ang. Adaptive Coding and Modulation).

Mehanizem nastavljanja adaptivne modulacije deluje tako, da pri slabih pogojih kanala nastavi nižjo, bolj robustno modulacijo, in nasprotno, če so pogoji zveze dobri, se odloči za višjo modulacijo z večjo kapaciteto. Na tak način dosežemo zelo dober izkoristek kapacitete in neprekinjeno delovanje zveze. Prehod med modulacijami mora biti gladek, brez izgub paketov. Na spodnji sliki je prikazana uporaba adaptivne modulacije. Večino časa je bila nastavljena najvišja modulacija, in sicer QAM64, pri slabih pogojih pa QPSK, ki je delovala le 0,001% časa.

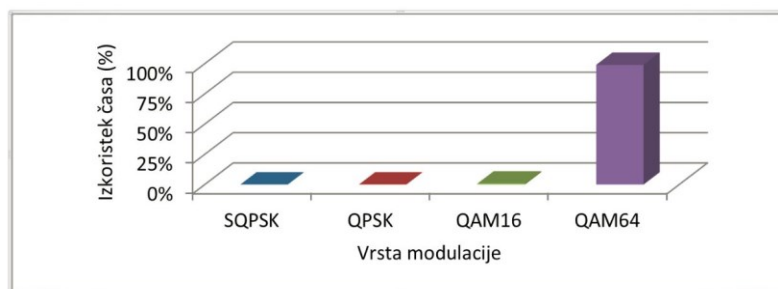


Slika 25: Delovanje zveze z omogočenim ACM

V tabeli je prikazan še en primer uporabe adaptivne modulacije. Vidimo, da je najnižja modulacija Strong QPSK uporabljena le 0,049% časa, saj je večino časa bila nastavljena modulacija z največjo zmogljivostjo, in sicer QAM64. V tem primeru je mehanizem ACM narejen tako, da loči med prioritetai modulacije, ker se promet z najvišjo prioriteto ne sme zgubiti. Iz tabele je razvidno tudi, da ima le 20% celotnega prometa lahko najvišjo prioriteto, ostalemu prometu pa se sorazmerno razdelijo nižje prioritete.

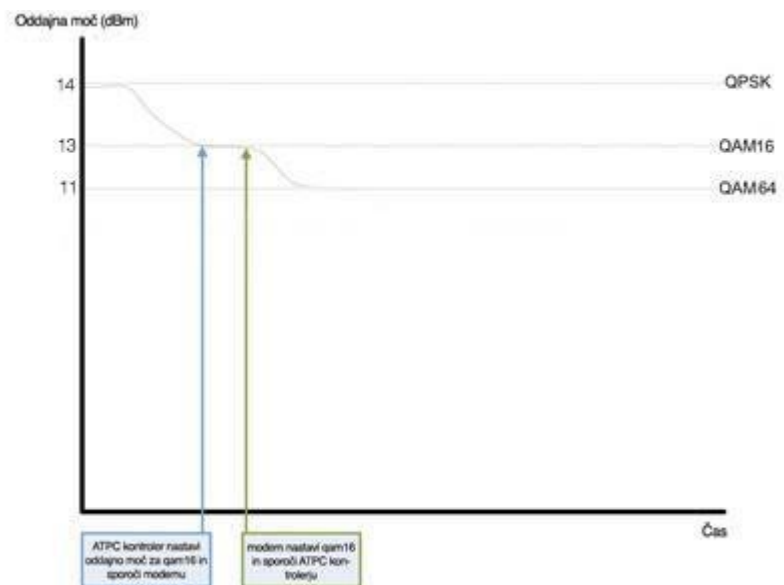
Tabela 2: Uporaba adaptivne modulacije

Modulacija	Hitrost prenosa (Mbit/s)	Dolžina poti (km)	Razpoložljivost (%)	Izkoristek časa (%)	Izkoristek časa (min)
SQPSK	200 Mbit/s	2,5 km	99,999%	0,049%	258 min
QPSK	360Mbit /s	2,5 km	99,995%	0,050%	263 min
QAM16	630 Mbit/s	2,5 km	99,990%	0,900%	4730 min
QAM64	1000 Mbit/s	2,5 km	99,900%	99,000%	520344 min
Povprečna hitrost prenosa	547 Mbit/s			Čas izpada	5 min



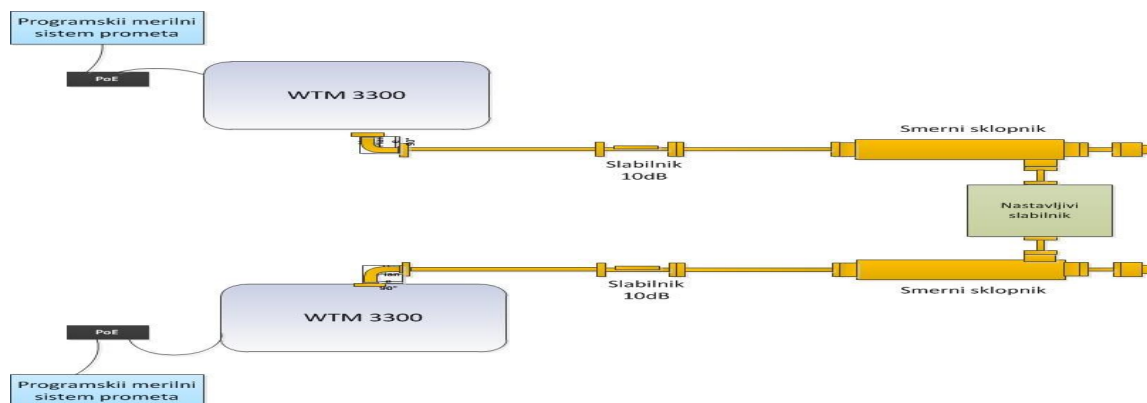
Slika 26: Izkoristek časa pri omogočenim ACM

Za pravilno delovanje ACM je potrebno tudi omogočeno delovanje ATPC, saj so maksimalne moči različne v odvisnosti od modulacije. Na spodnjem grafu je prikazan preklop med modulacijami in njemu ustrezno nastavljanje moči. ATPC kontroler najprej nastavi potrebno moč in o tem sporoči modemu, ki nato izbere ustrezno modulacijo.



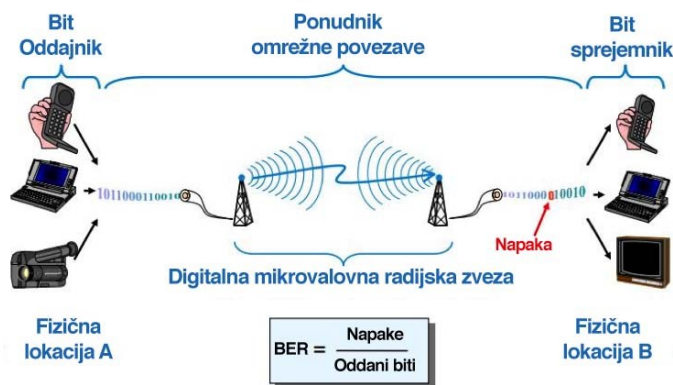
Slika 27: Delovanje zveze z omogočenima ACM in ATPC

Pravilno delovanje ACM preverimo pri vzpostavljeni radijski zvezi. S slabilnikom, ki ga postavimo med dve enoti, spreminjamo slabljenje poti. Na grafičnem vmesniku potem opazujemo, kako se spreminja izhodna moč, ter preverjamo pravilno nastavljanje ustrezne modulacije.



Slika 28: Vezava merilnih instrumentov za preverjanje avtomatske modulacije

6.3 Residualni BER

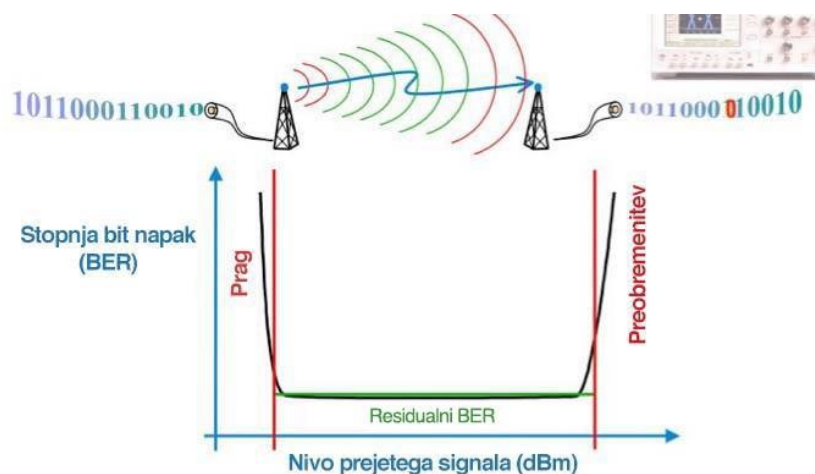


Slika 29: Pogostost napak v digitalni radijski zvezi

Kakovost storitev izračunamo z razmerjem med napačno-prenesenimi bitovi in vsoto vseh poslanih bitov v digitalni zvezi, ki mu pravimo pogostost pojavljanja napak ali BER (ang. Bit Error Rate). V odvisnosti od vrste storitve je vrednost dovoljenega BER-a različen. Na primer za govorne storitve je dovoljeni BER relativno velik, okoli 10^{-3} . Pri računalniškem prenosu pa se ta spreminja med 10^{-12} in 10^{-6} . Za bančne in podobne storitve so zahteve zelo stroge, za vsakdanje brskanje po spletu pa večja pogostost napak ni težava.

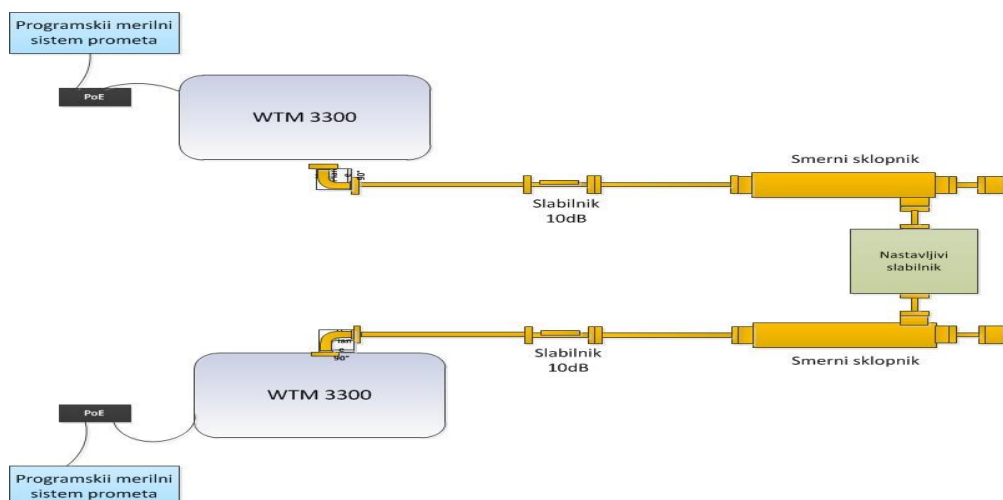
V mikrovalovni zvezi se pogostost pojavljanja napak spreminja v odvisnosti od jakosti sprejetega signala (ang. Received Signal Level). Nizek sprejemni nivo povzroča veliko bitnih napak, in nasprotno, pri visokih nivojih sprejetega signala je število bitnih napak skoraj zanemarljivo. Vrednosti, pri kateri se število bitnih napak začne znatno spreminjati, pravimo prag sprejetega signala.

Kadar je jakost sprejetega signala dovolj višja od praga (okoli 10 dB), je pogostost napačno prenesenih bitov zanemarljiva. Število bitnih napak je takrat najmanjše. V radijski zvezi je taka vrsta bitnih napak znana tudi kot residualni BER (ang. Residual Bit Error Rate).



Slika 30: Odvisnost BER-a od jakosti sprejetega signala

Za merjenje tovrstnih napak potrebujemo precej časa. Priporočljivo je, da je čas merjenja vsaj nekoliko dni. Najbolje je meriti na vseh temperaturah, na katerih je zagotovljeno pravilno delovanje naprave oziroma na prehodih teh temperatur. Residualni BER merimo s programsko opremo za merjenje prometa, in sicer kadar je sprejemni nivo okoli 10 dB nad pragom sprejemnika. Zahteve za merjenje residualnega BER-a so, da je ta največ 10^{-12} od maksimalne jakosti sprejetega signala pa vse do preobremenitve sprejemnika (10 dB nad določenim pragom). Namestitvev inštrumentov za tako merjenje je prikazana na spodnji sliki.



Slika 31: Vezava merilnih inštrumentov za preverjanje residualnega BER-a

7 Rezultati meritev

7.1 Oddajnik

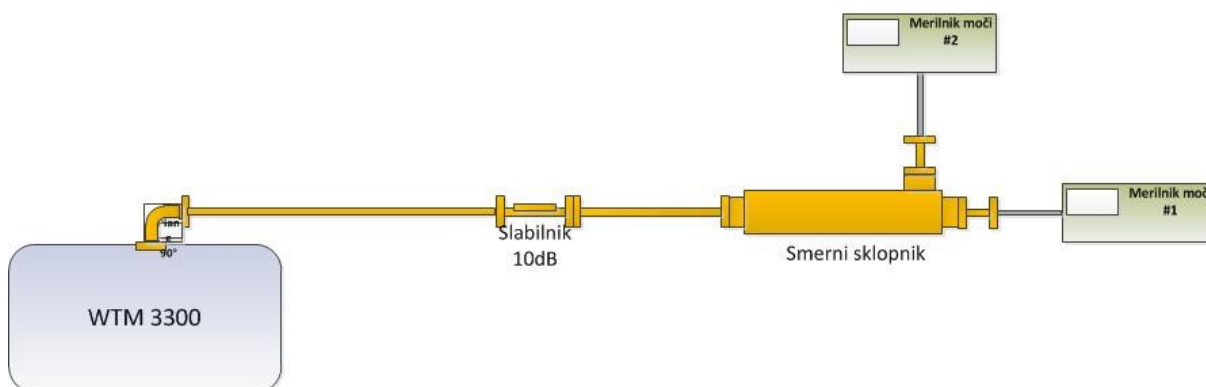
Fiksni in nastavljivi slabilniki, smerni sklopniki in prenosni vodi prinašajo izgube na poti od oddajnika do sprejemnika, ki jo umerimo pred začetkom merjenja. Ker so izgube nastavljivih slabilnikov odvisne od frekvence in nastavljene vrednosti slabljenja, dejansko slabljenje na vsaki frekvenci in pri vsaki nastavljeni vrednosti izmerimo posebej. Da bi dobili slabljenje celotne radijske poti, takšnemu slabljenju prištejemo še izgube fiksnih valovodov. Za meritve ki jih bomo izvajali, potrebujemo dve vrsti kalibracije. Za validiranje parametrov pri vzpostavljeni zvezi moramo oceniti izgube od oddajnika preko sosmernega sklopa in variabilnega slabilnika do sprejemnika. Merilnik moči in spektralni analizator za validiranje parametrov oddajnika postavimo na izhodu smernega sklopnika. V tem primeru pomerimo slabljenje poti od izvora do merilnega inštrumenta.

Za umerjanje radijske poti potrebujemo nek izvor moči, ki oddaja na željeni frekvenci. Področje E-band je specifično in ker nimamo generatorja, ki bi oddajal na tej frekvenci, kot izvor moči lahko uporabimo kar radijsko enoto. Le-ta pa ni brezhibni signalni generator in zato kalibriramo z dvema merilnikoma moči, od katerih enega vzamemo kot referenco.

Na spodnjih slikah so prikazane sheme obeh vrst kalibracij. Ker običajno merimo parametre le na najnižji, srednji in najvišji frekvenci, umerimo radijske poti le na teh frekvencah.

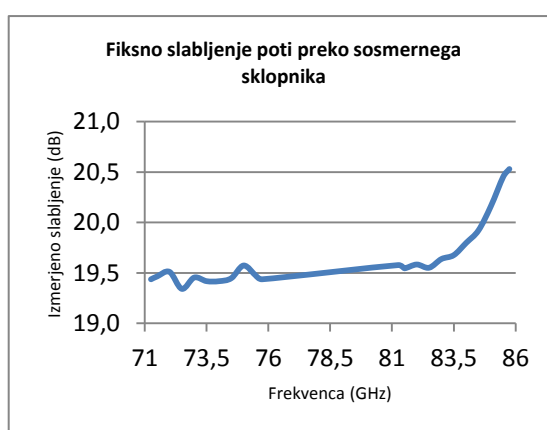
Za kalibracijo trase, kot je narisana na spodnji sliki, potrebujemo dva merilnika moči. Moč merimo na sosmernem sklopu in na izhodu smernega sklopnika. Izgube na taki radijski poti izračunamo s primerjavo pomejenih moči na obeh merilnikih. Slabljenje valovoda in fiksnega slabilnika izračunamo tako, da moči na merilniku #2 odštejemo vsoto moči na merilniku #1 in izgube sosmernega sklopa.

Na podoben način ocenimo tudi slabljenje variabilnega slabilnika, ki je predstavljen na sliki 36. Z merilnikom moči #2 izmerimo izgube od izvora do sosmernega sklopa, z merilnikom #1 pa izgube valovodov in nastavljivega atenuatorja. Ko moči #2 odštejemo vsoto moči #1 in slabljenje sosmernega sklopa, dobimo dejansko vrednost slabljenja variabilnega slabilnika. Z njo nato računamo pri merjenju.

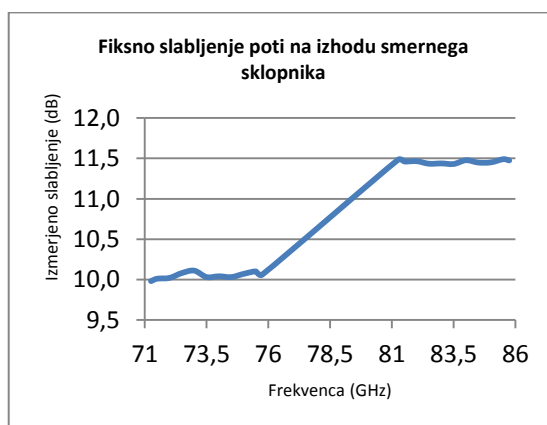


Slika 32: Vezava merilnih instrumentov za kalibracijo valovodov in smernega sklopnika

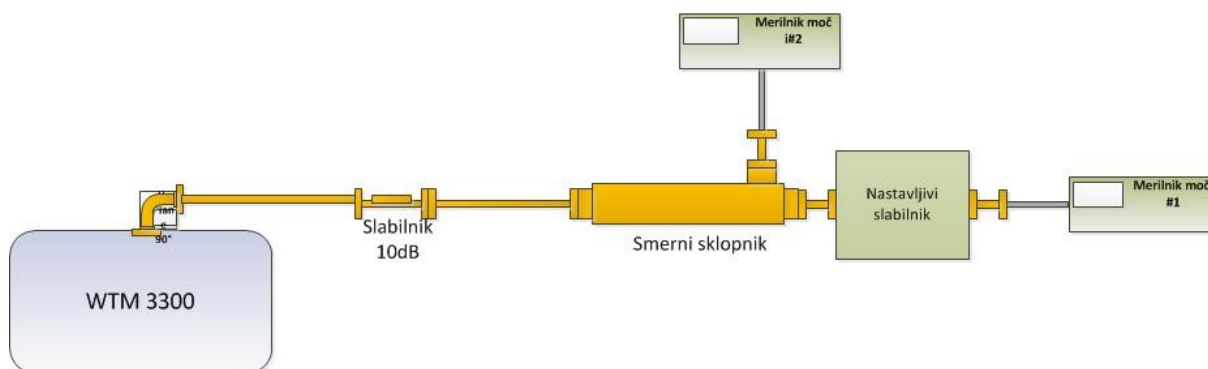
Na spodnjih slikah so prikazane fiksne izgube valovodov in smernih sklopnikov.



Slika 33: Fiksno slabljenje radijske poti preko sosmerne sklopnika

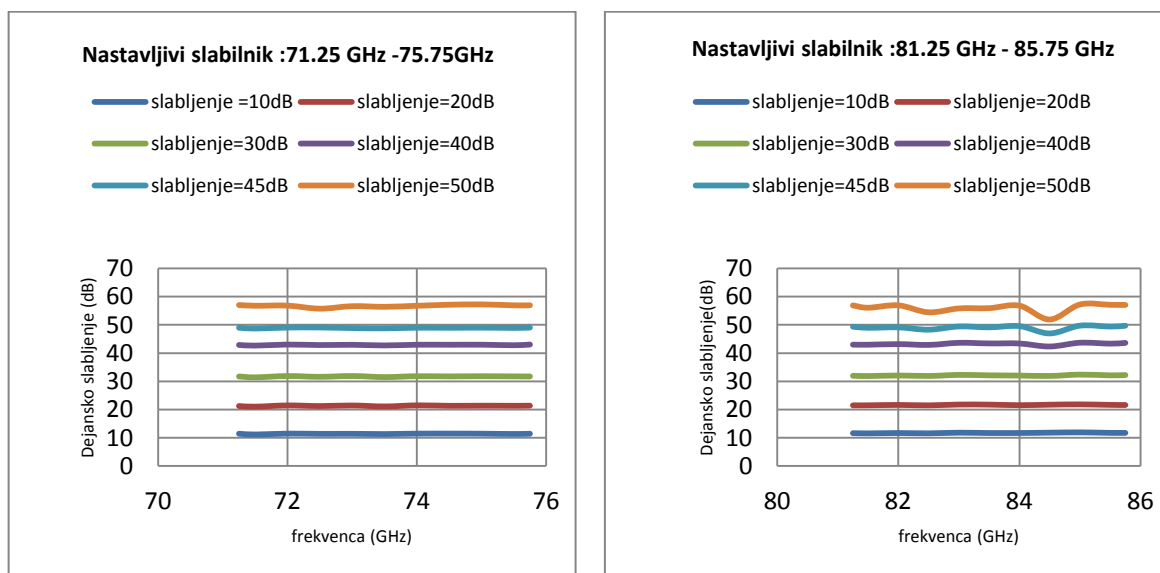


Slika 34: Fiksno slabljenje radijske poti na izhodu smerne sklopnika



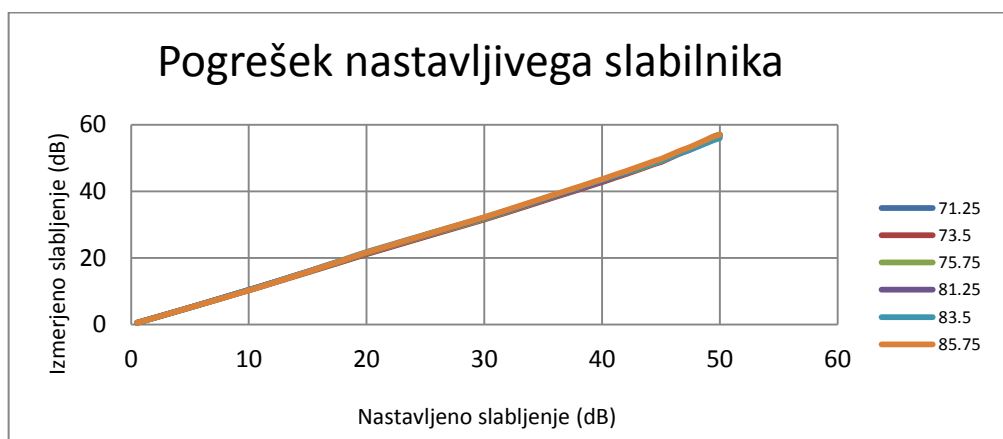
Slika 35: Vezava merilnih inštrumentov za kalibracijo nastavljivega slabilnika

Rezultati umerjanja nastavljivega slabilnika so prikazani na spodnjih grafih, iz katerih je razvidno tudi, da je slabljenje takega slabilnika frekvenčno odvisno.



Slika 36: Frekvenčna odvisnost slabljenja nastavljivega slabilnika

Na spodnji sliki je prikazano odstopanje slabljenja nastavljivega slabilnika na različnih frekvencah. Na x-osi je predstavljeno slabljenje, ki je nastavljeno, na y-osi pa izmerjeno slabljenje. Vidimo, da so izmerjene vrednosti različne na vseh frekvencah.



Slika 37: Izgube nastavljivega slabilnika

Ko enkrat umerimo vse valovode, smerne sklopnike, slabilnike in kombinacije le-teh, lahko začnemo meriti. Najbolj pomembno je preveriti izhodno moč oddajnika, ki jo dobimo iz vsote izmerjene moči na izhodu sklopnika in izgube poti. Absolutna razlika med izmerjeno in nastavljeno oddajno močjo po standardu za fiksne radijske sisteme ne sme presežati 3 dB. Merimo na najnižji, srednji in najvišji frekvenci.

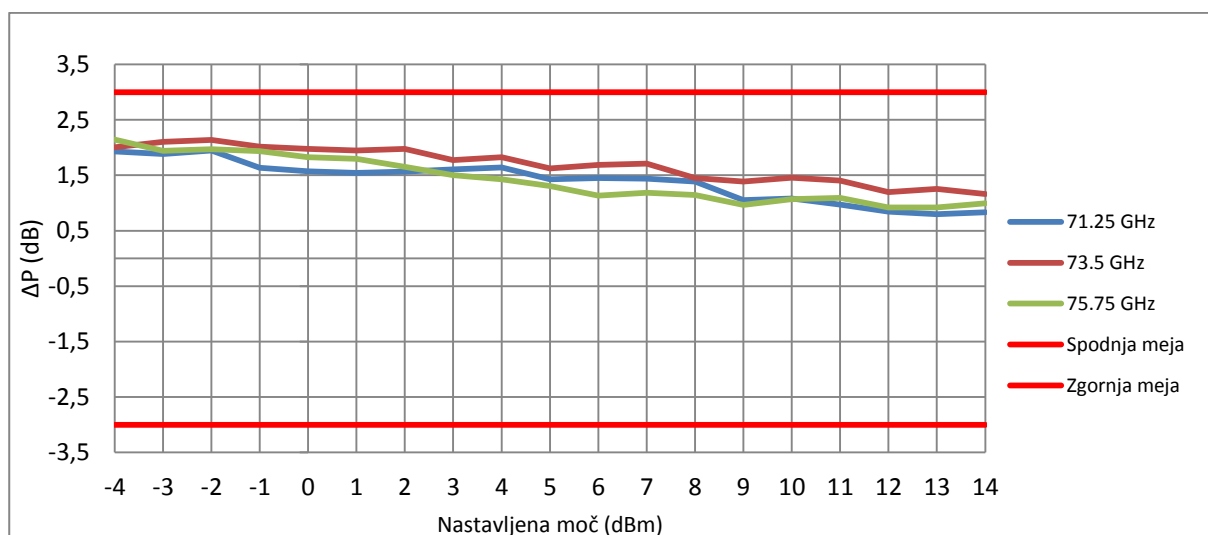
Pri merjenju izhodnih moči smo uporabili merilnik N1913A, ki ima merilno območje od -70 dBm do +44 dBm na frekvenčnem področju od 9 kHz do 110 GHz. Merilna glava, s katero smo merili moč, W8486A se načeloma uporablja za meritve na področju W-band od 75 GHz do 110 GHz. Ker je pogrešek take merilne glave na frekvencah od 70GHz do 75 GHz zanemarljiv, jo lahko izkoristimo za meritve na področju E-band. Ker valovodni priključek merilne glave W8486A, WR-10 ne ustreza valovodnemu priključku smernega sklopnika, WR-12, ju povežemo z valovodnim prehodom. Merilna glava je diodna in lahko meri moči od -30 dBm do +20 dBm.

V tabeli so prikazane meritve oddajne moči WTM3300 na sobni temperaturi z nastavljeno najnižjo QPSK modulacijo. Izmerjene so vse moči, od najnižje do najvišje, s korakom 1 dBm in izračunano je njihovo odstopanje, ki je grafično prikazano na sliki.

Tabela 3: Izmerjena moč oddajnika na sobni temperaturi

Nastavljena moč (dBm)	Izmerjena moč (dBm)	ΔP (dB) (Izmerjena moč - Nastavljena moč)	Nastavljena moč (dBm)	Izmerjena moč (dBm)	ΔP (dB) (Izmerjena moč - Nastavljena moč)	Nastavljena moč (dBm)	Izmerjena moč (dBm)	ΔP (dB) (Izmerjena moč - Nastavljena moč)
71,25 GHz			73,5 GHz			75,75 GHz		

-4,00	-2,07	1,93	-4,00	-2,00	2,00	-4,00	-1,86	2,14
-3,00	-1,11	1,89	-3,00	-0,89	2,11	-3,00	-1,06	1,94
-2,00	-0,05	1,95	-2,00	0,14	2,14	-2,00	-0,03	1,97
-1,00	0,63	1,63	-1,00	1,02	2,02	-1,00	0,94	1,94
0,00	1,57	1,57	0,00	1,98	1,98	0,00	1,83	1,83
1,00	2,54	1,54	1,00	2,95	1,95	1,00	2,80	1,80
2,00	3,57	1,57	2,00	3,98	1,98	2,00	3,65	1,65
3,00	4,61	1,61	3,00	4,77	1,77	3,00	4,50	1,50
4,00	5,64	1,64	4,00	5,83	1,83	4,00	5,43	1,43
5,00	6,43	1,43	5,00	6,63	1,63	5,00	6,30	1,30
6,00	7,45	1,45	6,00	7,69	1,69	6,00	7,13	1,13
7,00	8,44	1,44	7,00	8,71	1,71	7,00	8,18	1,18
8,00	9,39	1,39	8,00	9,45	1,45	8,00	9,14	1,14
9,00	10,05	1,05	9,00	10,39	1,39	9,00	9,96	0,96
10,00	11,08	1,08	10,00	11,46	1,46	10,00	11,07	1,07
11,00	11,97	0,97	11,00	12,40	1,40	11,00	12,09	1,09
12,00	12,85	0,85	12,00	13,20	1,20	12,00	12,92	0,92
13,00	13,80	0,80	13,00	14,26	1,26	13,00	13,92	0,92
14,00	14,83	0,83	14,00	15,16	1,16	14,00	14,99	0,99



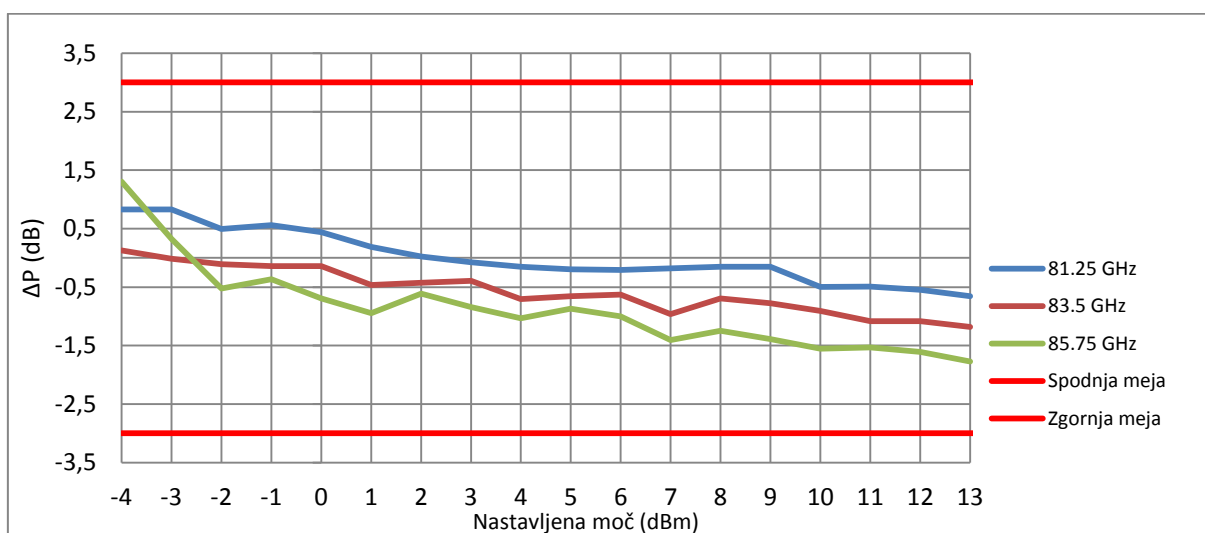
Slika 38: Pogrešek oddajne moči na sobni temperaturi

Meritev ponovimo na najnižji in najvišji temperaturi za vsako modulacijo. V spodnjih tabelah so meritve izhodne moči oddajnika WTM3300 pri QAM16 in QAM64 na ekstremnih temperaturah. Vidimo da so vsi pogreški znotraj določenih meja.

Tabela 4: Izmerjena moč oddajnika na temperaturi $T=-33^{\circ}\text{C}$

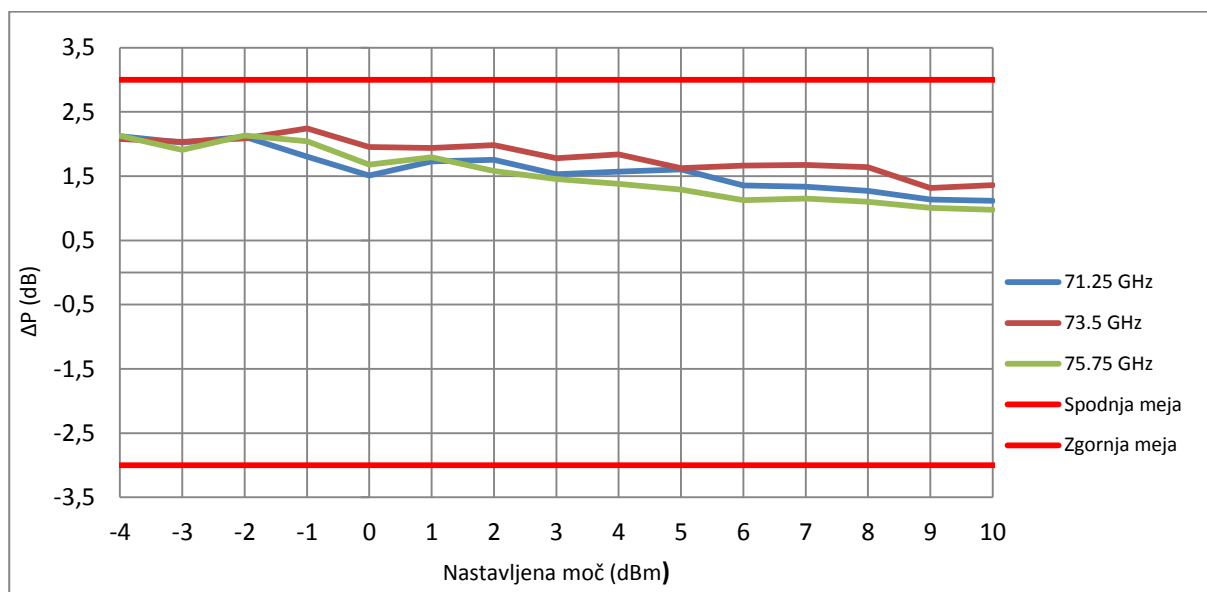
Nastavljena moč (dBm)	Izmerjena moč (dBm)	ΔP (dB) (Nastavljena moč - Izmerjena moč)	Nastavljena moč (dBm)	Izmerjena moč (dBm)	ΔP (dB) (Nastavljena moč - Izmerjena moč)	Nastavljena moč (dBm)	Izmerjena moč (dBm)	ΔP (dB) (Nastavljena moč - Izmerjena moč)
81,25 GHz			83,5 GHz			85,75 GHz		
-4,00	-3,17	0,83	-4,00	-3,87	0,13	-4,00	-2,69	1,31

-3,00	-2,17	0,83	-3,00	-3,02	-0,02	-3,00	-2,67	0,33
-2,00	-1,51	0,49	-2,00	-2,11	-0,11	-2,00	-2,53	-0,53
-1,00	-0,44	0,56	-1,00	-1,14	-0,14	-1,00	-1,36	-0,36
0,00	0,44	0,44	0,00	-0,14	-0,14	0,00	-0,69	-0,69
1,00	1,19	0,19	1,00	0,53	-0,47	1,00	0,06	-0,94
2,00	2,02	0,02	2,00	1,58	-0,42	2,00	1,39	-0,61
3,00	2,92	-0,08	3,00	2,61	-0,39	3,00	2,16	-0,84
4,00	3,85	-0,15	4,00	3,29	-0,71	4,00	2,97	-1,03
5,00	4,81	-0,19	5,00	4,35	-0,65	5,00	4,13	-0,87
6,00	5,79	-0,21	6,00	5,37	-0,63	6,00	5,00	-1,00
7,00	6,82	-0,18	7,00	6,04	-0,96	7,00	5,60	-1,40
8,00	7,85	-0,15	8,00	7,31	-0,69	8,00	6,75	-1,25
9,00	8,85	-0,15	9,00	8,23	-0,77	9,00	7,61	-1,39
10,00	9,50	-0,50	10,00	9,10	-0,90	10,00	8,45	-1,55
11,00	10,51	-0,49	11,00	9,92	-1,08	11,00	9,47	-1,53
12,00	11,45	-0,55	12,00	10,92	-1,08	12,00	10,39	-1,61
13,00	12,34	-0,66	13,00	11,82	-1,18	13,00	11,23	-1,77

Slika 39: Pogrešek oddajne moči na temperaturi $T=-33^{\circ}\text{C}$ Tabela 5: Izmerjena oddajna moč na temperaturi $T=+55$

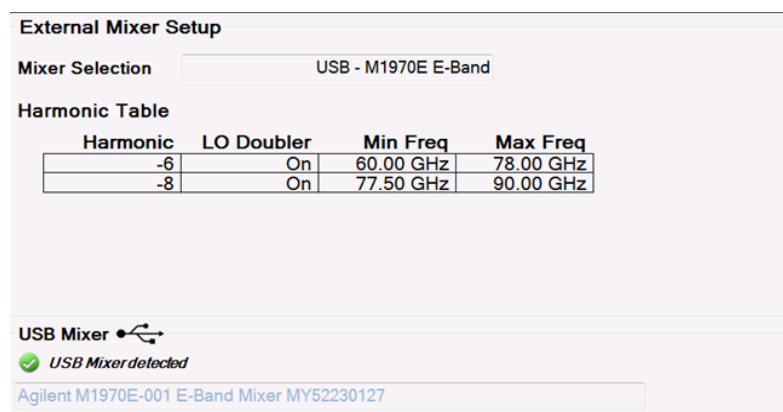
Nastavljen a moč (dBm)	Izmerjen a moč (dBm)	ΔP (dB) (Nastavljen a moč - Izmerjena moč)	Nastavljen a moč (dBm)	Izmerjen a moč (dBm)	ΔP (dB) (Nastavljen a moč - Izmerjena moč)	Nastavljen a moč (dBm)	Izmerjen a moč (dBm)	ΔP (dB) (Nastavljen a moč - Izmerjena moč)
71,25 GHz			73,5 GHz			75,75 GHz		
-4,00	-1,87	2,13	-4,00	-1,92	2,08	-4,00	-1,87	2,13
-3,00	-0,98	2,02	-3,00	-0,96	2,04	-3,00	-1,09	1,91
-2,00	0,11	2,11	-2,00	0,09	2,09	-2,00	0,13	2,13
-1,00	0,80	1,80	-1,00	1,24	2,24	-1,00	1,04	2,04
0,00	1,51	1,51	0,00	1,95	1,95	0,00	1,68	1,68
1,00	2,73	1,73	1,00	2,94	1,94	1,00	2,80	1,80
2,00	3,76	1,76	2,00	3,99	1,99	2,00	3,58	1,58

3,00	4,53	1,53	3,00	4,78	1,78	3,00	4,45	1,45
4,00	5,57	1,57	4,00	5,84	1,84	4,00	5,38	1,38
5,00	6,60	1,60	5,00	6,63	1,63	5,00	6,29	1,29
6,00	7,36	1,36	6,00	7,67	1,67	6,00	7,13	1,13
7,00	8,34	1,34	7,00	8,67	1,67	7,00	8,15	1,15
8,00	9,27	1,27	8,00	9,64	1,64	8,00	9,10	1,10
9,00	10,14	1,14	9,00	10,32	1,32	9,00	10,01	1,01
10,00	11,12	1,12	10,00	11,36	1,36	10,00	10,98	0,98



Slika 40: Pogrešek oddajne moči na temperaturi $T=+55^{\circ}$

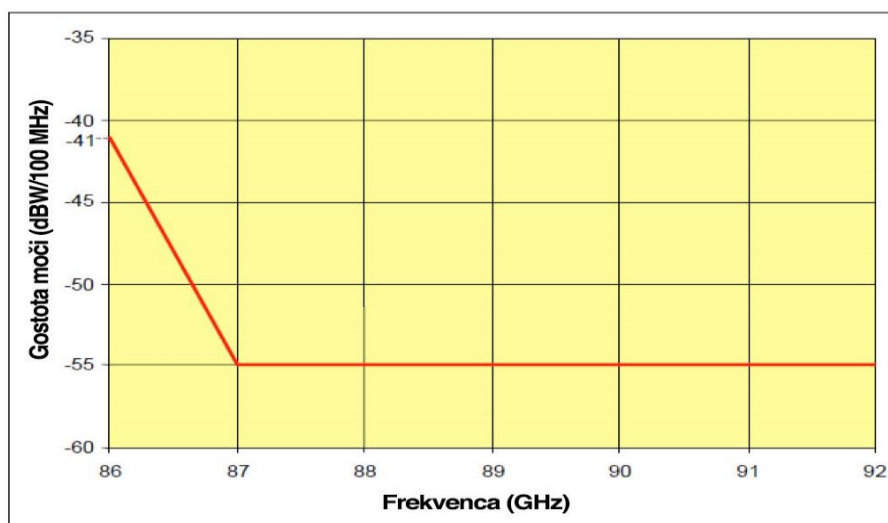
Neželeno sevanje oddajnika izmerimo na spektralnem analizatorju PXA N9030A, ki meri na frekvencah od 3 kHz do 44 GHz. Za razširitev delovnega območja uporabimo zunanji mešalnik M1970, ki za mešanje na področju od 60 GHz do 78 GHz kot LO frekvenco uporablja šesti harmonik, za frekvence od 77.5 GHz do 90 GHz pa osmi harmonik. Oddajo merimo na spektralnem analizatorju preko smernega sklopnika. Da ne bi preobremenili zunanjega mešalnika, ki ima maksimalno vhodno moč 20 dBm, pred vhod postavimo 10 dB slabilnik.



Slika 41: Lo frekvenca spektralnega analizatorja PXA N9030A

Zahteve, da oddajnik ne moti izven dodeljenega spektra so naslednje:

- < 30 dBm/MHz za $33.8 \text{ GHz} < f < 86 \text{ GHz}$
- Linearni naklon od -31 dBm/MHz do -45 dBm/MHz za $86 \text{ GHz} < f < 87 \text{ GHz}$ (slika st.)
- -45 dBm/MHz za $87 \text{ GHz} < f < 92 \text{ GHz}$
- -30 dBm/MHz za $92 \text{ GHz} < f < 2.$ harmonika

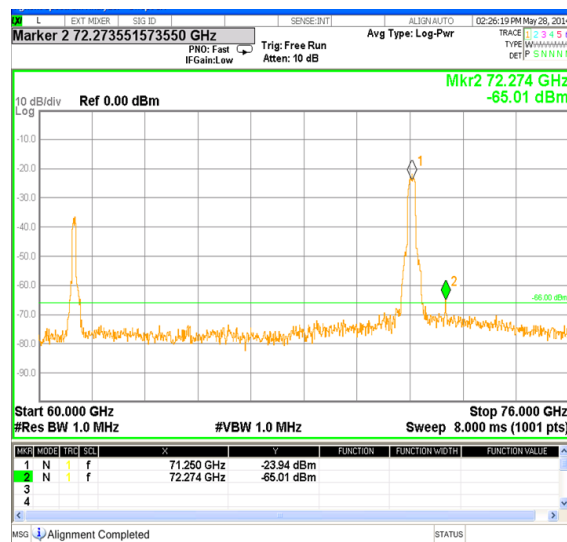


Slika 42: Meja gostote moči oddajnika

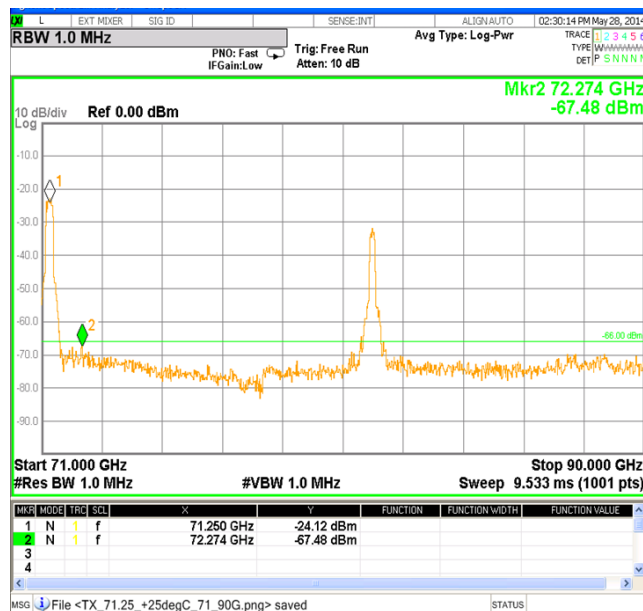
Delovno področje merilne opreme, s katero razpolagamo, je omejeno navzgor do 90 GHz (zunanji mešalnik M1970E, ki meri od 60 GHz do 90 GHz). Zato namesto do drugega harmonika navzgor neželjeno sevanje oddajnika izmerimo le na frekvencah do 90 GHz.

Zahteva za spodnjo frekvenčno mejo v skladu s standardom ETSI EN 301 390 v1.2.1 za merjenje neželene oddaje je vsaj $0.7 \cdot f_{\text{mejna}}$. Frekvenčna meja valovodnega priključka pa je okoli 48 GHz.

Neželeno sevanje oddajnika izmerimo na najnižji, srednji in najvišji frekvenci. Merimo pri nastavljeni modulaciji QPSK, saj je takrat izhodna moč oddajnika največja. Pozorni smo tudi na slabljenje poti od merjenca do merilnega instrumenta, ki ga upoštevamo pri merjenju.



Slika 43: Neželeno emisije WTM3300 na frekvenčnem področju od 60 do 76 GHz



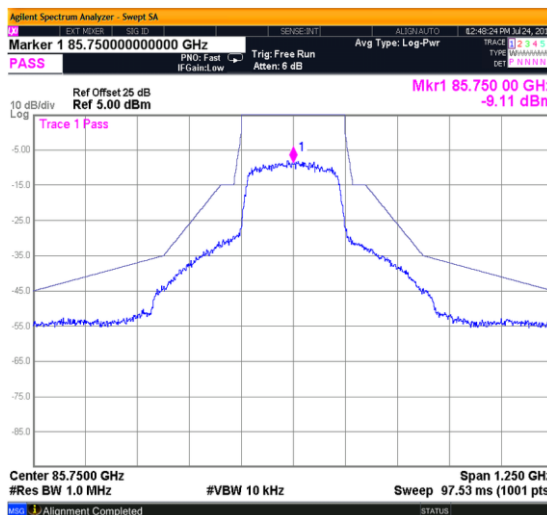
Slika 44: Neželeno emisije WTM3300 na frekvenčnem področju od 71 do 90 GHz

Na slikah so prikazane meritve neželenega sevanja radijske enote WTM3300 na najnižji spodnji frekvenci 71.25 GHz. Opazimo, da enota oddaja tudi na nekaterih drugih frekvencah (marker 2 na sliki 37). Ker nismo prepričani, da radijska enota zares seva neželene signale, to preverimo s funkcijami *signal ID* in *image shift* na spektralnem analizatorju. Če se pojavijo prestavljeni signali na isti frekvenci, lahko trdimo, da so le-ti produkti mešanja zunanega mešalnika M1970E.

Oddajno masko merimo na spektralnem analizatorju s pomočjo zunanega mešalnika. Pomembno je, da pravilno nastavimo odmik na y-osi na zaslonu spektralnega analizatorja. Referenčni nivo odmika na tej osi predstavlja slabljenje od merjenca do merilnega inštrumenta. Masko sevanja merimo pri največji nastavljeni moči za vsako modulacijo.

Na spodnji sliki je primer izmerjene maske na WTM3300 z nastavljeno modulacijo QPSK, ki doseže maksimalno moč 14 dBm. Referenčni odmik na y-osi 25 dB je slabljenje poti od oddajnika do zunanega mešalnika.

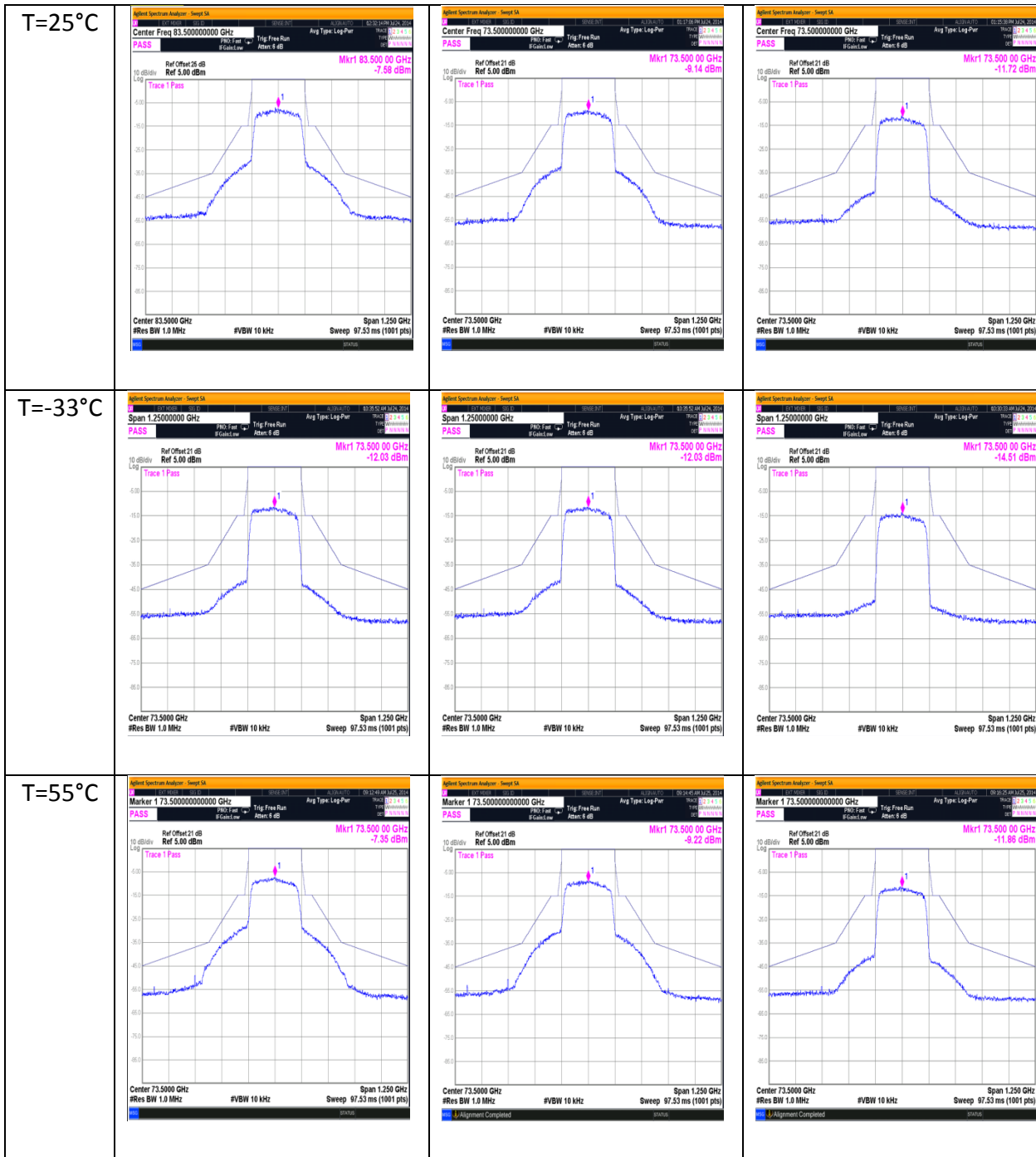
V tabeli so meritve mask na radijski enoti WTM3300 na treh frekvencah in na treh temperaturah.



Slika 45: Spektralna maska oddajnika na 85.75 GHz

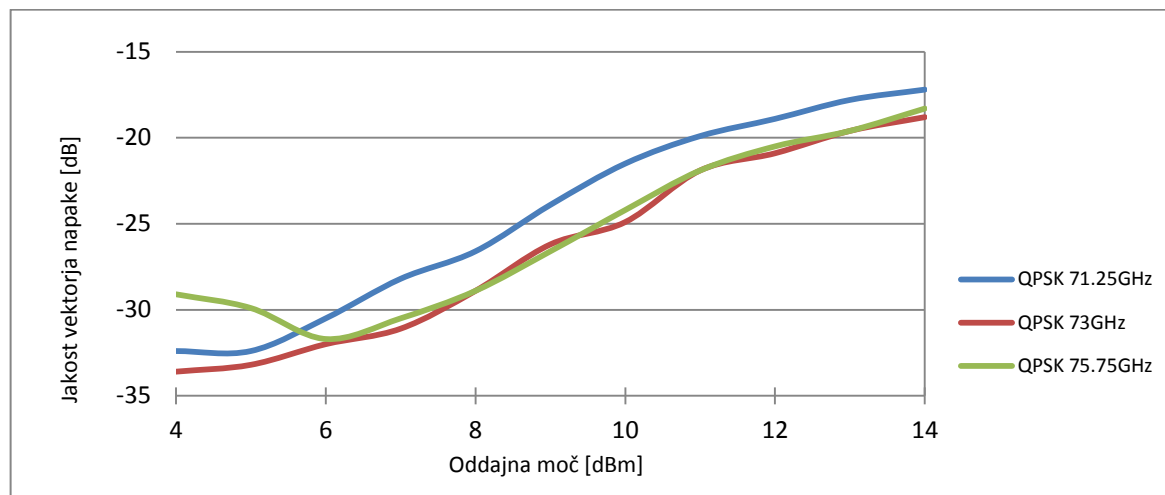
Tabela 6: Spektralne maske WTM3300

	QPSK	QAM 16	QAM 64
--	------	--------	--------

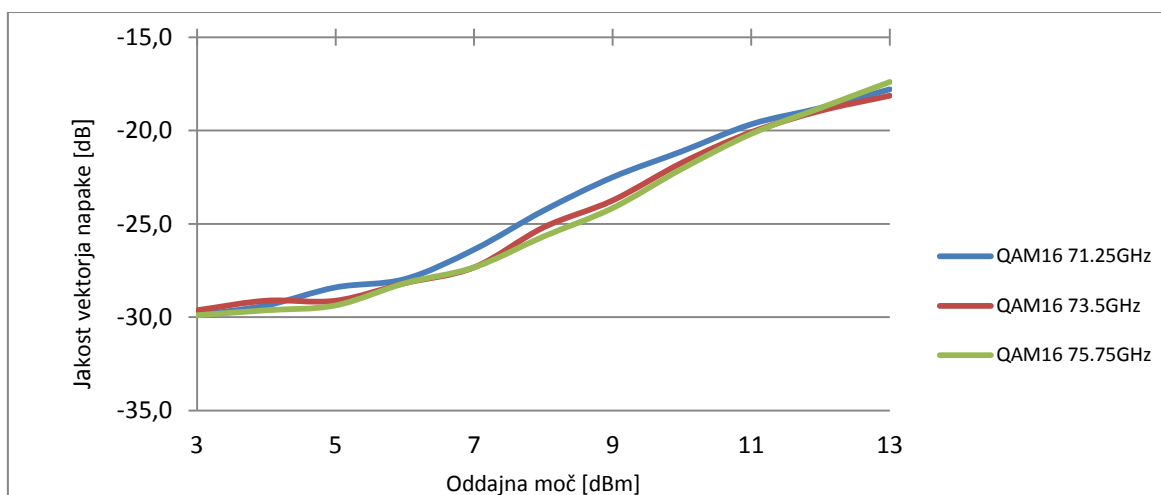


Na spodnjih slikah so prikazani rezultati meritve jakosti vektorja napake na treh frekvencah, najmanjši, srednji in največji. Programska oprema na osciloskopu izmeri EVM v odstotkih, amplitudno in fazno napako, odstopanje od frekvence ter odmik od IQ diagrama. Na sliki 46 je prikazana odvisnost vektorja napake od izhodne moči oddajnika pri najnižji modulaciji QPSK. Vidimo, da je EVM različen za vse tri frekvence ter da narašča z večanjem izhodne moči. Sliki 47 in 48 kažeta odvisnost EVM v dB od izhodne moči pri QAM16 in

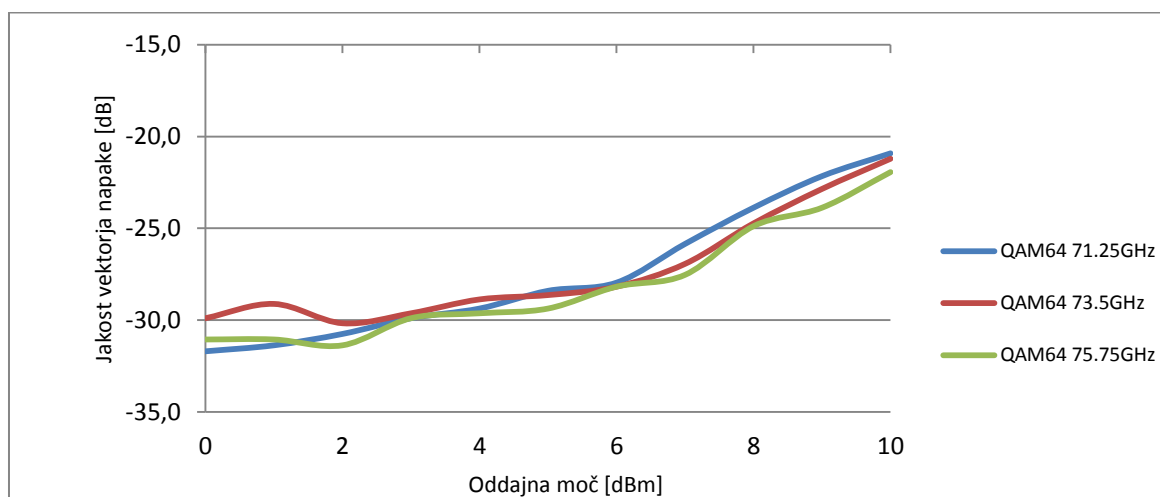
QAM64. Tudi tukaj zaradi nelinearnosti ojačevalnika v oddajniku vektor napake narašča z oddajno močjo.



Slika 46: Jakost vektorja napake v odvisnosti od oddajne moči pri QPSK



Slika 47: Jakost vektorja napake v odvisnosti oddajne moči pri QAM16



Slika 48: Jakost vektorja napake v odvisnosti od oddajne moči pri QAM64

6.2 Sprejemnik

Prag prejetega signala je najnižja vrednost, pri kateri sprejemnik še zmeraj sprejema z minimalnim številom napak. Izmerimo ga s spreminjanjem slabljenja poti pri vzpostavljeni radijski zvezi. Jakost sprejetega signala je odvisna od slabljenja na poti od oddajnika do sprejemnika, in sicer upada z večanjem slabljenja. Z meritvami začnemo pri največji jakosti sprejetega signala, kadar je slabljenje minimalno. Večamo izgube na poti, dokler sprejemnik ne doseže nivoja, pri katerem je pogostost bitnih napak BER okoli 10^{-6} . Takrat je sprejemna vrednost signala minimalna.

Na visokih frekvencah, kot je področje E-band je zelo težko najti dober oddajnik. Zato pri merjenju parametrov sprejemnika, kot oddajnik uporabimo kar predhodno verificirano radijsko enoto WTM3300.

V tabeli so prikazane meritve praga na radijski enoti WTM3300, ki oddaja na frekvenci 71.25 GHz in sprejema na frekvenci 81.25 GHz. Za vsako modulacijo je predpisana vrednost sprejetega signala, pri kateri sprejemnik doseže prag, in sicer za QPSK je ta -73 dBm, za QAM16 -69 dBm in za QAM64 -60 dBm. Izmerjeni prag sprejemnika dobimo iz vsote fiksnega slabljenja valovodov in smernih sklopnikov, slabljenja slabilnika in izmerjene moči. Pomembno je izračunati maržo, ki jo dobimo z razliko med izmerjenim in predpisanim pragom. Kriterij, da sprejemnik ustreza vnaprej določenim specifikacijam, je ta, da marža ne sme biti manjša od -3 oziroma da izmerjeni prag ne sme biti višji za 3 dB od predpisanega.

Tabela 7: Prag sprejemnika pri QPSK na frekvenci 81,25 GHz

Temperatura	Fiksno slabljenje [dB]	Slabljenje [dB]	Izmerjena max. moč	Prag sprejemnika [dBm]	Napaka praga [+/-4dB]	Izmerjeni prag sprejemnika [dBm]	Δ Marže(-73dBm) [+/-0,5dB]
-33C	-41,8	-46,5	13,7	-72,0	2,6	-74,6	1,6
+25C	-41,8	-46,2	14,3	-73,2	0,5	-73,7	0,7
+55C	-41,8	-44,6	13,4	-72,5	0,5	-73,0	0,0

Tabela 8:Prag sprejemnika pri QAM16 na frekvenci 81.25 GHz

Temp	Fiksno slabljenje [dB]	Slabljenje [dB]	Izmerjena max. moč	Prag sprejemnika [dBm]	Napaka praga [+/-4dB]	Izmerjeni prag sprejemnika [dBm]	Δ Marže(-69dBm) [+/-0.5dB]
-33C	-41,8	-41,8	12,3	-69,2	2,1	-71,3	2,3
+25C	-41,8	-41,3	13,3	-69,5	0,3	-69,8	1,8
+55C	-41,8	-39,7	12,2	-68,8	0,5	-69,3	0,3

Tabela 9:Prag sprejemnika pri QAM64 na frekvenci 81.25 GHz

Temperatura	Fiksno slabljenje [dB]	Slabljenje [dB]	Izmerjena max. moč	Prag sprejemnika [dBm]	Napaka praga [+/-4dB]	Izmerjeni prag sprejemnika [dBm]	Δ Marže(-60dBm) [+/-0.5dB]
-33C	-41,8	-32,7	9,8	-63,2	1,5	-64,7	4,7
+25C	-41,8	-32,1	10,5	-62,8	0,6	-63,4	3,4
+55C	-41,8	-29,9	9,4	-62,7	-0,4	-62,3	2,3

7.3 System performance

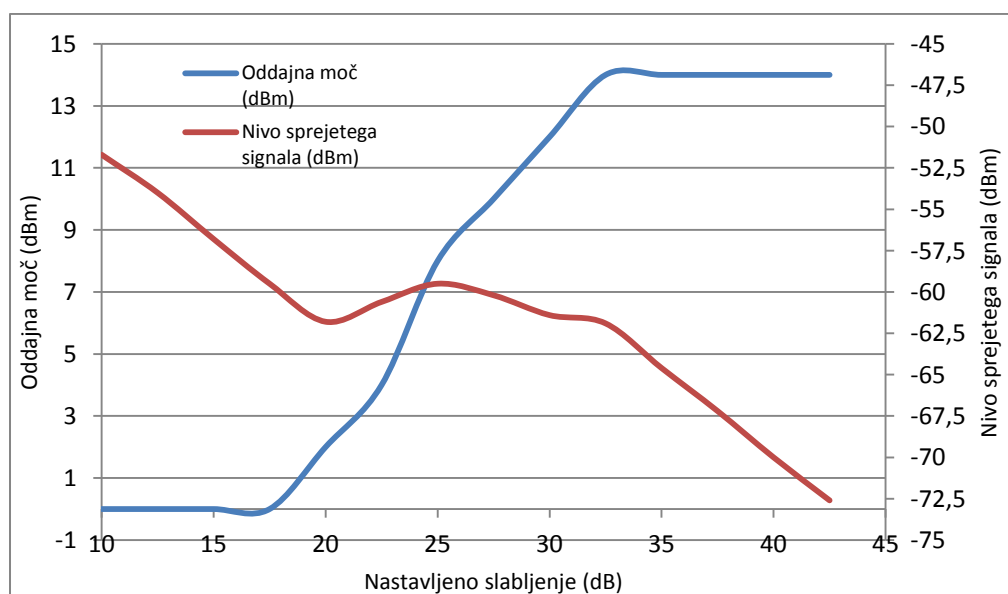
Radijsko enoto kot sistem validiramo tako, da preverimo avtomatsko nastavljanje izhodne moči, adaptivno modulacijo ACM in residualni BER.

Delovanje avtomatskega nastavljanja moči testiramo pri vzpostavljeni zvezi. Omogočimo funkcijo ATPC na radijski enoti in nastavimo slabilnik tako, da ta oddaja najnižjo moč. Z večanjem slabljenja na nastavljenem slabilniku opazujemo, kako se moč, ki jo enota oddaja, spreminja. Oddajnik začne večati moč, ko je slabljenje zadosti visoko, da pokvari nivo sprejetega signala, ki je odvisen od nastavljene rezervne marže. Prag sprejemnika za

modulacijo QPSK je okoli -70 dBm. Pri nastavljeni rezervni marži 10 dB oddajnik začne oddajati in večja moč, ko jakost sprejemnika doseže nivo -60 dBm.

Tabela 10: Oddajna moč v odvisnosti od slabljenja

Slabljenje (dB)	Oddajna moč (dBm)	Razmerje signal-šum (dB)	Nivo sprejetega signala (dBm)
10,0	0	24,3	-51,7
12,5	0	22,9	-54,0
15,0	0	21,2	-56,8
17,5	0	19,3	-59,5
20,0	2	17,3	-61,8
22,5	4	18,3	-60,6
25,0	8	19,0	-59,5
27,5	10	18,5	-60,2
30,0	12	17,6	-61,4
32,5	14	16,5	-61,9
35,0	14	14,4	-64,6
37,5	14	11,8	-67,2
40,0	14	9,0	-70,0
42,5	14	7,3	-72,6



Slika 49: Oddajna moč in nivo sprejetega signala v odvisnosti od nastavljenega slabljenja

Delovanje avtomatskega nastavljanja modulacije preverimo s spreminjanjem izgub na poti pri vzpostavljene radijski zvezi. Opazujemo, kako se s spreminjanjem slabljenja spreminjajo tudi modulacije sprejemnika. Ko jakost sprejetega signala doseže vrednost v bližini praga, modem nastavi nižjo modulacijo ter obratno, ko se jakost sprejetega signala

veča, posledično tudi modem nastavi višjo modulacijo. Gre namreč za čim večji izkoristek pasovne širine.

V tabeli so prikazani rezultati merjenja avtomatske kontrolne zanke za nastavljanje modulacije na WTM3300. Z modrim so označene vrstice, iz katerih je razvidno, da sprejemnik nastavlja modulacijo odvisno od razmerja signal–šum in jakosti signala. Na primer, pri nastavljenem slabljenju 23,5 dB in oddajni moči 13 dBm sprejemni signal doseže nivo -62 dB in ima razmerje signal–šum 16,4 dB. Če povečamo slabljenje poti za 0,5 dB, modem zniža modulacijo in ATPC kontroler poveča oddajno moč, saj je nastavljena rezervna marža 10 dB in prag sprejemnika pri QAM16 okoli -70 dBm, SNR pa 16,6. Na ta način validiramo pravilno nastavljanje modulacije na sprejemniku.

Pri testiranju funkcije ACM na sprejemniku moramo preveriti tudi prehod med modulacijami. Ta mora biti brezhiben in brez izgub paketov na radijski zvezi. V tem primeru zvezno spreminjamo slabljenje na poti in opazujemo spremembe modulacij na vmesniku ter morebitne izgube na programski opremi za merjenje prometa Spirent.

Tabela 11: Meritve ACM na WTM3300

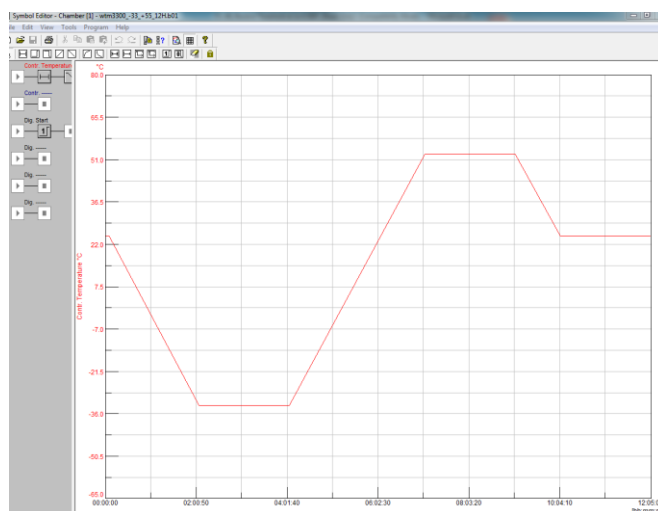
<u>Nastavljeno slabljenje</u>	<u>SNR na sprejemniku</u>	<u>Modulacija sprejemnika</u>	<u>Izhodna moč na oddajniku</u>	<u>Jakost sprejetega signala</u>
23	21,8	QAM64	10	-54,1
23,5	21,6	QAM64	10	-54,7
24	21,9	QAM16	10	-55,4
24,5	21,5	QAM16	10	-55,8
25	21,5	QAM16	10	-56,4
25,5	20,9	QAM16	10	-56,8
26	20,7	QAM16	10	-57,2
26,5	20,1	QAM16	10	-57,7
27	20,1	QAM16	12	-56,8
27,5	19,8	QAM16	12	-57,6
28	18,9	QAM16	13	-56,9
28,5	18,8	QAM16	13	-57,6
29	18,5	QAM16	13	-58
29,5	18,2	QAM16	13	-58,6
30	17,9	QAM16	13	-59
30,5	17,7	QAM16	13	-59,6
31	17,2	QAM16	13	-60
31,5	17	QAM16	13	-60,5
32	16,5	QAM16	13	-61,2

<u>Nastavljeno slabljenje</u>	<u>SNR na sprejemniku</u>	<u>Modulacija sprejemnika</u>	<u>Izhodna moč na oddajniku</u>	<u>Jakost sprejetega signala</u>
44,5	5,9	SQPSK	14	-73,8
44	6,2	SQPSK	14	-73,2
43,5	6,8	SQPSK	14	-72,8
43	7,2	SQPSK	14	-72,4
42,5	8	SQPSK	14	-71,6
42	8,4	SQPSK	14	-70,9
41,5	9	SQPSK	14	-70,4
41	9,2	SQPSK	14	-69,8
40,5	9,9	SQPSK	14	-69,5
40	9,6	SQPSK	14	-69,4
39,5	10,3	SQPSK	14	-68,4
39	10,8	SQPSK	14	-68
38,5	11,3	SQPSK	14	-67,1
38	12	SQPSK	14	-66,7
37,5	12,5	SQPSK	14	-66
37	13	SQPSK	14	-65,6
36,5	13,4	SQPSK	14	-65,2
36	14	QPSK	14	-64,5
35,5	14,5	QPSK	14	-64

32,5	16,4	QAM16	13	-62
33	16,6	QPSK	14	-61
33,5	16,4	QPSK	14	-61,3
34	16	QPSK	14	-62,1
34,5	15,5	QPSK	14	-62,5
35	15	QPSK	14	-63,3
35,5	14,5	QPSK	14	-63,9
36	14	QPSK	14	-64,5
36,5	13,5	QPSK	14	-65,2
37	13	QPSK	14	-65,5
37,5	12,5	QPSK	14	-66,4
38	12	SQPSK	14	-66,6
38,5	11,7	SQPSK	14	-67,4
39	10,8	SQPSK	14	-67,9
39,5	10,3	SQPSK	14	-68,5
40	9,7	SQPSK	14	-68,9
40,5	9,5	SQPSK	14	-69,5
41	8,8	SQPSK	14	-70
41,5	8,3	SQPSK	14	-70,4
42	8,2	SQPSK	14	-70,9
42,5	7,9	SQPSK	14	-71,6
43	7,2	SQPSK	14	-72,4
43,5	6,9	SQPSK	14	-72,7
44	6,3	SQPSK	14	-73,2
44,5	5,8	SQPSK	14	-73,8

35	15	QPSK	14	-63,2
34,5	15,5	QPSK	14	-62,6
34	16	QPSK	14	-62,1
33,5	16,4	QPSK	14	-61,4
33	16,8	QPSK	14	-61
32,5	17,1	QPSK	14	-60,7
32	17,5	QPSK	13	-60,8
31,5	16,9	QAM16	13	-60,2
31	17,2	QAM16	13	-60
30,5	17,6	QAM16	13	-59,2
30	17,6	QAM16	13	-59,1
29,5	17,9	QAM16	13	-58,6
29	18	QAM16	13	-58
28,5	18,2	QAM16	13	-57,7
28	18,5	QAM16	13	-57
27,5	18,7	QAM16	13	-56,5
27	19	QAM16	13	-56,1
26,5	19,1	QAM16	13	-55,4
26	20,5	QAM16	11	-56,7
25,5	21	QAM16	11	-56,4
25	21,2	QAM16	11	-55,8
24,5	21,4	QAM16	11	-55,3
24	21,7	QAM16	10	-55,7
23,5	22	QAM16	10	-55
23	21,8	QAM64	10	-54,7

Za merjenje residualnega BER-a smo uporabili temperaturni profil za komoro, ki je prikazan na spodnji sliki. Temperatura se začne spreminjati pri 25°C, nato pada s hitrostjo 0,5°C/min in je 2 uri stabilna na -33°C. Potem gre gor proti maksimalnemu ekstremu z enako hitrostjo in je prav tako 2 uri stabilna na +55°C. Ker testiramo RBER na vseh temperaturah, je proces dolgotrajen.



Slika 50: Temperaturni profil za merjenje RBER

Zvezo postavimo tako, da je pri najvišji oddajni moči jakost sprejetega signala okoli 10 dB nad pragom. V merilni sistem prometa Spirent nastavimo hitrost prometa in fiksno velikost paketov, saj tako lažje ocenimo izgube. Zaženemo Spirent in nastavimo profil komori. Počakamo, dokler je število paketov dovolj veliko za izračun in se profil komore konča.

Na spodnji sliki je meritev residualnega BER-a na radijski enoti WTM3300. Nastavimo modulacijo QAM64 in slabljenje tako, da je jakost sprejetega signala okoli -47 dBm in razmerje signal-šum 26 dB. Obremenimo zvezo s hitrostjo 800 Mb/s in zaženemo promet.

Ker v našem primeru pošiljamo promet v obliki okvirja, moramo izračunati najprej pogostost napak okvirjev (ang. Frame Error Rate). Izračunamo ga iz razmerja med vsoto napačno prenesenih okvirjev in vseh oddanih okvirjev. V spodnji tabeli je prikazana povezava med BER in FER, iz katere potem računamo, da je $BER = 0,2 * FER$.

Končno na sliki vidimo, da je število napačno prenesenih okvirjev enako 0, iz česar sledi, da bo tudi BER enak 0. Zahteva, da je $BER < 10^{-13}$, je torej izpolnjena.

BER	FER
10^{-6}	5×10^{-4}
10^{-8}	5×10^{-6}
10^{-10}	5×10^{-8}
10^{-12}	5×10^{-10}

Slika 51: Odvisnost med BER in FER

The screenshot displays three windows from a network testing application:

- Test Configuration:** Shows a table of stream configurations. Two streams are visible, both named 'Stream0', with a state of 'Ready' and a load of '640 Mbps'. The traffic group is 'Port //12/2' and 'Port //12/4'.
- Basic Traffic Results:** A table showing performance metrics for two ports: 'Port //12/1' and 'Port //12/2'. The metrics include total and L1 rates for both Tx and Rx, and generator counts.
- Detailed Stream Results:** A table showing stream-level performance metrics, including dropped frames, in-order counts, reordered counts, duplicate counts, and late counts.

Port Name	Int (bits)	Total Tx Rate (bps)	Total Rx Rate (bps)	Tx L1 Count (bits)	Rx L1 Count (bits)	Tx L1 Rate (bps)	Rx L1 Rate (bps)	Tx L1 Rate (Percent)	Rx L1 Rate (Percent)	Generator Count (Frames)
Port //12/1	42.176	487.618.208	487.618.808	21.461.351.476.896	21.461.351.476.896	440.000.307	440.000.845	64	64	31.635.664.845
Port //12/2	43.744	487.618.064	487.618.808	21.461.148.854.208	21.460.827.572.704	440.000.024	639.999.688	64	64	31.636.233.414

Name/ID	Tx Port Name	Rx Port Names	Tx Count (Frames)	Rx Count (Frames)	Dropped Count (Frames)	Dropped Frame Percent	In-order Count (Frames)	Reordered Count (Frames)	Duplicate Count (Frames)	Late Count (Frames)
StreamBlock-1/231072	Port //12/2	Port //12/1	31.636.233.791	31.635.365.405	0	0,00%	31.635.365.405	0	0	0
StreamBlock-2/68536	Port //12/1	Port //12/2	31.636.617.629	31.634.880.672	0	0,00%	31.634.880.672	0	0	0

Slika 52: Rezultat meritev RBER na WTM3300

8 Zaključek

V magistrskem delu sta predstavljeni validacija in verifikacija kot pomembna dela razvoja naprave. Na ta način preverjamo, kako dobro je narejena naprava ter ali izpolnjuje vnaprej določene zahteve. Validirali smo radijsko enoto na področju E-band, ki se zaradi pozitivnih lastnosti vedno pogosteje uporablja za radijske zveze. Opisali smo merilne metode

za validacijo parametrov na tem frekvenčnem območju. Preverili smo delovanje mikrovalovnega sistema kot oddajnika, sprejemnika ali v celoti.

Rezultate meritev smo prikazali in analizirali v skladu z evropskim standardom za fiksne radijske sisteme s povezavo točka–točka ETSI 302 217-3. Pred meritvijo smo kalibrirali radijsko pot na frekvencah od 71 do 86 GHz. Izmerili smo izhodno oddajno moč in izračunali odstopanje od nastavljene moči, ki ne sme biti več kot $|\pm 3|$. Preverili smo morebitno sevanje oddajnika izven dodeljenega spektra. Delovanje sprejemnika smo validirali z določanjem praga sprejetega signala, to je jakost sprejetega signala, pri kateri je pogostost napake večja od dovoljene. Radijsko enoto kot celotni sistem smo validirali s preverjanjem delovanja avtomatskega nastavljanja moči in adaptivne modulacije. Pomerili smo tudi residualno pogostost pojavljanja napak pri jakosti sprejetega signala, ki je 10 dB nad pragom.

Predstavljene merilne metode lahko uporabimo tudi kot osnovo za merjenje nekaterih drugih parametrov. V praksi se verifikacija običajno izvaja pred in po razvoju in je dolgotrajni proces. Pri tem preverimo še ostale parametre oddajnika, sprejemnika ter omogočene sistemske funkcije. Zaradi omejenega časa in merilne opreme smo validirali le del parametrov radijske enote. Opisane metode so torej le en del celotnega merjenja in lahko služijo kot osnovo za nadaljnje validiranje mikrovalovnega sistema na področju E-band.

9 Literatura

Aviat WTM3300 ETSI and ANSI Data sheet,

<http://www.aviatnetworks.com/products/microwave-radios/all-outdoor-radios/small-cell-radio-wtm-3300/>

ETSI TS 102 524, "Fixed Radio Systems; Point-to-Point equipment; Radio equipment and antennas for use in Point-to-Point Millimetre Wave applications in the Fixed Services (mmwFS) frequency bands 71 GHz to 76 GHz and 81 GHz to 86 GHz," July 2006

ITU-R P.676-6, "Attenuation by atmospheric gases," 2005

ITU-R P.838-3, "Specific attenuation model for rain for use in prediction methods," 2005

ITU-R P.837-4, "Characteristics of precipitation for propagation modeling," 2003

ITU-R P.840-3, "Attenuation due to clouds and fog," 1999.

http://en.wikipedia.org/wiki/Verification_and_validation#cite_note-Boehm-3

ETSI EN 302 217-3; Fixed Radio Systems; Characteristics and requirements for point-to-point equipment and antennas; Part 3: Equipment operating in frequency bands where both frequency coordinated or uncoordinated deployment might be applied; Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive

Matjaž Vidmar, Laboratorijske vaje ELEKTRODINAMIKA, Merjenje moči

Matjaž Vidmar, Laboratorijske vaje VISOKOFREKVENČNA TEHNIKA, MMIC ojačevalnik

Application Note, Rohde and Schwarz, Frequency Range Extension of Spectrum Analyzers with Harmonic Mixers, http://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ef43/1ef43_0e.pdf

Agilent Technologies, External Waveguide Mixing and Millimeter Wave Measurements with Agilent PSA Spectrum Analyzers

Matjaž Vidmar, Laboratorijske vaje ELEKTRODINAMIKA, Spektralni Analizator

LOU FRENZEL, Understanding Error Vector Magnitude

Matt Loy, Understanding and Enhancing Sensitivity in Receivers for Wireless Applications

The Microwave Journal, Kent K. Johnson, Optimizing Link Performance, Cost and Interchangeability by Predicting Residual BER: Part I - Residual BER Overview and Phase Noise

Matjaž Vidmar, 20. Seminar Radijske Komunikacije, Izbira modulacije in protokola za radijska omrežja

Matjaž Vidmar, Laboratorijske vaje RADIOKOMUNIKACIJE, Meritev razmerja signal/šum pri AM in FM

Receiver Sensitivity/Noise, http://www.tscm.com/rcvr_sen.pdf

ETSI TS 102 524 v 1.1.1; Fixed Radio Systems; Point-to-Point equipment; Radio equipment and antennas for use in Point-to-Point Millimetre wave applications in the Fixed Services (mmwFS) frequency bands 71 GHz to 76 GHz and 81 GHz to 86 GHz

ETSI EN 301 126-1 v 1.1.2; Fixed Radio Systems; Conformance testing; Part 1: Point-to-Point equipment - Definitions, general requirements and test procedures

ETSI EN 301 390 v 1.2.1; Fixed Radio Systems; Point-to-point and Multipoint Systems; Spurious emissions and receiver immunity limits at equipment/antenna port of Digital Fixed Radio Systems

Agilent W8486A Power Sensor, Operating Manual,
<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/08486-90028.pdf>

Agilent Choosing the Right Power Meter and Sensor,
<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5968-7150E.pdf>

Agilent N1913A and N1914A EPM Series Power Meters, Data Sheet

M1970 Series Harmonic Mixer, User's Guide,
<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/M1970-90001.pdf>

N9030A PXA Signal Analyzer, Specification Guide,
<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/N9030-90017.pdf>

