UNIVERZA V LJUBLJANI Fakulteta za elektrotehniko

Dejan Jurač

SVETLOBNI MERILNIK MOČI ZA NEPOSREDNO VKLJUČITEV V CWDM OPTIČNO KOMUNIKACIJSKO ZVEZO

DIPLOMSKO DELO UNIVERZITETNEGA ŠTUDIJA

Mentor: doc. dr. Boštjan Murovec Somentor: doc. dr. Boštjan Batagelj

Ljubljana, 2012

Zahvala

Na tem mestu bi se rad zahvalil mentorju doc. dr. Boštjanu Murovcu ter somentorju doc. dr. Boštjanu Batagelju za vso pomoč, nasvete, moralno podporo ter predvsem za dostopnost in dodatno pridobljena znanja. Zahvalil bi se tudi sodelavcem v podjetju Initra, d.o.o., Ljubljana, za pomoč pri izdelavi tiskanega vezja, uporabo instrumentov in vso strokovno pomoč. Prav tako bi se najlepše zahvalil družini in Katarini za vso izkazano tako moralno kot finančno pomoč med študijem in ob nastajanju te diplomske naloge.

Kazalo vsebine

1	ι	Jvo	d	
2	Osnove optičnih komunikacij			
	2.1		Opti	ični spekter5
	2	2.1.	1	Spekter optičnih komunikacij7
	2	2.1.2	2	Spekter CWDM
	2.2		Opti	čna zveza9
	2	2.2.1	1	Oddajnik
	2	2.2.2	2	Sprejemnik11
	2	2.2.3	3	Optično vlakno12
	2.2.4		4	Optični spoji16
	2	2.2.5	5	Optični združevalniki in razdruževalniki19
	2	2.2.0	5	Optični delilniki
3	Ν	Mer	jenje	e v optiki23
	3.1		Svet	lobna moč
	3.2		Prin	cipi merjenja24
	3	3.2.	1	Merienie v omrežiih CWDM
	3.3		FOT	ODIODA
	3	3.3.	1	Splošno o fotodiodi
	3	3.3.2	2	Spektralni odziv
	3.3.3		3	Načini priključitev
	3.3.4		4	Minimalna občutljivost
	3.3.5 3.3.6		5	Maksimalna občutljivost
			5	Pasovna širina
	3	3.3.′	7	Šum fotodiode
4	Z	Zasr	nova	merilnika
	4.1		Senz	zor
	4.2		Toko	ovno napetostni pretvornik

	4.3 Analogno digitalni pretvornik			
	4.4	.4 Napajanje		
	4.5	Mik	rokrmilniško vezje	
5	Pro	gram	nski del	
	5.1	Nal	oga merilnika moči54	
	5.2	Upo	prabniški vmesnik	
	5.2	.1	Glavni meni	
	5.2	.2	Enostavni merilnik moči57	
	5.3	Vzo	rčenje in shranjevanje podatkov63	
6	Kali	ibrac	ija, testiranje, verifikacija67	
	6.1	Nač	ini kalibracije67	
	6.1	.1	Kalibracija z določanjem faktorja <i>R</i> 68	
	6.1	.2	Kalibracija s pomočjo linearizacije vhodno izhodne karakteristike68	
	6.2	Tes	tiranje70	
	6.2	.1	Popis instrumentov70	
	6.2	.2	Rezultati kalibracijskih meritev71	
	6.2.3 6.2.4		Rezultati temperaturnih testiranj75	
			Primerjava merjenj našega in referenčnega instrumenta	
	6.2	.5	Test merilnika na realnem sistemu81	
	6.2	.6	Slike iz merjenja82	
	6.3	Ver	ifikacija instrumenta85	
7	Zak	ljuče	k	
8 Literatura				
9	Priloga			

Kazalo slik:

Slika 1: Spekter optičnih komunikacij [8]	7
Slika 2: Razdelitev CWDM frekvenčnega pasu [12]	8
Slika 3: Osnovna bločna shema sistema optičnih komunikacij	9
Slika 4: Spekter svetlobe LED [13]	10
Slika 5: Spekter svetlobe laserske diode [13]	11
Slika 6: Kritični koti vpada žarkov v vlakno [1]	12
Slika 7: Slabljenje steklenega vlakna [1]	15
Slika 8: Tipi vlaken in njihovo slabljenje	15
Slika 9: Skica konektorja in pripadajoče ferule [1]	16
Slika 10: Razstavljivi spoj z dvema konetorjema in spojnim adapterjem [1]	17
Slika 11: Tipi konektorjev	18
Slika 12: Valovno razvrščanje s pomočjo združevalnika in razdruževalnika [1]	19
Slika 13: Princip delovanja svetlobnega delilnika [15]	20
Slika 14: Nivoji optične moči	24
Slika 15: Slabljenje optične zveze z vključenim merjencem	26
Slika 16: Slabljenje zveze z referenčnim vlaknom	26
Slika 17: Simbol diode (levo), zgradba fotodiode (desno) [17]	29
Slika 18: Odzivnost polprevodniške diode iz različnih materialov v odvisnosti od	l valovne
dolžine [18]	
Slika 19: Tok nasičenja diode [17]	
Slika 20: Karakteristika fotodiode v zaporni smeri [17]	
Slika 21: Nadomestno vezje fotodiode	
Slika 22: Bločna shema merilnika optične moči	37
Slika 23: Shema senzorja [20]	
Slika 24: Shema električnega vezja za krmiljenje fotodiode [23]	41
Slika 25: Odziv napetosti glede na vhodni tok fotodiode [23]	42
Slika 26: Shema merilnega dela vezja	43
Slika 27: Karakteristika napetosti potenciala VPDB v odvisnosti od toka fotodiode [2:	3] 43
Slika 28: Priklop AD pretvornika	45

Slika 29: Priklopni konektor in pull up za l ² C46
Slika 30: Napajalni del vezja48
Slika 31: Razvojni komplet LM3S6965 [29]50
Slika 32: Uporabljeni priključki za komunikacijo [29]51
Slika 33: Izgled sistemskega menija57
Slika 34: Enostavni merilnik moči57
Slika 35: Odvisnost merjene moči od izhodne napetosti za merjene valovne dolžine74
Slika 36: določitev koeficientov premic za vsako valovno dolžino v omejenem območju
linearnosti75
Slika 37: Rezultati temperaturnih merjenj v območju med 0 0 C in 70 0 C76
Slika 38: Napaka meritve v odvisnosti od temperature78
Slika 39: Napaka meritve v izbranem dinamičnem razponu za vse štiri merjene valovne
dolžine81
Slika 40: Realni sistem, 4 kanalni video distributer in 8 kanalni razdruževalnik (levo) ter
referenčni merilnik (desno)81
Slika 41: Pripomočki za čiščenje konektorjev; za SC tip (zgoraj) ter za LC tip (spodaj)82
Slika 42: Referenčni laserski izvor HP6168F TUNABLE LASER SOURCE
Slika 43: Mikrokrmilniški kit (levo), merilnik moči (sredina), merilnik napetosti Fluke 117
(desno)
Slika 44: Referenčni merilnik optične moči HP 8153A LIGHTWAVE MULTIMETER
Slika 45: Delovna miza in kompletna oprema84
Slika 46: Shema tiskanega vezja95

Kazalo tabel:

Tabela 1: Delilna razmerja za opravljanje meritev optične moči
Tabela 2: Kalibracijske meritve pri valovni dolžini 1491 nm
Tabela 3: Kalibracijske meritve pri valovni dolžini 1531 nm
Tabela 4: Kalibracijske meritve pri valovni dolžini 1571 nm
Tabela 5: Kalibracijske meritve pri valovni dolžini 1591 nm
Tabela 6: Temperaturna odvisnost merilnika in napaka meritve
Tabela 7: Primerjava rezultatov merilnika in referenčnega instrumenta za λ = 1491 nm ir
λ = 1531 nm
Tabela 8: Primerjava rezultatov merilnika in referenčnega instrumenta za λ = 1571 nm ir
λ = 1591 nm
Tabela 9: Test merjenja na realnem sistemu pri valovnih dolžinah 1491 nm, 1531 nm ir
1571 nm

Kazalo izsekov kode:

Izsek kode 1: Definicija zgradbe sistemskega menija	56
Izsek kode 2: Realizacija podmenija Enostavnega merilnika moči	61
Izsek kode 3: Izdelava in posodobitev statusnega okna	63
Izsek kode 4: Inicialiacija AD pretvornika, zajem vzorcev in izračun meritev	65

Slovar uporabljenih pojmov

CWDM	Coarse WDM	Redki WDM, preprosti WDM, grobi	
		WDM	
DMUX	Demultiplexer	Razdruževalnik	
DWDM	Dense wavelength division multiplexing	Zgoščeno valovno-dolžinsko	
		razvrščanje (gosti WDM)	
ITU-T	International telecommunication union -	Mednarodna zveza za	
	telecommunications	telekomunikacije	
LAN	Local area network	Lokalno omrežje	
LD	Laser diode	Laserska dioda	
LED	Light-emitting diode	Svetilna dioda	
MUX	Multiplexer	Združevalnik	
NA	Numerical aperture	Numerična apertura (odprtina)	
PIN	p-i-n photodiode	Fotodioda z vgrajeno intrinzično plastjo	
		polprevodnika	
WDM	Wavelength division multiplexing	Valovno-dolžinsko razvrščanje,	
		multiplekser valovnih dolžin	
USB	Universal serial bus	Vsestransko zaporedno vodilo	
UART	Universal asynchronous receiver-	Univerzalni asinhroni sprejemnik in	
	transmitter	oddajnik	
SD	Secure digital memory card	Pomnilniška kartica SD	

Povzetek

Diplomska naloga opisuje razvoj merilnika optične moči za delovanje v optičnem spektru CWDM sistemov, ki ga poleg klasičnega namena uporabe odlikuje neposredna vključitev v optično zvezo in izvajanje meritev v realnem času. Pri tem zahtevamo točnost reda 0,5 dB, ustrezno temperaturno neodvisnost in čim večji dinamični razpon merilnega območja.

Izvedba merilnika temelji na uporabi fotodiode, logaritemskega ojačevalnika in primernega mikrokrmilniškega vezja, ki omogoča nadaljnje razširitve merilnika, kot so neposredna povezava s svetovnim spletom ali računalnikom za neposredno analizo meritev, možnost napajanja na baterije in shranjevanja podatkov o merjenju na prenosni medij. Merilnik za interakcijo z uporabnikom uporablja LCD zaslon in navigacijske tipke. Za komunikacijo s svetom sta predvideni povezavi USB ter Ethernet, ki še nista realizirani. Prav tako v delu ni realizirano shranjevanje na prenosni medij. Zgradba programske opreme je zasnovana hierarhično, da omogoča enostavno implementacijo vseh nadalje predvidenih rešitev.

V delu se najprej posvečamo osnovam optike, optičnemu spektru in optičnih zvezam. Nadalje predstavimo principe merjenja ter ustrezni detektor – fotodiodo. Nato prikažemo in opišemo zasnovno in realizacijo merilnega vezja ter pripravimo ustrezno programsko podporo. V zadnjem delu se posvetimo kalibraciji, testiranju in verifikaciji instrumenta. V zaključku podamo načrte za prihodnji razvoj merilnika.

Ključne besede: merilnik optične moči, spekter CWDM, optična zveza, fotodioda, logaritemski ojačevalnik, AD pretvornik, kalibracija.

XI

Abstract

This thesis describes development of an optical power meter functioning in the optical spectrum of CWDM systems, which enables a direct integration to fiber optics link and real-time measurements in addition to its normal use. Requirements include an accuracy of 0,5 dB, the relevant temperature independence and the widest possible dynamic range of measurements.

The meter was constructed on the basis of a photodiode, a logarithmic amplifier and the appropriate microcontroller circuit, which enables further extensions, such as a direct internet or computer connection enabling a direct analysis of the measurements, use of batteries and storage of measurement data on a portable device. The meter's user interface is comprised of an LCD screen and navigation controls. For communication with the environment, an USB and Ethernet connection is foreseen, but so far it has not been realized. Storage on a portable device has not been realized either. The software structure is designed hierarchically, thus it enables a simple implementation of all further envisaged solutions.

First, the thesis covers an introduction into optics, optical spectrum and fiber optics, which are followed by a presentation of the measurement principles and the suitable detector – a photodiode. Furthermore, the thesis includes demonstration and description of the measuring circuit design and realization, as well as preparation of the corresponding software support. The last section focuses on calibration, testing and verification of the instrument. The conclusion explains plans for future development of the meter.

Key words: optical power meter, CWDM spectrum, fiber optics link, photodiode, logarithmic amplifier, AD converter, calibration.

XIII

1 Uvod

Po več desetletjih uspešnih raziskav in po dveh desetletjih pospešenega uvajanja v prakso postajajo optične komunikacije osnovni prevladujoč prenosni medij za zveze na dolge, srednje in po novem tudi kratke razdalje [1, str. 2], kar je zahtevalo razvoj posebnih merilnih tehnik in merilnih naprav za vrednotenje prenosnih poti in sistemov [2, str. 1].

Vrednotenje pomeni preverjanje karakteristik učinkovitosti optičnega omrežja, če so te v skladu s specifikacijami. Da lahko vrednotimo, potrebujemo meritve, s katerimi ugotavljamo, ali je določena vrednost (npr. slabljenje vzdolž prenosne poti, ki je eden najbolj značilnih parametrov optične zveze) znotraj dovoljenih mej in predpisanih toleranc [3, str. 296]. Z meritvami preverimo tudi morebitna odstopanja parametrov komponent v primerjavi s podatki, ki jih podaja proizvajalec, (npr. ali nazivna moč svetlobnega vira resnično ustreza podatkom, ki se nahajajo v katalogu) [4].

Meritve opravljamo z ustreznimi merilnimi instrumenti. Najosnovnejši so merilniki optične moči [3, str. 298], ki za razliko od optičnih spektralnih analizatorjev [2], ne merijo spektra svetlobe ampak le njeno povprečno moč, ki izhaja iz končne točke vlakna ali direktno iz svetlobnega vira. Merilnik optične moči je običajno zgrajen iz svetlobnega detektorja, ustreznega elektronskega vezja in prikazovalnika [3, str. 298]. Ker je merjenje optične moči temeljna in hkrati najpogostejša meritev v sistemih optičnih komunikacij [3, str. 300], si v tem diplomskem delu oglejmo, kako se ustrezen merilnik moči izdela.

Cilj diplomskega dela je izgradnja merilnika moči, ki ni čisto klasičen. Slednji omogočajo merjenje moči le v končnih točkah sistema ali na izhodu svetlobnih virov, kar je tehnično sicer pravilno, ni pa vedno praktično, saj zveza, ki povezuje oddajno terminalno opremo s sprejemno terminalno opremo, pri tem ni vzpostavljena, kot pravi definicija sistema optičnih komunikacij [1, str. 2].

Naš merilnik moči lahko neposredno vključimo v optično zvezo, s čimer je omogočeno neposredno merjenje optične moči. Podatki se po optičnem vlaknu večinoma prenašajo z intenzitetno (jakostno) modulirano svetlobo [1, str. 3], zato je meritev povprečne moči potrebno zagotoviti z ustreznim elektronskim vezjem. Ohraniti želimo visok nivo integracije z že obstoječimi optičnimi sistemi kot tudi uporabo merilnika v klasičnem načinu delovanja.

Visok nivo integracije ne zahteva samo optične združljivosti, ampak tudi komunikacijsko povezavo instrumenta z računalnikom preko različnih komunikacijskih poti (npr. lokalno računalniško omrežje (LAN) ali serijska komunikacija), s čimer zagotovimo nadzor nad delovanjem optičnega omrežja na daljavo. Tem zahtevam ustrezno je izbran tudi mikrokrmilnik, ki ima poleg nadzora nad merilnim delom instrumenta, izračunavanja povprečne moči v tipičnih enotah [dB] ali [μW] in prikazovanja le-teh na vgrajenem prikazovalniku nalogo, da skrbi za interakcijo in komunikacijo z zunanjim svetom. Vse potrebne elemente združuje Stellaris-ov razvojni komplet [5], ki smo ga uporabili za razvoj merilnika. Za konceptni prikaz delovanja merilnika to zadostuje, medtem ko bo predvidena komercialna različica samostojna enota.

Instrument zaznava in meri optično moč širokega spektra svetlobe (od 1271 nm do 1611 nm). Z ustreznimi dodatnimi fizičnimi sklopi, optičnim združevalnikom (ang. MUX) in optičnim razdruževalnikom (ang. DMUX) je moč meriti tudi posamezne specifičnega dela spektra, ki jih prinaša tehnologija redkega valovnodolžinskega razvrščanja (ang. CWDM). Merilni oz. dinamični razpon instrumenta se giblje med –30 dBm in +2 dBm. Ostali želeni parametri so naslednji: absolutna natančnost 0,5 dB, stabilnost glede na temperaturo 1,0 dB, ločljivost 0,01 dB ter območje delovanja med 0 ^oC in 50 ^oC.

Zastavljenega merilnika pri pregledovanju spletnih strani konkurenčnih proizvajalcev nismo našli. Zaradi potreb novega optičnega prenosnega sistema IDT[®] (ang. Intelligent Data Transceivers)[6], kjer nam bo zgoraj opisana funkcionalnost merilnika pomenila dodano vrednost, smo se v podjetju Initra d.o.o [7] odločili, da opisani instrument tudi realiziramo in ga predstavimo v diplomski nalogi.

2

V diplomskem delu se najprej posvečamo osnovam optike, optičnim zvezam in njihovim elementom. Nadaljujemo s poglavjem o merjenju v optiki ter temeljnih principih merjenja. Sledi natančnejša predstavitev fotodiode, njenega fizikalno-matematičnega modela in lastnosti. Obravnavane zakonitosti in želene lastnosti merilnika nam pomagajo izbrati primerno fotodiodo ter ojačevalno vezje, ki skupaj z analogno-digitalnim pretvornikom tvorita merilni del vezja. Slednjega preko komunikacijskega vodila povežemo z mikrokrmilnikom, ki se nahaja na razvojnem kompletu. Sledi predstavitev zasnove in realizacije programske opreme. Po uspešnem testiranju je opravljen še izračun merilnih napak merilnika ter njegova verifikacija. V zaključku omenjamo možnost implementacije dodatnih programskih modulov za prihodnje izboljšave merilnika.

2 Osnove optičnih komunikacij

Optične komunikacije [1] imajo pred drugimi vrstami komunikacij (žične, brezžične) kar nekaj prednosti. Slabljenje prenosnega medija je daleč najmanjše, kar omogoča doseganje velikih razdalj brez vmesnih ojačevalnikov. Širina prenosnega spektra omogoča prenos velikih količin podatkov. Občutljivost na zunanje elektromagnetne motnje je skoraj nična. V današnjem času je zaradi masovne proizvodnje komunikacijska oprema tudi cenejša.

Temelj optičnih komunikacij je svetlobni (optični) spekter, katerega lastnosti se s pridom izkoriščajo v namene prenosa informacij. Optične komunikacije obsegajo številne pojave od generiranja svetlobe, modulacije in obdelave optičnega signala, prenosa po optičnem vlaknu, optičnega ojačevanja, frekvenčne konverzije ter z njo povezanega valovnodolžinskega razvrščevanja, detekcije, demodulacije, do odločanja o sprejetem signalu.

Sistemi v optičnih komunikacijah so zgrajeni iz optičnega vlakna, ki povezuje oddajno terminalno opremo s sprejemno terminalno opremo. Glavni elementi so optično vlakno, viri svetlobe, optični detektorji, spoji, razdruževalniki in združevalniki, s katerimi izdelamo različne optične zveze. Domet je omejen z mehanskimi in snovnimi izgubami vlakna, ki povzročajo določeno absorpcijo svetlobe ter s tem izgubo moči svetlobnega signala in izgubami na vsaki izmed dodatno vključenih komponent. Podatki se po optičnem vlaknu običajno prenašajo z intenzitetno (jakostno) modulirano svetlobo.

2.1 Optični spekter

Svetloba je elektromagnetno valovanje v mikrometrskem valovnem področju [1]. Zajema vidno svetlobo, ultravijolično svetlobo in bližnje infrardeče področje elektromagnetnega valovanja, čemur pravimo tudi optični spekter svetlobe. Delitev je umetna (slika 1) [8].

Elektromagnetno valovanje predstavlja oscilirajoče elektromagnetno polje, ki v vakuumu potuje s svetlobno hitrostjo $c_0 = 3 \cdot 10^8$ m/s. Svetlobna hitrost je tudi povezava med frekvenco f in valovno dolžino λ elektromagnetnega valovanja [8].

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f} \tag{1}$$

Frekvenca *f* elektromagnetnega valovanja je enoveljavno določena in je enaka ne glede na medij, v katerem se valovanje širi. λ_0 je valovna dolžina v praznem prostoru. Če se valovanje širi v snovi z lomnim količnikom n, je valovna dolžina s tem lomnim količnikom skalirana [8].

Čeprav se je zgodovinsko uveljavilo, da mnogokrat podajamo valovno dolžino valovanja, kar še posebno velja za svetlobo, je tehnično pravilneje podajanje frekvenc, ker ne vnašajo dvoumnosti [8]. Podajanje z valovno dolžino je s pedagoškega vidika vseeno nekoliko lažje in bolj nazorno, zato bomo v tem delu kljub vsemu podajali valovne dolžine in ne frekvenc.

Poleg enačbe 1 je v optiki pomembne še ena veličina – energija fotona. Opisuje jo Planckov zakon z naslednjo zvezo:

$$E_{\rm f} = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \tag{2}$$

Pri tem *h* označuje Planckovo konstanto (6,626 x 10^{-34} Js), ki podaja razmerje med kvantom energije fotona svetlobe in ustrezno frekvenco. Preko nje bomo v poglavju o detektorjih svetlobe izpeljali tudi pojem optične moči, katerega merjenje želimo predstaviti skozi diplomsko nalogo.

2.1.1 Spekter optičnih komunikacij

Optične komunikacije se danes nahajajo v področju valovnih dolžin, ki se razteza od 850 nm do 1675 nm, pri čemer se zaradi optimalnih lastnosti steklenega vlakna, ki je v optičnih komunikacijah glavni prenosni medij, za srednje in dolge razdalje uporablja pas od 1260 nm do 1675 nm (slika 1) [8].



Slika 1: Spekter optičnih komunikacij [8]

Ta prostor je organizacija International Telecommunication Union (ITU-T) [9] sprva razdelila na šest področij, ki se imenujejo O,E,S,C,L in U. Njihova imena so pojasnjena v spodnjem desnem kotu slike 1.

Zahteve trga po vedno večji širini prenosnega spektra so kmalu presegle to delitev, zato je bila potrebna nova. Razvoj tehnologij in novih materialov je omogočil, kar prej ni bilo mogoče – znotraj teh obstoječih pasov ustvariti nove. Razvita je bila tehnologija redkega valovno-dolžinskega razvrščanja (CWDM) in nadalje tehnologija gostega valovno-dolžinskega razvrščanja (DWDM) [10]. Obema je skupno, da so valovne dolžine postavljene mnogo bolj skupaj kot pri zgornji delitvi; pri DWDM še precej bolj kot pri CWDM. Ker je CWDM trenutno precej bolj razširjen in predvsem cenovno dostopnejši, se z DWDM v tem delu ne bomo ukvarjali.

2.1.2 Spekter CWDM

Po priporočilih ITU-T G.694.2 [11] in G.695 [12] se zgoraj omenjeni razpoložljivi frekvenčni pas na novo razdeli na 18 delov, katerih vrhovi (centralne valovne dolžine) so med seboj razmaknjeni za 20 nm. Novo delitev prikazuje slika 2.



Slika 2: Razdelitev CWDM frekvenčnega pasu [12]

Pri tem ordinatna os kvalitativno prikazuje izgube na dolžino optičnega vlakna v odvisnosti od valovne dolžine svetlobe. Izgube so posledica lastnosti materiala, iz katerega je narejeno vlakno in jih ni mogoče izničiti. Hkrati so tudi ena od lastnosti optične zveze, ki je ključna za njen domet. Nanje se navezuje večina poudarkov pri opisu vlaken in ostalih komponent zveze. Več o tem je predstavljeno v podsekciji 2.2.3.

Nova delitev omogoča razširitev komunikacijskega spektra. To je s stališča povečanja kapacitet prenosnih poti znotraj enega vlakna vsekakor ugodno, čeravno gostejša razporeditev valovnih dolžin prinaša tudi slabosti [3], a pridobljene prednosti prevladajo, saj je optični spekter dragocena dobrina, ki je omejena, zato je potrebno z njo ravnati varčno. Z naraščanjem potrebe po množičnih komunikacijskih medijih bo v prihodnje potrebno izkoriščati še širši spekter ali obstoječega še izboljšati, kot to že počne tehnologija DWDM oz. njene naslednice.

8

2.2 Optična zveza

Optično zvezo omogočajo prenosni medij in terminalska oprema. Slednjo predstavljajo oddajniki in sprejemniki, medtem ko je kot prenosni medij uporabljeno optično vlakno. Poglavje opisuje tipičen primer sistema optičnih komunikacij, imenovan točka-točka, ki je hkrati najosnovnejši način optične komunikacije (slika 3).



Slika 3: Osnovna bločna shema sistema optičnih komunikacij

Podatki, ki lahko predstavljajo zvok, sliko ali druga obvestila, vstopijo v oddajnik (ang. transmitter), ki jih pretvori v obliko, primerno za prenos, in jih odpošlje. Podatki potujejo po prenosnem mediju, ki je v primeru optičnih komunikacij optično vlakno, narejeno iz stekla ali plastične mase. Slednjega uporabljamo le za kratke razdalje, saj je slabljenje materiala mnogo večje kot pri steklu. Sprejemnik (ang. receiver) je tisti člen terminalske opreme, ki podatke sprejme ter jih ponovno pretvori v primarno obliko. Nosilec podatkov je ena izmed valovnih dolžin svetlobe, kot smo opisali v podsekcijah 2.1.1 in 2.1.2.

Svetloba, s katero prenašamo podatke, je vedno modulirana [3]. Od znanih načinov modulacij se zaenkrat najbolj uporablja intenzitetna (amplitudna) modulacija, kar pomeni, da svetloba, ki prihaja iz vira v oddajniku, v nekem časovnem sosledju skoraj hipno naraste in nato skoraj hipno upade ter pri tem tvori svetlobni pulz, ki predstavlja logično enico. Ustrezen časovni interval brez svetlobnega pulza predstavlja logično ničlo.

2.2.1 Oddajnik

Funkcija oddajnika je pretvorba električnega signala v svetlobnega. Sestavljajo ga svetlobni vir, modulacijsko vezja ter napajalnik, ki se običajno nahajajo na enotnem vezju v skupnem ohišju. Za uporabo pri visokih frekvencah je to tudi edina možnost, saj bi brez visoke stopnje integracije parazitne lastnosti elementov (parazitna kapacitivnost, induktivnost) preveč omejevale frekvenčno mejo sistema, ki določa prepustnost signalov visokih frekvence [13].

Svetlobni viri v današnjih sistemih so svetilne diode (LED) ali laserske diode (LD). Oboje so miniaturne polprevodniške naprave, ki učinkovito pretvarjajo električni signal v svetlobnega. LED diode izkoriščajo princip spontane emisije [3] in se uporabljajo predvsem za kratke razdalje zaradi slabega izkoristka pretvorbe električne moči v svetlobno. Razlog leži v izgubah, ki nastane zaradi nekoherentnosti svetlobe in razpršenega snopa žarkov. Nekoherentnost svetlobe pomeni, da elektromagnetno valovanje različnih fotonov (svetlobe) ni v fazi, zato se učinki zaradi nasprotnih faz izničujejo, kar povzroča manjšo izhodno moč.

Razpršenost snopa žarkov je lastnost, da se žarki močno širijo v prostor. Prostorski kot LED diod je velikostnega reda od 30⁰ do 120⁰, zato svetlobna moč na enoto površine z razdaljo močno upada. Tretja lastnost, zaradi katere LED diode niso primerne za uporabo na dolge razdalje, je njihov širok spekter. Svetloba diode LED ni monokromatska, kar pomeni, da fotoni, ki nastanejo zaradi spontane emisije, nimajo enake valovne dolžine. Rezultat je širok valovni spekter, ki ga prikazuje slika 4.



Slika 4: Spekter svetlobe LED [13]

 $λ_p$ je valovna dolžina, pri kateri je svetilnost največja. Pravimo ji tudi centralna valovna dolžina. Δλ predstavlja ustaljeno meril**š**irine spektra, ko med zgornjo in spodnjo mejo valovnih dolžin, svetilnost pade na ½ največje svetilnosti [13]. Tipične vrednosti širine spektra se za LED diode gibljejo med 30 nm in 100 nm, kar je za izvedbo omrežij, ki uporabljajo tehnologijo CWDM, kjer je razmik med centralnimi valovnimi dolžinami postavljen na 20 nm, absolutno preveč.

Laserske diode dosegajo veliko boljši izkoristek. Izkoriščajo princip stimulirane emisije [3], zaradi česar imajo fotoni poleg iste frekvence tudi isto fazo. Svetloba je tako koherentna, svetlobna moč na površino pa velika. Laserske diode tako lahko uporabljamo za komunikacije na dolge razdalje. Snop žarkov je precej ožji, reda 0,01⁰ [13]. Svetloba, ki nastane s stimulirano emisijo je monokromatska, kar pomeni, da je spekter valovnih dolžin ozek, velikostnega reda 1 nm (slika 5). Takšen vir je primeren za uporabo v omrežjih CWDM.



Slika 5: Spekter svetlobe laserske diode [13]

Oddajniki imajo načeloma že vgrajeno kratko optično vlakno (ang. pigtail), ki je na eni strani sklopljeno s svetlobnim virom. Druga stran je lahko zavarjena z optičnim konektorjem za lažjo sklopitev s konektorjem prenosnega vlakna ali so prosta, namenjena direktnemu zvaru in s tem manjšim izgubam.

2.2.2 Sprejemnik

Glavna funkcija sprejemnika je zaznava in pretvorba svetlobnega signala nazaj v električni signal (tok ali napetost). Sestavljen je iz detektorja svetlobe, elektronskega vezja in napajalnega vezja, ki se kot pri oddajniku nahajajo na enotnem vezju. Tako kot oddajniki

imajo tipični sprejemniki že vgrajeno kratko optično vlakno, ki je na enem koncu sklopljeno z detektorjem, drugi konec pa je prost ali privarjen na ustrezen konektor [13].

Za detekcijo svetlobe se v sistemih optičnih komunikacij uporabljajo predvsem PIN fotodiode. Od zgradbe navadnih polprevodniških diod [14] se razlikujejo po dodatni plasti nedopiranega polprevodnika (ang. intrinsic semiconductor region). Slednji omogoča umetno povečanje osiromašenega področja, kjer se vrši opto-električna pretvorba. Posledice so drastično izboljšanje učinkovitosti in hitrosti takšnega fotodetektorja ter precej nižja napajalna napetost [14].

2.2.3 Optično vlakno

Je medij, ki izkorišča fizikalne zakone popolnega odboja. Princip temelji na odboju elektromagnetnega valovanja na meji dveh dielektrikov z različnima relativnima dielektričnostima [13]. Narejen je kot cilindrični valovod, ki ga sestavljata jedro in ovoj. Njuna lomna količnika se rahlo razlikujeta. Jedro je narejeno iz kremenovega stekla (SiO₂) s primesmi in mora imeti v skladu z zakonom popolnega odboja [1, 3, 13] tudi večji lomni količnik od obloge. Ker sta tako jedro kot obloga zaradi svoje sestave precej krhka, je nad njima še posebna plast zaščite, ki do neke mere ščiti vlakno pred mehanskimi poškodbami.

Poleg zakona popolnega odboja na meji dveh dielektrikov je za optično vlakno pomemben tudi pojem numerična apertura (NA) [1,3,13]. Da ostane svetloba ujeta v jedru vlakna, mora biti žarek na vzdolžno os vlakna majhen (slika 6).



Slika 6: Kritični koti vpada žarkov v vlakno [1]

Zaradi meje med zrakom in jedrom se vpadni žarek na vhodu v vlakno lomi (lomni količnik zraka je manjši od lomnega količnika vlakna). Če je vpadni kot glede na vodoravno os vlakna prevelik (žarek 1), zadane oblogo, kjer se lomi, a ostaja zunaj jedra. Žarek 2 ima takšen vpadni kot, katerega lom omogoča dostop do meje jedra in obloge. Ker je vpadni kot na to mejo še prevelik, se žarek lomi in ne odbije. Pravilni potek ima žarek 3, katerega vpadni kot v vlakno je ravno pravšnji. Takšen kot omogoča žarku po prehodu meje zrak-jedro, da zadene mejo vlakno-obloga pod kotom, ki zadovolji pogoj popolnega odboja.

Numerična apertura (NA) podaja največji vpadni kot žarka v vlakno, da ta ostane v njem ujet. Vsi koti, ki so večji od določenega z NA, povzročajo na spojih velike izgube. Podatek torej potrebujemo pri načrtovanju komunikacijskih sistemov za pravilno izbiro oddajnikov, sprejemnikov in optičnih konektorjev. Pri prehodu iz elementa z manjšo NA v element z večjo NA so izgube majhne, medtem ko obratno to ne velja.

Poznamo dva glavna tipa vlaken [1, 3, 13], in sicer mnogorodovno ter enorodovno. V našem delu smo za testiranje in meritve uporabljali le enorodovna vlakna, saj mnogorodovna vlakna zaradi prevelikega slabljenja za izvedbo CWDM in DWDM optičnih omrežij niso primerna.

Premer in obloga enorodovnega vlakna sta standardizirana na 9 μ m ter 125 μ m. Vlakno ima še zunanjo zaščito premera od 250 μ m do 900 μ m. Standardno enorodovno vlakno je bilo sprva dimenzionirano za prenos pri valovnih dolžinah 1310 nm in 1550 nm. Današnja enorodovna vlakna to zdaleč presegajo, saj zmorejo prenašati valovne dolžine vse od 1260 nm do 1640 nm, tudi do 200 km daleč in imajo zato ogromno pasovno širino (ang. bandwidth).

Najbolj karakteristična vrednost vlakna je njegovo slabljenje. Slednje predstavlja izgube optične moči na kilometer dolžine vlakna in je sestavljeno iz mehanskih ter snovnih izgub. Mehanske izgube delimo na notranje in zunanje, medtem ko med snovne štejemo sipanje ter absorpcijo.

13

Notranje izgube nastanejo zaradi mikro deformacij vlakna v času njegove izdelave in prevelikih mehanskih pritiskov na vlakno kot posledica transporta in nepazljivega ravnanja. V vlaknu tako nastanejo majhne krivine, ki povzročijo, da se žarek zaradi kršenja kota popolnega odboja širi v plašč. Takšen žarek je izgubljen, zato so večje tudi izgube.

Zunanje izgube nastanejo zaradi ukrivljanja vlakna, ker je realno nemogoče zagotoviti polaganje optičnega vlakna po prostoru brez krivin. Pri preveliki ukrivljenosti ponovno pride do nespoštovanja kritičnega kota popolnega odboja, zato del optične moči zbeži iz vlakna.

Snovne izgube nastajajo zaradi lastnosti materiala, iz katerega je vlakno narejeno. Te izgube delimo na absorpcijo in sipanje. Sipanje je posledica nečistoče v steklenem vlaknu, kar svetloba čuti kot oviro, ob kateri se razprši v različnih smereh. Pojav sipanja je odkril lord Rayleigh, po katerem se to sipanje tudi imenuje.

Sipanje je danes mogoče omiliti z izdelavo čistejših homogenih vlaken. To je najbolj izrazito pri krajših valovnih dolžinah, a ima zanimivo lastnost, da upada z naraščanjem valovne dolžine svetlobe. Zaradi tega upada tudi slabljenje optičnega vlakna in teoretično bi lahko prišlo do izredno nizkih slabljenj pri dolgih valovnih dolžinah. V praksi se pri dolgih valovnih dolžinah pojavi absorpcija svetlobe v steklu, zato je zgornja meja, do katere je slabljenje zaradi sipanja še ugodno, postavljena okoli 1675 nm.

Absorpcija je posledica fizikalno-kemijskih lastnosti materiala. V poglavju 1 smo definirali energijo kvanta fotona. Le-ta je neposredno povezana tudi z valovno dolžino svetlobe po enačbi 2. Če je energija fotona večja ali enaka energijski reži materiala [3], se foton absorbira v materialu. Tak foton je izgubljen, zato se svetlobna moč manjša.

V zgodovini so se zaradi absorpcije pojavljali številni problemi, saj proizvajalci niso znali izdelati vlakna, ki bi se po karakteristiki približalo omejitvam sipanja. Karakteristika vlaken je bila naslednja.

14



Slika 7: Slabljenje steklenega vlakna [1]

Iz slike vidimo, da takšno vlakno ne omogoča izvedbe omrežij CWDM, saj se v okolici 1400 nm pojavi t.i. vodni vrh kot posledica prisotnosti hidroksidnih ionov v steklu, ki izrazito absorbira vpadno svetlobo okoli te valovne dolžine. Takšno vlakno danes nosi oznako G.652 [1]. Nasledniki tega vlakna imajo tovrstni stolpec že odstranjen. Najdemo jih po oznakah G.652C in G.652D [1]. Vrednosti njihovega slabljenja prikazuje naslednja slika. Pod abscisno osjo se za boljšo predstavo nahajajo še barvne oznake valovnih dolžin CWDM spektra.



Slika 8: Tipi vlaken in njihovo slabljenje

Očitno je razvoj novih tehnoloških postopkov proizvodnje optičnega vlakna prinesel določeno zmanjšanje izgub. Tipično slabljenje vlaken se danes giblje med 0,2 dB/km in 0,4 dB/km. Najboljša vlakna proizvaja Corning [3], ki je že vrsto let vodilni proizvajalec na tem področju.

Kljub teoretično zadovoljivim vrednostim slabljenja in izbiri najboljšega proizvajalca, lahko vlakno vseeno precej bolj slabi optično moč, kot podajajo njegove specifikacije. Temu so krive predvsem notranje in zunanje izgube, ki nastanejo pri transportu in pri polaganju optičnega vlakna, zato je še kako pomembno, da vlakno, v katerem želimo sami zagotoviti visoki nivo storitve, pred uporabo temeljito testiramo tudi sami.

2.2.4 Optični spoji

Vlakna so standardizirana, kar omogoča medsebojno spajanje vlaken različnih proizvajalcev. Vlakna med seboj povezujemo s spojkami. Razlikujemo med trdimi (varjenimi) in razstavljivimi spojkami. Prve so kvalitetnejše in povzročajo manjše izgube. Druge vnašajo v zvezo več slabljenja, a so zato bolj praktične.

Eden od razlogov, ki povzroča slabljenje, je nečistoča spojev, saj že zrnce prahu lahko povsem pokvari spoj dveh vlaken. Poleg prahu nedopustno visoko stično slabljenje povzročijo še prečni premik, vzdolžni razmik in zasuk sicer enakih vlaken [3]. Vse to je izredno pomembno, saj je lahko spojev na dolžini vlakna precej in bi preveliko slabljenje praktično uničilo zvezo.

Razstavljivih spojev je danes na trgu precej, saj jih potrebujemo pri povezovanju različnih komponent opreme in izvajanju meritev, kjer mora biti mera ponovljivosti pri sklopu dovolj dobra, da le-teh ne pokvari. Paziti je potrebno na čistočo in obliko ferule, ki je osnova vsakega konektorja in kjer na drugi strani zavarimo golo optično vlakno.



Slika 9: Skica konektorja in pripadajoče ferule [1]

Ko imamo na obeh koncih vlaken pritrjena konektorja s pripadajočima ferulama, lahko s pomočjo posebnega spojnega adapterja sestavimo spoj, kot prikazuje slika 10.



Slika 10: Razstavljivi spoj z dvema konetorjema in spojnim adapterjem [1]

Sklapljanje je tako precej enostavno. Izgube so nekoliko višje kot pri zvarih. Kolikšne so, je odvisne predvsem od tipa ferule (kota pod katerim je brušena) ter vrste poliranja. Z obojim izničujemo povratne odboje na meji ferula – zrak – ferula. Kvaliteto vsakega spoja namreč ovrednotimo z dvema vrstama izgub: vstavitvenim slabljenjem (ang. insertion loss) in dušenjem odbitih signalov (ang. return loss, reflection loss, backreflection loss, reflectance loss).

Vstavitveno slabljenje (tudi slabljenje v prepustni smeri) je slabljenje signala prek poti, po kateri potuje koristni del signala. Odvisno je od zunanjih in notranjih izgub na spojih [3]. To dušenje se giblje v razponu 0,1 dB do 0,5 dB, povprečno okoli 0,25 dB.

Dušenje odbitih signalov (tudi povratno slabljenje) nastane zaradi odboja svetlobe na meji vlakno-zrak-vlakno. Ti signali so neželeni, ker motijo glavni signal. Visok nivo odbitih signalov prispeva tudi k izgubi signala v prepustni smeri [3], kar pomeni, da sta oba tipa slabljenj med seboj deloma povezana. Večje kot je dušenje odbitih signalov, manjše je vstavitveno slabljenje, a le do neke mere. Če se preveč signala odbije izven vlakna, je posledično tudi koristnega signala precej manj. Slednje predstavlja inženirski izziv, zato so bili skozi zgodovino razviti načini, kako najbolj zmanjšati vpliv dušenja v povratni smeri, ne da bi hkrati slabo vplivali na slabljenje v prepustni smeri.

To se doseže z načinom brušenja ferul. Poznamo tri glavne načine [3]: SPC, UPC in APC. SPC (ang. super-polished-connector) pomeni, da je ferula brušena pravokotno in polirana tako, da zagotavlja kvaliteto spoja, ki povzroča povratno slabljenje –30 dB. UPC (ang. ultra polished connector) se od SPS razlikuje le po natančnejšem poliranju in vnaša v zvezo povratno slabljenje –50 dB. APC (ang. angle polished connector) je za razliko od prejšnjih dveh brušen pod kotom 8⁰. Ta način zagotavlja, da se žarki odbijejo izven vlakna. Optično povratno slabljenje tako doseže –60 dB in več, a je slabljenje v prepustni smeri zaradi izgube žarkov tudi nekoliko višje, tipično 0,5 dB.

Zgoraj smo omenili konektorje, ki jih še nismo podrobno predstavili. Poznamo jih veliko vrst, največ je moških, da jih lažje očistimo. Najbolj uporabljani so navojni (FC), bajonetni (ST) in plastični zatični (SC, LC). Vse tipe prikazuje slika 11. Od vrste konektorja je odvisna tudi vrsta sklopnega adapterja, zato je pri nakupu vedno dobro vedeti, kateri tip potrebujemo.



Slika 11: Tipi konektorjev

V diplomskem delu uporabljamo konektorje tipa LC – SPC, ki ustrezajo tipom konektorjev na oddajnikih, ki jih proizvajamo v podjetju.
2.2.5 Optični združevalniki in razdruževalniki

To so pasivne optične komponente [3], ki v CWDM in DWDM omrežjih skrbijo za pravilno združevanje ter razdruževanje različnih valovnih dolžin optičnih signalov. Bolj prepoznavno ime razdruževalnika je optični multiplekser (ang. MUX), razdruževalnika pa demultiplekser (ang. DEMUX).

Glavna naloga združevalnika je združevanje različnih valovnih dolžin v eno optično vlakno, medtem ko razdruževalnik počne ravno obratno, zato sta ta dva ključni komponenti CWDM in DWDM omrežij. Princip delovanja opisuje slika 12. Različne barve predstavljajo različne valovne dolžine λ_i , ki v resnici niso takšne barve, ampak služijo nazornejšemu prikazu.



Slika 12: Valovno razvrščanje s pomočjo združevalnika in razdruževalnika [1]

Število kanalov v oznaki združevalnikov in razdruževalnikov opisuje, koliko valovnih dolžin lahko naprava združi ali razdruži. Tipične vrednosti so 4, 8, 16 in 32. Poleg števila valovnih dolžin je pomemben tudi podatek, katere valovne dolžine podpirajo. Standardni WDM (standardno valovno-dolžinsko razvrščanje) obsega le valovne dolžine 850 nm, 1310 nm in 1550 nm, medtem ko je pri CWDM in DWDM vrhov centralnih valovnih dolžin precej več (poglavje 2). Tako konektorji kot tudi združevalniki in razdruževalniki vnašajo v optično zvezo določeno slabljenje. Kolikšno je, je odvisno od števila uporabljenih kanalov in širine pasu valovne dolžine, ki jo te komponente prepuščajo, zato variira od kanala do kanala [3]. Vrednost kanala, kjer je slabljenje največje, se privzame za dejansko vrednost slabljenja združevalnika ali razdruževalnika. Tipične vrednosti se gibljejo od 1,5 dB za 4-kanalne in 6 dB za 32-kanalne naprave.

V diplomskem delu smo za potrebe ločevanja optični valovnih dolžin uporabili 8-kanalni razdruževalnik [16], ki je delno¹ zadostil zahtevam po merjenju optičnih moči komponent omrežja CWDM, kot smo definirali v uvodu.

2.2.6 Optični delilniki

Optični delilniki so pasivne optične komponente, ki so nepogrešljive pri izgradnji optičnih omrežij različnih topologij in pri merjenjih optičnega signala [3, 15]. Njihovo bistvo je v razdeljevanju optičnega signala na enega ali več signalov v različnih razmerjih. Princip delovanja prikazuje slika 13, medtem ko se detajlna pojasnila nahajajo v [3, poglavje 13].



Slika 13: Princip delovanja svetlobnega delilnika [15]

¹ Zasnova merilnika je popolnoma v skladu z zahtevami. Omejitve so se pojavile pri izbiri nabora oddajnih modulov (laserjev), kjer smo imeli na voljo le določene valovne dolžine, s katerimi smo opravili testiranja.

Za optični delilnik so predvsem pomembni trije podatki: delitveno razmerje, vstavitveno slabljenje ter valovno dolžinsko področje delovanja [15]. Delitveno razmerje podaja razmerje moči, ki se prenese na posamezni izhod delilnika. Za nadzor omrežja potrebujemo le majhen del signala (tipično od 0,1 % do 10 %), nad katerim izvedemo meritev moči optičnega signala. Z ustreznim skaliranjem dobljene vrednosti dobimo tudi dejansko vrednost optične moči, ki jo delilnik prepušča v glavni smeri. Razmerja za uveljavljena opravljanja meritev so prikazana v tabeli 1, medtem ko je standardno razmerje 50:50 namenjeno predvsem razdeljevanju signalov za namene izgradnje različnih topologij omrežij.

Izhodna	Izhodna
moč 1	moč 2
[%]	[%]
99,9	: 0,1
99	: 1
98	: 2
97	: 3
95	: 5
90	: 10

Tabela 1: Delilna razmerja za opravljanje meritev optične moči

Druga karakteristična lastnost delilnika je vstavitveno slabljenje, ki nam pove koliko svetlobnega signala se izgubi na sami napravi. Definirano je kot razmerje izhodne moči proti vhodni pri določeni valovni dolžini. Tipične vrednosti se gibljejo okrog 0,5 dB in so odvisne predvsem od tretjega parametra delilnika. Ta podatek je valovno-dolžinsko področje delovanja. Energija, ki se deli, je namreč močno odvisna od valovne dolžine [15]. V merilne namene je zaželeno čim širše območje delovanja, zato je za izvajanje meritev v širokem spektru potreben delilnik širokega dosega delovanja.

3 Merjenje v optiki

Če bi svetlobna moč, ki pri oddajniku vstopa v vlakno, prispela do sprejemnika brez izgub, meritve ne bi bile potrebne. Ker takšnega ideala ni, potrebujemo veličine, s katerimi izgube ovrednotimo. V optiki se najpogosteje ukvarjamo s pojmoma povprečna optična moč in slabljenje na optični poti.

3.1 Svetlobna moč

Svetlobna moč je fizikalna veličina, ki pove količino izsevane svetlobne energije na enoto časa. Izpeljemo jo iz Planckove enačbe (enačba 1). Svetlobno energijo predstavlja produkt števila fotonov $N_{\rm f}$ z njihovo energijo $E_{\rm f}$, zato je svetlobna moč definirana kot:

$$P = \frac{N_{\rm f} \cdot E_{\rm f}}{t} \tag{3}$$

Pri tem je *t* čas, v katerem opazujemo tok fotonov. Enota za svetlobno moč je W (Watt), mW (mili Watt), μW (mikro Watt). Večkrat uporabljamo tudi enoto dBm. Slednja izraža (v logaritemski skali) moč, normirano na enoto reference 1 mW (enačba 4).

$$P [dBm] = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P}{1mW}\right)$$
 (4)

Vrednost moči v dBm je negativna, ko je razmerje $0 < \left(\frac{P}{1 \text{mW}}\right) < 1$ in pozitivna, ko je $\left(\frac{P}{1 \text{mW}}\right) \ge 1$. Slednje pomeni, da z negativnimi vrednostmi dBm izražamo manjše moči od 1 mW, s pozitivnimi pa večje od te vrednosti.

V poglavju 1 smo omenili, da je svetlobna moč v sistemih optičnih komunikacij intenzitetno modulirana. Največkrat uporabljen tip modulacije je NZR (ang. non-return-to-zero) [3]. Logična enica se prenaša z intenziteto moči P_2 , logična nič z intenziteto moči P_1 . Razmere prikazuje slika 14.



Slika 14: Nivoji optične moči

Nivo moči, ki se prenaša, je odvisen od moči oddajnika, medtem ko je čas trajanja pulza odvisen od frekvence, s katero modulacijsko vezje v oddajniku oddaja signal. Poleg omenjene frekvence in moči signala je pomembna še njegova konstantnost, ki jo lahko zagotovi le konstantni podatkovni tok. Ta parameter je nadvse pomemben, saj daljše časovno obdobje brez optične moči merilnik zazna kot napako zveze, kar ni želeno. V diplomskem delu smo pri testiranju uporabili oddajnike, ki oddajajo konstantni tok podatkov frekvence oddajanja 2 GHz. Pri tem smo predpostavili, da je razmerje pojavljanja logične 1 in logične 0 enako 50:50. Takšno razmerje je optimalno pri prenosu moči [3], zato velja naslednja definicija:

$$P_{\rm pov} = \frac{P_1 + P_2}{2}$$
(5)

Pri tem P_{pov} predstavlja povprečno moč moduliranega optičnega sistema in je prikazana na slika 14.

3.2 Principi merjenja

Poznamo neposredni in posredni princip merjenja. Pri prvem je vrednost meritve absolutna in podana v enoti dBm ali mW, odvisno od zmožnosti prikazovanja merilnika. Meritve opravljamo v končni točki vlakna, kjer nas zanimata predvsem prisotnost signala ter njegov nivo. Posredni način je namenjen ugotavljanju slabljenja prenosne poti, natančnemu izračunu slabljenja posameznih komponent zveze, in kot bomo videli kasneje, tudi edini možni način kalibracije našega merilnika.

Slabljenje (ang. loss) po prenosni poti je definirano kot razmerje izhodne moči proti vhodni moči izraženo v enoti dB zaradi velikega razpona in posledično lažjega računanja. Definicijo podaja enačba 6.

$$Loss [dB] = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}\right)$$
(6)

Vhodna moč (P_{in}) in izhodna moč (P_{out}), podani v enačbi, sta izraženi v enoti W. Izgube so glede na kvocient veličin v enačbi negativne, saj je izhodna moč vedno manjša od vhodne. Opozorilo glede predznaka je na mestu, saj velja splošno pravilo, da se izgube podajajo kot pozitivna vrednost, zato enačbi 6 dodamo negativen predznak in jo preoblikujemo v enačbo 7.

$$Loss [dB] = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right)$$
(7)

V kolikor želimo za računanje moči uporabljati enote dBm, uporabimo zvezo, izpeljano iz enačbe 7.

$$Loss [dB] = P_{in} [dBm] - P_{out} [dBm]$$
(8)

Pri znani moči vira, s pomočjo enačb 6 ali 7, z meritvijo v končni točki vlakna enostavno izračunamo slabljenje prenosne poti. V tem primeru se moramo zavedati, da merimo slabljenje, ki vključuje izgube na spojih, vlaknu ter izgube na sklopu vlakna z referenčnim virom in sprejemno fotodiodo, kar prikazujeta slika 15 in njej pripadajoča enačba 9.



Slika 15: Slabljenje optične zveze z vključenim merjencem

$$P_{\rm in} = L_{\rm LD} + L_{\rm FC} + L_{\rm d} + L_{\rm FC} + L_{\rm PD} + P_{\rm out1}$$
(9)

Pri tem P_{in} in P_{out1} predstavljata vhodno in izhodno moč izraženo v dBm. L_{LD} ter L_{PD} sta izgubi zaradi sklopa vlakna z virom ter fotodiodo, L_{FC} je izguba zaradi priključnih konektorjev, L_{d} pa je izguba vlakna. Vsota izgub je, glede na enačbo 7, pozitivna vrednost, izražena v dB.

Ko moč vira ni znana, jo izmerimo s krajšim (referenčnim) koncem vlakna. V tem primeru se je potrebno zavedati, da meritev prav tako vključuje izgube na spojih in sklopih po poti, kar prikazujeta slika 16 in njej pripadajoča enačba 10.



Slika 16: Slabljenje zveze z referenčnim vlaknom

$$P_{\rm in} = L_{\rm LD} + L_{\rm FC} + \frac{L_{\rm x}}{L_{\rm x}} + L_{\rm FC} + L_{\rm PD} + P_{\rm out2}$$
(10)

Veličine, ki nastopajo v enačbi so, glede na enačbo 8, različne le za L_x (slabljenje krajšega vlakna) in posledično večjo izhodno moč P_{out2} .

Zgoraj prikazana primera koristno uporabimo za natančno določanje slabljenja posameznih komponent. S kratkim koncem vlakna izmerimo moč v končni točki in si jo zapišemo (slika 16). Nato namesto kratkega vlakna vstavimo v zvezo dolgo vlakno in izmerimo novo vrednost izhodne moči. Iz razlike obeh merjenih moči dobimo natančno vrednost slabljenja vlakna, saj se prispevki ostalih komponent odštejejo, kar vidimo, če od enačbe 10 odštejmo enačbo 9.

$$P_{\rm in} = L_{\rm LD} + L_{\rm FC} + L_{\rm x} + L_{\rm FC} + L_{\rm PD} + P_{\rm out2}$$
(10)

$$P_{\rm in} = L_{\rm LD} + L_{\rm FC} + \frac{L_{\rm d}}{L_{\rm d}} + L_{\rm FC} + L_{\rm PD} + P_{\rm out1}$$
(9)

(10)-(9)
$$0 = L_{\rm x} - L_{\rm d} + P_{\rm out2} - P_{\rm out1}$$

Če predpostavimo, da je L_x zanemarljivo majhen ($L_x \ll L_d$), je razlika merjenih izhodnih moči resnično enaka slabljenju merjenca, kar podaja enačba 11.

$$P_{\rm out2} - P_{\rm out1} = L_{\rm d} \tag{11}$$

Omenjeni postopek ni primeren le za natančno določanja slabljenja vlakna, ampak je uporaben za določanje prav vseh komponent zveze, do katerih imamo fizični dostop in možnost razstavitve oz. zamenjave merjenega elementa.

V sklopu izdelanega merilnika smo za tovrstne potrebe merjenja implementirali posebno funkcijo, ki preračun izgub merjenca izvede avtomatsko, tudi če referenca vira ni absolutno znana. Več o tem v poglavju o programskem vmesniku.

Iz izgub vlakna lahko ob znani karakteristični lastnosti slabljenja vlakna na kilometer, ki ga v katalogih podaja parameter α, s pomočjo enačbe 12, izračunamo dolžino optičnega vlakna. Slednje je uporabno predvsem v primerih, ko določamo maksimalni domet zveze pri znani vrednosti referenčnega vira in minimalni občutljivost sprejemnika, do katere ta še pravilno razpozna signal.

$$d \,[\mathrm{km}] = \frac{\mathrm{Loss}}{\alpha} \tag{12}$$

Ob znani vrednosti dolžine vlakna in znanih izgubah s preoblikovanjem enačbe 12 izračunamo tudi koeficient slabljenja. To je uporabno predvsem, ko želimo ugotoviti morebitna odstopanja od podatkov, ki jih podaja proizvajalec.

3.2.1 Merjenje v omrežjih CWDM

Pri merjenju moči na postavljeni optični zvezi, ki je drugi cilj diplomske naloge, so zahteve nekoliko drugačne. Bistvo teh meritev je neprestano diagnosticiranje prisotnosti signala in njegovega nivoja na dani zvezi. Meritve se izvajajo v realnem času in se neprestano prenašajo v računalniški center, kjer vodijo celovito diagnostiko omrežja. V primeru okvar laserjev, poškodb na vlaknu, ki jih povzročajo najrazličnejši dejavniki, poškodb priključnih spojev v okviru rednih vzdrževalnih del, je z zadostno količino omenjenih merilnikov mogoče natančno locirati izvor napake. Ukrepi so tako hitri in učinkoviti.

Poleg nadzora izpada je pomemben tudi nivo optičnega signala. V konkretnem primeru videonadzornih sistemov, ki jih proizvajamo v podjetju, se lahko zgodi izpad slike v centralnem nadzornem sistemu. Ker so komunikacijski optični moduli zgrajeni tako, da neprestano komunicirajo med sabo, lahko samo z merjenjem nivoja moči ugotovimo, da napake na optičnem omrežju ni. Slednje pomeni, da gre verjetno za okvaro kamere ali dela opreme do optičnega komunikacijskega terminala. Problem je tako lokaliziran in omogoča hitrejšo odpravo napake. S to mislijo smo gradili tudi merilnik, ki je opisan v nadaljevanju.

Povprečno moč merimo v končni točki vlakna, pri čemer vhodno točko vzbujamo s konstantnim ali moduliranim virom svetlobe. Vir svetlobe je v primeru omrežij CWDM ustrezno izbrana laserska dioda. Če so v vlaknu zbrane valovne dolžine različnih laserjev, ki so s pomočjo združevalnika sklopljene v vlakno, potrebujemo na izhodni točki razdruževalnik, ki te valovne dolžine loči. V nasprotnem primeru bi se fotodioda, s katero zaznavamo optično moč, zaradi njene dokaj široke spektralne odzivnosti, odzivala neselektivno na vse prisotne valovne dolžine, medtem ko nas zanima le povprečna moč posamezne valovne dolžine (sekcija 2.2).

28

3.3 FOTODIODA

Ustrezno detektiranje svetlobe v CWDM spektru zagotovimo s primerno izbiro fotodiode. Lastnosti, na katere moramo paziti, so spektralna odzivnost diode, minimalna in maksimalna občutljivost, ustrezna pasovna širina, primerno ohišje zaradi temperaturne stabilnosti ter nizka napajalna napetost, ki je potrebna zaradi želje po nizki porabe električne moči, če želimo proizvajati merilnik z napajanjem na baterije.

3.3.1 Splošno o fotodiodi

Fotodioda je po zgradbi podobna običajni polprevodniški diodi, le da mora biti pn-spoj kar najbližje površini diode (substrata), kjer se nahaja tudi odprtina, skozi katero prehaja svetloba. Ko fotodiodo osvetlimo, v izpraznjenem področju zaradi fotoionizacije nastajajo elektroni in vrzeli. Zaradi tega se poveča električni tok, ki je sorazmeren s svetlobnim tokom [17]. Podrobnejši opis delovanja bralec lahko najde v [3,14,17,18]. Simbol in zgradbo fotodiode prikazuje slika 17.



Slika 17: Simbol diode (levo), zgradba fotodiode (desno) [17]

Priključni sponki diode sta anoda (A) ter katoda (K), kamor priključimo napajalno napetost ali breme. Kakšne načine priključitev poznamo, opišemo v podsekciji 3.3.3.

3.3.2 Spektralni odziv

Naloga fotodiode je pretvarjanje svetlobne energije v električno,. Pretvorba je neposredna in izhaja iz absorpcije fotonov, ki vpadejo na detekcijsko plast fotodiode. Če je energija fotona podana z enačbo 2, večja ali enaka energijski reži materiala [3], se fotoni absorbirajo in generirajo proste nosilce. Razmerje med vpadno močjo in tokom, ki ga fotodioda generira, je linearno in ga podaja enačba 13.

$$R\left[\frac{A}{W}\right] = \frac{I_{\rm PD}}{P} = \frac{N_{\rm e} \cdot t}{t \cdot N_{\rm f} \cdot E_{\rm f}} = \left(\frac{N_{\rm e}}{N_{\rm f}}\right) \cdot \left(\frac{\lambda}{h \cdot c}\right) = \eta \cdot \left(\frac{\lambda}{h \cdot c}\right)$$
(13)

Pri tem *R* predstavlja faktor odzivnosti diode (ang. responsitivity), ki je za vsako fotodiodo karakteristična lastnost in je odvisna od kvantnega izkoristka η in valovne dolžine λ , kot vidimo na koncu enačbe. Kvantni izkoristek η podaja razmerje med številom sproščenih elektronov $N_{\rm e}$ ter številom fotonov $N_{\rm f}$, ki vpadejo na fotodiodo in govori o tem, koliko fotonov je uspešno tvorilo proste elektrone v p-n spoju pri določeni valovni dolžini. Sproščeni elektroni za sabo pustijo proste vrzeli, ki skupaj z njimi tvorijo nosilce električnega toka. Ostale veličine v enačbi so hitrost svetlobe *c*, Planckova konstanta *h* in Δt čas, v katerem pretvorbo opazujemo. Tipično odvisnost faktorja *R* od valovne dolžine za tri različne vrste fotodiod prikazuje slika 18.



Slika 18: Odzivnost polprevodniške diode iz različnih materialov v odvisnosti od valovne dolžine [18]

Iz slike vidimo, da odvisnost ni čisto linearna, kot bi glede na enačbo 13 pričakovali. Kvantni izkoristek η namreč ni konstanta ampak funkcija parametrov absorpcijskega koeficienta α ter širine absorpcijskega področja fotodiode, kjer se fotoni lahko absorbirajo [3, str. 437-440]. Širina absorpcijskega področja je za PIN fotodiode fiksna in se le rahlo spreminja v odvisnosti od napetosti, na katero fotodiodo priključimo, medtem ko je absorpcijski koeficient α močno odvisen energijske reže materiala, iz katerega je fotodioda narejena. Z večanjem valovne dolžine le-ta močno upada, zaradi česar se karakteristike od določene točke dalje močno ukrivijo in izgubijo na linearnosti.

Od določene valovne dolžine dalje postane energija fotonov nižja (enačba 2) od energijske reže materiala, zato se fotoni ne absorbirajo več. S tem dobimo zgornjo mejo, do katere izbrana fotodioda še deluje. Spodnjo mejo karakteristik določa podobna lastnost, le da gre v tem primeru za absorpcijo materiala posebne tanke plasti pred samo fotodiodo, ki preprečuje odboj svetlobe nazaj v vlakno [3].

Zgornjim krivuljam odvisnosti faktorja *R* od valovne dolžine pravimo tudi spektralni odziv fotodiode. S tem podatkom proizvajalci podajo območje, kateremu je določena fotodioda namenjena. Iz slike 18 razberemo, da je za področje delovanja v CWDM omrežjih najprimernejši tip InGaAs [3].

3.3.3 Načini priključitev

Če na fotodiodo ob določeni osvetlitvi priključimo breme, se bo na njej trošila moč kot posledica generiranega toka s strani nakopičene energije prostih nosilcev. Takšen način uporabljajo sončne celice in ga imenujemo fotovoltaični način. Drugi, za nas bolj zanimiv način je fotokonduktivni, ki je primeren za izvedbo vseh vrst foto sprejemnikov. Pri tem fotodiodo priključimo na električno napetost (ang. bias), in sicer v zaporni smeri (katoda na pozitivnem potencialu). Zaporna napetost za razliko od prevodne, izboljšuje linearen odziv diode na vpadno moč, poveča hitrost in njeno učinkovitost ter zmanjšuje temni tok [3], [14].

3.3.4 Minimalna občutljivost

Električno polje, ki ga ustvari zunanja zaporna napetost ima isto smer kot polje ravnovesnega stanja [3]. Ker pride do superpozicije polj, se osiromašeno območje poveča, zato tečeta skozi neosvetljeno diodo le tokova, ki sta posledica difuzije manjšinskih nosilcev naboja in generacije prostih nosilcev zaradi vpliva temperature. Tokova sta zelo majhna in se s spremembo zaporne priključene napetosti le malo spreminjata. Oba običajno obravnavamo skupaj in ju imenujemo z enim imenom – temni tok. Ker je tak tok odvisen predvsem od nastanka parov elektron-vrzel v osiromašen področju, se s povečanjem temperature zvišuje tudi tok nasičenja. Ta narašča eksponentno s temperaturo in je neželen [17]. Primer spremembe temnega toka glede na spremembo temperature podaja slika 19.



Slika 19: Tok nasičenja diode [17]

Posledica temnega toka je minimalna občutljivost fotodiode. Ta se nanaša na minimalno svetlobo, ki jo fotodioda še lahko zazna. Večji kot je temni tok, višje je postavljena meja minimalne občutljivosti. Pri tem se moramo zavedati, da je temni tok le nizkofrekvenčna asimptota šuma, ki ga ta tok generira. Največjo omejitev pri določanju minimalne svetlobe tako določa šum fotodiode, ki ga opišemo v podsekciji 3.3.7. Omenimo še, da je minimalna občutljivost ključni parameter pri določanju kvalitete fotodiode. Ker pod mejo temnega toka koristnega signala ni moč zaznati, iščemo za večji doseg pri meritvah fotodiode, katerih temni tok je pri določeni napetosti čim nižji.

3.3.5 Maksimalna občutljivost

Fotodiodo priključeno v zaporni smeri osvetlimo z različnimi nivoji svetlobe in opazujemo odziv. Prikazuje ga slika 20.



Slika 20: Karakteristika fotodiode v zaporni smeri [17]

Iz slike vidimo, da z naraščanjem nivoja osvetljenosti linearno narašča tudi tok, kot smo opisali v podsekciji 3.3.2. Opozorimo, da to velja le do neke zgornje točke, kjer pride do nasičenja zaradi pomanjkanja parov elektron-vrzel. Nasičenje predstavlja zgornjo mejo občutljivosti diode, ki jo podaja parameter maksimalne vhodne moči.

3.3.6 Pasovna širina

Naslednjo lastnost fotodiode kvalitativno opišemo z matematičnim modelom, ki ga predstavlja slika 21.



Slika 21: Nadomestno vezje fotodiode

Pri tem so $I_{\rm K}$ koristni tok, ki ga fotodioda ob osvetlitvi proizvede, $U_{\rm D}$ napetost diode, $I_{\rm D}$ tok idealne diode, $C_{\rm S}$ spojna kapacitivnost, $R_{\rm SP}$ upornost spoja, $I_{\rm SP}$ tok skozi ta spoj, $R_{\rm P}$ upornost priključkov, $U_{\rm IZH}$ izhodna napetost, $I_{\rm B}$ tok, ki teče skozi breme in $R_{\rm B}$ upornost priključenega bremena.

Tok $I_{\rm K}$ skupaj z $R_{\rm SP}$ tvorita realni tokovni vir. Vemo, da lahko vsak realni vir kvalitativno predstavimo kot Nortonov tokovni vir, ki ga nadomestimo s Theveninovim napetostnim virom [19]. V tem primeru Theveninova notranja upornost skupaj s spojno kapacitivnostjo $C_{\rm S}$ tvori RC člen. Ta določa pasovno širino fotodiode, ki je naslednja karakteristična lastnost fotodiode.

Upornost *R*_{SP} je določena z lastnostjo snovi, iz katere je fotodioda narejena, medtem ko je spojna kapacitivnost odvisna od širine prepovedanega pasu določene z velikostjo priključene napetosti. Pri PIN fotodiodah to ni tako izrazito, saj je kapacitivnost precej bolj kot od napetosti, odvisna od širine vmesne intrinzične plasti v polprevodniku. Večja kot je širina te plasti, manjša je kapacitivnost fotodiode. Manjšanje kapacitivnosti vpliva na pasovno širino fotodiode (omenjeni RC člen), ki s tem raste [3,19].

Velika pasovna širina v našem primeru ni ugodna, saj zaznavanja nivojev posameznih svetlobnih pulzov, kot smo že omenili, za meritev moči ne potrebujemo. Kar potrebujemo, je povprečna vednost signala, ki si jo zagotovimo z ustreznim integriranjem preko pasovnih sit [19] s čim nižjo pasovno širino. To smo opisali v poglavju 4. Nižja pasovna širina ugodno vpliva tudi na velikost šuma, ki je naslednja karakteristična lastnost fotodiode. Ta je za nas precej pomembna, saj je v primeru prešibkega signala fotodiode šum lahko večji, zaradi česar meritev ne moremo več opraviti.

34

3.3.7 Šum fotodiode

Pri fotodiodah obravnavamo dve glavni vrsti šuma, in sicer šum, ki nastane zaradi zrnavosti toka, in šum, ki nastane kot posledica termičnega gibanja nosilcev električnega toka. Razlogi za njun nastanek so naslednji. Zrnati šum (ang. shot noise) nastane, ko prost nosilec preleti potencialni prag med dvema polprevodniškima tipoma, med različnimi kovinami ali med kovino in polprevodnikom. Velikost šuma je sorazmerna toku, ki teče skozi enega od spojev [17]. Vrednost zrnatega šuma določa enačba 14.

$$I_{\rm SN} = \sqrt{2 \cdot q \cdot (I_{\rm koristni} + I_{\rm temni}) \cdot BW} = \sqrt{2 \cdot q \cdot I_{\rm PD} \cdot BW}$$
(14)

Pri tem *q* predstavlja osnovni naboj $(1,6\cdot10^{-19} \text{ As})$, *BW* pasovno širino v Hz. Enačba je koristna iz stališča razumevanja minimalne občutljivosti opisane v podsekciji 3.3.4. Pri zelo veliki pasovni širini in danemu toku se lahko zgodi, da efektivna vrednost šuma doseže ali celo preseže vrednost danega temnega toka, zato moramo biti pri izbiri pasovne širine previdni.

Termični (ali Johnsonov) šum je posledica termičnega gibanja prostih nosilcev, ki je neurejeno in kaotično. Trenutna prerazporeditev nosilcev in trki povzročijo majhna nihanja napetosti na priključkih elementa. Efektivna vrednost šuma tega toka je podana z enačbo 15.

$$I_{\rm JN} = \sqrt{\frac{4 \cdot k_{\rm B} \cdot T}{R_{\rm SP}} \cdot BW}$$
(15)

Pri tem je $k_{\rm B}$ Boltzmannova konstanta (1,38·10⁻²³ J/K), *T* temperatura v K, $R_{\rm SP}$ upornost spoja v Ω, *BW* pasovna širina v Hz.

Iz obeh enačb vidimo, da je vrednost šuma močno odvisna od pasovne širine. Manjša kot je, manjša je efektivna vrednost šuma.

4 Zasnova merilnika

Merilnik temelji na merjenju povprečne optične moči s fotodiodo. Pri izbiri le-te smo bili pozorni na številne karakteristike, med katerimi sta najpomembnejša spekter delovanja fotodiode in z njim povezan faktor odzivnosti *R* (ang. responsitivity), s katerima smo zagotovili ustreznost delovanja v omrežjih CWDM.

Izhodna veličina fotodiode je električni tok, zato potrebujemo za nadaljnjo obdelavo signala ustrezen tokovno napetostni pretvornik. Zaradi velikega razpona svetlobnih moči, ki jih merimo, potrebujemo pretvornik, ki ima vgrajeno logaritemsko funkcijo pretvarjanja toka fotodiode v električno napetost in možnost dodatnega ojačenja izhodnega signala, namenjeno prilagoditvi vhodnim nivojem analogno digitalnega (AD) pretvornika. Osnovno shemo merilnika prikazuje slika 22. Na njej je poleg merilnega dela dodan tudi del z mikrokrmilniškim sistemom, ki merilnik zaokrožuje v celoto.



Slika 22: Bločna shema merilnika optične moči

V poglavju 3 smo definirali pojem povprečne optične moči. Povprečna moč sprejetega signala je premosorazmerna enosmerni komponenti izhodnega toka, ki ga fotodioda generira. V omrežju imamo opravka s signali pravokotnih pulzov, zato za ločevanju enosmerne komponente signala od njenih višjih harmonskih komponent, potrebujemo ustrezno nizkopasovno sito [19]. Na vhodni stopnji je to fotodioda, ki z lastno notranjo

upornostjo in kapacitivnostjo tvori RC-člen. Drugo nizkopasovno sito predstavlja izhod logaritemskega ojačevalnika, ki je na izhodu zaključeno še z enim sitom 1. reda [19], nizke mejne frekvence. Signal na izhodu je tako povprečen in primeren za pretvorbo v digitalno obliko.

Uporabljena sita imajo v vezju dvojno vlogo, saj skrbijo tudi za izločanje visokofrekvenčnih komponent šuma, ki jih povzročajo uporabljeni elementi in motnje na napajalnih linijah. Pasovna širina sit je temu primerno ustrezno majhna. Za fotodiodo znaša ta podatek 300 MHz, za logaritemski ojačevalnik 10 MHz. Izhodni člen smo v skladu s priporočili proizvajalca tokovno napetostnega pretvornika omejili na 3,2 kHz.

Členi prvega reda duši določeno komponento signala toliko, kolikokrat je njena frekvenca višja od mejne frekvence člena [19]. Frekvenca vhodnega moduliranega signala znaša 2 GHz, kar je dobrih 6,7 krat več, kolikor znaša pasovna širina diode, 200 krat več kolikor znaša omejitev logaritemskega ojačevalnika ter 625000 krat več kot znaša pasovna širina izhodnega RC-člena. Primerno dušenje komponent vhodnega signala je tako ustrezno zagotovljeno. Nizkoprepustnemu situ sledi linearni ojačevalnik, ki prilagodi nivoje signala, primerne vhodu analogno digitalnega pretvornika.

AD pretvornik je nadalje preko komunikacijskega vodila povezan na mikrokrmilnik, ki digitalne vrednosti podatkov ustrezno obdela in jih v realnem času prikazuje na zaslon v dveh enotah (dBm in μW). Uporabljeni mikrokrmilnik skrbi tudi za interakcijo z uporabnikom preko tipk in zaslona na razvojni plošči. Uporabnik določi, kaj želi meriti in kakšne nastavitve pri tem uporabi.

Merilni del, ki ga sestavljajo fotodioda, tokovno napetostni pretvornik, polprepustno sito, linearni ojačevalnik ter analogno digitalni pretvornik, je napajan ločeno od razvojnega kompleta, na katerem se nahajajo mikrokrmilnik in ostala periferija. Napajanje merilnega dela je zagotovljeno preko zunanjega napajalnika in stabilizatorja napetosti, medtem ko se razvojni komplet napaja preko USB povezave.

38

4.1 Senzor

Pri izbiri senzorja smo bili pozorni na precej dejavnikov. Iskali smo senzor, ki ima poleg ustrezne fotodiode vgrajen tudi delilnik optične moči, kar omogoča neposredno vključitev senzorja v zvezo. Uporabili smo senzor IPD-1-S5 [20]. Oznaka IPD (ang. Integrated Tap Photo Detector) pomeni, da je v senzor že vključen delilnik svetlobe, ki za razliko od opisanih v podsekciji 2.2.6, deluje na principu polprepustnega zrcala, ki del svetlobe prepusti, del pa odbije. Številka 1 v oznaki pove, da je senzor enokanalen, medtem ko S5 predstavlja prepustnost zrcala, ki je 5 odstotna. Slednje pomeni, da se 95 odstotkov moči prenese naprej v zvezo, 5 odstotkov pa jo vpade na vgrajeno fotodiodo. Pri tem je faktor odzivnosti definiran kot razmerje vrednosti moči na glavnem, 95 odstotnem izhodu, proti izhodnemu toku fotodiode in ne kot razmerje 5 odstotnega izhoda, proti generiranemu toku [21], [22], [23]. Shema senzorja je prikazana na sliki 23.



Slika 23: Shema senzorja [20]

Senzor je zapakiran v robustno aluminijasto ohišje. Izkaže se, da je zaradi tega nihanje toka fotodiode na spremembe temperature majhno (poglavje 6). Delovno območje senzorja je med 0 °C in 70 °C, kar ustreza zastavljenim kriterijem.

Vhodno in izhodno vlakno sta na delilnik privarjena, druga konca vlaken pa zaključena s konektorjema LC-SPC, kar omogoča enostavno sklopitev v obstoječo prenosno pot z ustreznim adapterjem. Vhodno vlakno je po podatkih proizvajalca modre barve, medtem ko je izhodno vlakno belo. Ker je naprava pasivna, velja recipročnost, torej lahko vhod in izhod med seboj tudi zamenjamo. Vstavitveno slabljenje znaša 0,6 dB in vpliva na zvezo kot izguba dodatno vgrajenega spoja. Dušenje odbitih signalov je dovolj veliko, zato je vpliv na vhodni signal zanemarljiv. Spektralni odziv vgrajene fotodiode zajema valovne dolžine celotnega CWDM pasu od 1271 nm do 1611 nm. Odziva v grafični obliki v katalogu proizvajalca ni, zato si je potrebno pomagati s podatki o odzivnosti fotodiode, katere razpon se giblje med 40 mA/W in 70 mA/W. Ta podatek je karakterističen za vsako valovno dolžino, zato ga je potrebno izmeriti². V našem primeru smo razpon odzivnosti uporabili za izračun spodnje meje vpadne moči na diodo (minimalna občutljivost), medtem ko zgornjo mejo vpadne moči (maksimalna občutljivost) določi proizvajalec in znaša +16 dBm. Prekoračitev te vrednosti vodi diodo v nasičenje (podsekcija 3.3.5), ki linearnost pretvorbe uniči, zato je potrebno vnaprej poznati moč referenčnega vira ali imeti vsaj oceno moči, ki jo pričakujemo. V kolikor nismo popolnoma prepričani, dodamo v zvezo nastavljivi slabilnik (ang. attenuator), s katerim zmanjšamo moč pod kritično mejo.

Spodnjo mejo občutljivosti, kot smo že omenili, določa temni tok diode, ki je odvisen od temperature in zaporne napetosti diode. Dobro ohišje senzorja onemogoča velika nihanja temnega toka zaradi sprememb temperature, kar pokažemo v poglavju 6. Tako ostane kritična zaporna napetost. Če bi uporabili fiksno zaporno napetost, bi glede na podatek iz kataloga pri 5 V pričakovali 5 nA temnega toka. Vendar tokovno napetostni pretvornik uporablja princip prilagodljive zaporne napetosti (ang. adaptive bias) [23]. Zaporna napetost na diodi v odvisnosti od moči vpadne svetlobe lahko niha od 0,1 V do približno 2 V, zaradi česar se spreminja tudi temni tok. Karakteristike odvisnosti temnega toka od zaporne napetosti proizvajalec specifično ne podaja, zato je nemogoče predvideti realno obnašanje temnega toka in s tem povezanega šuma, ki ga povzroča.

² Za nas podatek o odzivnosti diode pri vsaki valovni dolžini ni ključnega pomena, saj zaradi posebnih lastnosti tokovno napetostnega pretvornika izpade iz enačbe, s katero opišemo pretvorbo toka v napetost. Seveda ga ne zanemarimo, ampak uporabimo posredno, preko kalibracijskih enačb (poglavje 6).

4.2 Tokovno napetostni pretvornik

Za pretvorbo toka fotodiode v električno napetost uporabljamo integrirano vezje AD8304 [23], optimizirano za merjenje moči v optičnih komunikacijah. Vezje že vsebuje logaritemski ojačevalnik, linearni ojačevalnik in omogoča priklop več vrst nizkopasovnih sit. Vezje vsebuje tudi modul za izravnavo temperature, kar omogoči uporabo v širokem temperaturnem območju od –40 0 C do +70 0 C. Konceptualna shema vezja je prikazana na sliki 24.



Slika 24: Shema električnega vezja za krmiljenje fotodiode [23]

Logaritemski ojačevalnik omogoča pretvorbo širokega območja tokov od 100 pA do 10 mA v napetost. Tipična napaka pretvorbe za območje med 1 nA in 1 mA je 0,1 dB. Zunaj tega območja je napaka večja in doseže tudi 0,7 dB, zato je za doseganje zastavljene natančnosti 0,5 dB potrebno paziti na območje merjenja.

Logaritemska pretvorba je zasnovana na dveh ključnih parametrih: koeficientu strmine premice ter točki presečišča logaritemske funkcije z abscisno osjo in je izpeljana iz znanega logaritemskega razmerja med napetostjo bazno-emitorskega spoja (U_{BE}) in kolektorskim tokom (I_{C}) bipolarnega tranzistorja [23, 24]. Razmerje prikazuje enačba 16.

$$U_{\rm BE} = V_{\rm T} \cdot \log_{10} \left(\frac{I_{\rm C}}{I_{\rm S}}\right) \tag{16}$$

Pri tem V_{T} in I_{S} predstavljata termični napetostni ekvivalent in reverzni tok nasičenja baznoemitorskega spoja tranzistorja. Z ustreznimi podsklopi, ki so integrirani v samo vezje, omenjena parametra iz enačbe izločimo, saj sta oba močno temperaturno odvisna. Nova oblika enačbe ne vsebuje členov, ki so temperaturno odvisni, in je primerna za merjenje signala fotodiode [23].

$$U_{\rm izh} = V_{\rm Y} \cdot \log_{10} \left(\frac{I_{\rm PD}}{I_{\rm Z}}\right) \tag{17}$$

 $V_{\rm Y}$ predstavlja strmino premice, I_z pa točko presečišča logaritemske funkcije z abscisno osjo. Pri tipičnih vrednosti $V_{\rm Y}$ = 0,2 V/dekado in I_z = 100 pA, dobimo naslednjo odvisnost izhodne napetosti od vhodnega toka, ki jo prikazuje slika 25.



Slika 25: Odziv napetosti glede na vhodni tok fotodiode [23]

Slika 25 prikazuje realni odziv vezja glede na vhodni tok. Vidimo, da je pretvorba zadovoljivo linearna in tudi temperaturno precej neodvisna. Majhna odstopanja se pojavijo zlasti v mejnih točkah, a glede na ogromen razpon, je to zanemarljivo. Koeficient premice in točko presečišča je mogoče enostavno spreminjati, a je izbrani razpon optimalen, zato ga ne spreminjamo.

Izhod logaritemskega ojačevalnika je omejen na 1,6 V. Za izvedbo prilagoditve nivoja vhodu AD pretvornika potrebujemo ustrezno ojačenje. Zagotovimo ga z vgrajenim linearnim ojačevalnikom in upori v povratni zvezi, ki definirajo ojačenje po enačbi 18.

$$G = 1 + \frac{R_4}{R_3}$$
(18)

Izhodna napetost je ne glede na izbiro faktorja ojačenja omejeno z napajalno napetostjo, s katero napajamo celoten tokovno napetostni pretvornik. Priporočena vrednost napajanja je 5 V, čeprav je dovoljen tudi večji razpon. Če je napetost stabilna, je tudi delovanje optimalno. Pri 5 V so odstopanja od tipične vrednosti napake pretvorbe najmanjša [TPC3, 23].

Shemo merilnega dela vezja prikazuje slika 26.



Slika 26: Shema merilnega dela vezja

Iz slike vidimo, da je fotodioda priključena v zaporni smeri, saj je potencial priključka VPDB vedno večji od potenciala INPUT. VPDB je del prilagodljive zaporne napetosti (ang. adaptive bias), ki glede na vhodni tok fotodiode linearno prilagaja napetost te točke od 0,6 V do 2,6 V, za tokove od 100 pA do 10 mA, kar je detajlno opisano v [23], kvalitativno pa prikazuje slika 27.



Slika 27: Karakteristika napetosti potenciala VPDB v odvisnosti od toka fotodiode [23]

Za meritve optične moči v širokem dinamičnem področju je to ugodno, saj nizka napetost zmanjšuje temni tok, medtem ko visoka napetost preprečuje izgubo zaporne napetosti pri velikih vhodnih tokovih [23]. Potencial točke INPUT je konstanten in znaša 0,5 V. Kondenzator C_3 je namenjen zmanjševanju šuma na oklopnih vozliščih VSUM. Uporabimo ga, če za napajanje fotodiode uporabljamo nastavljivo zaporno napetost. Privzeta vrednost je 10 nF.

Kondenzator C_2 in upor R_2 skrbita za stabilizacijo vezja in hkrati omejujeta pasovno širino. Priporočena izbira vrednosti elementov za zagotovitev stabilnosti čez celotno območje vhodnih tokov je $C_2 = 1$ nF in $R_2 = 750 \Omega$. Kondenzator C_4 zmanjšuje impedanco v tem vozlišču in izboljšuje visokofrekvenčno natančnost pretvorbe [23].

Upora R_3 in R_4 med priključkoma BFNG in VOUT sta vključena v povratno vezavo linearnega ojačevalnika, v kateri določata ojačenje izhoda krmilnega vezja po enačbi 18. Izhodno napetost tako določa enačba 19.

$$U_{\rm izh} = G \cdot V_{\rm Y} \cdot \log_{10} \left(\frac{l_{\rm PD}}{l_{\rm Z}}\right) = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \cdot V_{\rm Y} \cdot \log_{10} \left(\frac{l_{\rm PD}}{l_{\rm Z}}\right)$$
(19)

Pri tipičnih vrednostih $V_{\rm Y}$ = 0,2 V/dekado, $I_{\rm Z}$ = 100pA in izbiri R_3 = R_4 = 10 k Ω dobimo:

$$U_{\rm izh} = 0.4 \cdot \log_{10} \left(\frac{I_{\rm PD}}{100 \,\mathrm{pA}} \right) \tag{20}$$

Izhod iz priključka VLOG, ki je natančno umerjen na 5 k Ω [23], skupaj s C_5 = 10 nF tvori že omenjeno nizkopasovno sito mejne frekvence 3,2 kHz med izhodom logaritemskega ojačevalnika in vhodom linearnega ojačevalnika BFIN. Takšno sito učinkovito znižuje šum, kar je še posebej izrazito pri nizkih vhodnih tokovih [23]. Če želimo večjo učinkovitost, uporabimo sita višjih redov.

Vezje je napajano iz stabilizatorja preko dušilke L_2 in kondenzatorja C_6 na priključka VPS1 in VPS2. Omenjeni LC člen preprečuje vdor morebitnih tokovnih konic. Stabilizator je opisan v nadaljevanju.

4.3 Analogno digitalni pretvornik

Šum povzroča negotovost merjenih vrednosti signala in je značilen za vse vrste merilnih sistemov. V logaritemskih ojačevalnikih je še posebej izrazit pri nizkih vhodnih tokovih. Ena izmed metod reševanja tega problema je že omenjeno filtriranje šuma z uporabo nizkoprepustnih sit, medtem ko je druga metoda domena digitalne obdelave signala, kjer opravimo zadostno število meritev v primernem časovnem intervalu. Ob zadostni količini vzorcev, izračunamo povprečno vrednost, ki je dober približek pravi merjeni vrednosti. Pri tem moramo vzeti v zakup čas, ki ga imamo na voljo in hitrost pretvorbe, ki jo želimo.

Za pretvorbo analogne vrednosti signala smo uporabili analogno digitalni pretvornik ADS1115 [25]. Pretvornik ima 16 bitno ločljivost, možnost izbire enojnih ali diferencialnih vhodov, možnost nastavljanja različnih hitrosti zajemanja vzorcev ter možnost nastavitve ustreznega merilnega območja, ki zagotavlja visoko resolucijo merjenja tako šibkih kot močnih signalov. Nastavitve spreminjamo programsko preko vmesnika l²C [25].

AD pretvornik pozna dva glavna načina delovanja, neprekinjen način ter način enkratnega posnetka. V slednjem se po opravljeni pretvorbi pretvornik samodejno izklopi. Napajalna napetost se lahko giblje med 2,0 V in 5,5 V. Zgornja vrednost vedno določa omejitev maksimalne izbire vhodnega merilnega območja (MO), ki je zaradi napajanja s stabilno napetostjo 5 V omejena na to vrednost. Temperaturno območje delovanja se giblje med – 40 °C in +125 °C, kar zelo dobro ustreza našim zahtevam. Shemo priključitve v vezje prikazuje slika 28.



Slika 28: Priklop AD pretvornika

Za priklop signala iz tokovno napetostnega pretvornika smo uporabili enega od štirih vhodov. Uporabili smo AINO, ki ga je bilo v snovanju programske opreme potrebno definirati kot enojni vhod. AD1115 namreč omogoča priklop štirih enojnih ali dveh diferencialnih linij. Priključka RDY v delu nismo uporabili, a smo ga z uporom za dvigovanje nivoja (ang. pull-up) vseeno povezali na napajalno linijo za morebitno kasnejšo uporabo. Priključek ADDR smo povezali na maso. Nivo tega priključka določa I²C naslov pretvornika, ki ga poiščemo v katalogu. Vezje napajamo preko dušilke L_1 in kondenzatorja C_1 , da preprečimo vstop morebitnih tokovnih konic v vezje. Komunikacijski liniji vodila I²C po specifikaciji [25] zahtevata visoki nivo, zato jih z dvema uporoma (pull-up) pritrdimo na napajalno linijo in hkrati na priključni konektor, kot prikazuje slika 29. Konektor nadalje uporabimo za priklop mikrokrmilnika.



Slika 29: Priklopni konektor in pull up za I²C

AD pretvornik omogoča izbiro 6-ih merilnih območij (MO) v razponu od 256 mV do 6144 mV. Zgornja vrednost je omejena na velikost napajalne napetosti, zato zgornji del skale pri maksimalni vrednosti MO ni dosegljiv. V prejšnji sekciji smo določili vrednost ojačenja linearnega ojačevalnika G = 2. Pri maksimalnem izhodu logaritemskega ojačevalnika 1,6 V tako pričakujemo največ 3,2 V izhodne napetosti. Primerna izbira merilnega območja je tako 4096 mV. Pri tej vrednosti je vhodna impedanca pretvornika enaka 6 M Ω , zato pretvornik na izhod linearnega ojačevalnika (impedanca 0,5 Ω) praktično nima vpliva.

Ločljivost AD pretvornika je 16 bitov, kar teoretično zagotavlja 2¹⁶ logičnih nivojev. V resnici MSB bit določa predznak števila, medtem ko ostalih 15 bitov predstavlja dejansko vrednost meritve [25]. Rezultat je predstavljen v dvojiškem komplementu, zato imamo pri uporabi enojnega vhoda na voljo le 2¹⁵-1 = 32767 logičnih nivojev. Ločljivost enega kvanta je za MO 4096 mV enaka 4096 mV/32767 \approx 0,125 mV. Pri tem smo privzeli, da je pretvorba idealna in nismo upoštevali možnih napak. Najslabša možnost, ki jo podaja katalog, je odstopanje merjene vrednosti za ±3 LSB. Največjo možno napako kvantizacije tako ocenimo na 0,375 mV.

Hitrost vzorčenja pretvornika je odvisna od naše nastavitve in se giblje v razponu od 8 do 860 vzorcev na sekundo. Za popolno rekonstrukcijo signala potrebujemo frekvenco vzorčenja, ki je vsaj dvakrat večja od najvišje frekvence, ki je prisotna v merjenem signalu. Cilj naloge ni rekonstrukcija signala, temveč merjenje enosmerne komponente signala, ki ima frekvenco 0 Hz, zato bi v idealu zadoščala že ena sama meritev. Ker je naš signal kljub ustreznemu filtriranju po prenosni poti še vedno poln nekaterih harmonskih komponent ter šuma, smo kljub zaključitvi z nizkoprepustnim sitom prisiljeni opraviti večje število meritev, ki te vplive omilijo, saj se povprečna vrednost čedalje večjega števila vzorcev približuje povprečni vrednosti signala.

Želimo, da sistem meritve prikazuje v realnem času s hitrostjo, ki jo človek lahko spremlja, kar pomeni osveževanje merjenih vrednosti v času vsaj 0,5 sekunde. Pri najvišji možni hitrosti vzorčenja, ki nam je na voljo, dobimo nov vzorec vsake 1/860 Hz ≈ 1,16 ms. V času 0,5 sekunde lahko zajamemo približno 431 vzorcev. Če to ne zadostuje, povečamo čas zajemanja vzorcev, vendar ne toliko, da bi proces prikazovanja meritev preveč upočasnili, kar bi se odražalo pri preveliki zakasnitvi spremembe merilnega rezultata ob spremembi nivoja optičnega signala (podsekcija 3.2.1). Ugotovili smo, da nam pri takšni hitrosti vzorčenja za kvalitetni rezultat zadošča že 150 vzorcev.

Vzorce zajemamo na dva načina. Način enkratnega posnetka ni primeren, saj se pretvornik po vsaki pretvorbi izklopi. Za branje enega posnetka je potrebno vsakič znova inicializirati pretvornik, počakati na pretvorbo, ugotoviti, da je pretvorba končana in jo nato prenesti na mikrokrmilnik. Iz podatkov v katalogu in predpostavljeni tipični hitrosti komunikacije 100 kHz smo izračunali, da je čas, v katerem pridobimo en vzorec, večji od 2 ms. Slednje je daleč od optimalnega, zato uporabimo neprekinjeni način delovanja.

Prednost neprekinjenega načina je v pričetku pridobivanja novega vzorca takoj, ko se zadnja pretvorba zaključi. Vrednost zadnje pretvorbe se shrani v register pretvorbe (ang. conversion register), kjer čaka na prevzem. V primeru, da je do nastanka novega vzorca ne prevzamemo, se stara vrednost prepiše z novo vrednostjo.

47

Časovno gledano je takšen način optimalen, saj s primerno tehniko branja ali uporabo prekinitvenih rutin v programski kodi zagotovimo prenos podatka praktično takoj, ko je le-ta na voljo. Razlika med zgornjim in tem načinom morda ni toliko očitna, dokler ne preizkusimo izvajanja v praksi. Mikrokrmilnik, ki s sistemom upravlja, ne bere samo podatkov, ampak skrbi še za vrsto drugih procesov, zato je hitrost prenosa precej pomemben faktor, v kolikor si ne želimo nakopati težav z asinhronim načinom programiranja. Podrobneje se te tematike lotimo v sekciji 5.3.

4.4 Napajanje

V delu smo za napajanje uporabili standardno 5 V napajanje, realizirano z napetostnim stabilizatorjem LM117 [26]. Bistvo takšnega pristopa je možnost priključitve na vse vrednosti enosmerne napetosti med 7 V in 15 V, kar zagotovimo že s cenenim zunanjim enosmernim napajalnikom. Shema napajalnega dela vezja je prikazana na sliki 30, spodaj. Uporabljene vrednosti elementov so privzete iz kataloga [26].



Slika 30: Napajalni del vezja

4.5 Mikrokrmilniško vezje

Za krmiljenje analogno digitalnega pretvornika in interakcijo z uporabnikom smo uporabili Stellarisov razvojni komplet [5], ki že vsebuje vse ključne komponente, potrebne za izdelavo praktične aplikacije. Ključne komponente so mikrokrmilnik LM3S6965 [27] z jedrom ARM Cortex[™] - M3 [28] in možnostjo stanja mirovanja v primeru napajanja z baterijo, ustrezno število zunanjih priključkov, komunikacijsko vodilo I²C, že vgrajene tipke ter zaslon, preko katerega uporabnik s pomočjo smernih tipk, izbira ustrezne nastavitve. Vezje vsebuje tudi integrirani mrežni vmesnik, možnost shranjevanja podatkov na nosilec SD ter implementacijo asinhronega serijskega vmesnika (ang. UART) na priključno komunikacijsko napajalno vodilo USB, kar omogoča nadaljnje razširitve zgrajene aplikacije.

Zanj smo se odločili na podlagi pozitivnih izkušenj, ki smo si jih pridobili z uporabo omenjenega kompleta pri drugih projektih, predvsem zaradi odlične podpore s strani proizvajalca, količine že izdelanih knjižnic, številnih uporabnih primerov ter odlične pripadajoče dokumentacije. Drugi razlog je posedovanje opreme za programiranje in razhroščevanje v obliki JTAG [30] programatorskega vmesnika Ulink2 [31] ter Keil-ovega [32] razvojnega okolja µVision4 [33], v katerem smo praktično aplikacijo spisali.

Sliko razvojnega kompleta z označenimi ključnimi komponentami prikazuje slika 31. Shemo vezja in ostalih podsklopov bralec najde v [29].



Slika 31: Razvojni komplet LM3S6965 [29]

Analogno digitalni pretvornik za komunikacijo z mikrokrmilnikom uporablja komunikacijo vodilo I²C, za katerega potrebujemo tri fizične povezave; podatkovno (SDA), povezavo ure (SCLK) ter maso. Na merilnem delu vezja je temu namenjen konektor K1 (slika 29), medtem ko smo za priklop na razvojno ploščo uporabili priključke na levi strani razvojnega kompleta (slika 31), kamor smo s spajkanjem pritrdili priključno letev, ki omogoča lažjo priključitev povezovalnih kablov. Oznake in številke uporabljenih priključkov prikazuje slika 32.



Slika 32: Uporabljeni priključki za komunikacijo [29]

Iz slike vidimo, da smo za priključitev linije ure uporabili priključek 5, podatkovne linije priključek 4 ter mase priključek 2. Priključka ure in podatkovne linije sta lahko tudi splošno namenska (ang. general I/O), zato smo ju morali pri pisanju programske opreme definirati tako, da resnično predstavljata vhod in izhod I²C modula mikrokrmilnika.

5 Programski del

Programski del uporabniku omogoča enostavno upravljanje merilnika s pomočjo smernih tipk, izvedbo določenih nastavitev ter prikaz meritve v realnem času na zaslonu razvojnega kompleta. Aplikacija je zgrajena tako, da omogoča implementacije novih funkcionalnosti merilnika, zato smo jo v grobem razdelili na del, ki se ukvarja s komunikacijo in prenosom podatkov iz analogno digitalnega pretvornika in del, ki skrbi za ustrezno obdelavo podatkov, njihov prikaz in uporabniško izkušnjo. Napisana je v programskem jeziku C.

Uporabnik ima možnost izbire različnih načinov delovanja merilnika, do katerih dostopa preko glavnega sistemskega menija, ki se ob vklopu merilnika izriše na zaslon. Za sprehajanje po menijih uporabimo navigacijske tipke (slika 31, levo), medtem ko za potrditev izbire ali vrnitev v osnovni meni uporabimo izbirno tipko (slika 31, desno). Načini delovanja so plod lastnih želja in potreb kot tudi povzetek funkcionalnosti konkurenčnih merilnikov, kot je na primer merilnik Extech FO-600 [34], ki nam je služil za referenco. Med vsemi predvidenimi načini je najpomembnejši prvi, ki najbolje zaokrožuje zadane cilje in je podrobneje prestavljen v sekciji 5.1. Ostali načini so iz njega večinoma izpeljani in zahtevajo le nadgradnjo programske kode, ki je predmet nadaljnjih izboljšav merilnika.

Kompleksnost programa smo zmanjšali z uporbo knjižnice StellarisWare [35]. V njej se nahajajo številni gonilniki, knjižnice, najrazličnejša podpora, kot tudi primeri končnih programov. Pri iskanju smo naleteli na primer kode, ki realizira krmiljenje krtačnega motorja [36,37]. Po pregledu omenjenih dokumentov smo ugotovili, da primer že vsebuje realiziran sistem sistemskih menijev, ki ustrezajo našim zahtevam.

Razvojni komplet, na katerem programska koda temelji, je Stellaris LM3S2965 [38]. Iz oznake vidimo, da gre praktično za isto družino mikrokrmilnikov. Podrobnejša analiza pokaže le nekaj odstopanj pri zgradbi ploščice razvojnega kompleta ter razporeditvi priključkov. Z nekaj modifikacijami kode smo omenjeni primer uspešno zagnali tudi na našem razvojnem kompletu. S tem smo postavili osnovo, ki služi za nadaljnjo implementacijo naše kode. Na tem mestu je potrebno še poudariti, da so vsi primeri končnih programov, vključno z že

53

omenjenim, zgrajeni precej hierarhično, zato je dodajanje novih ali brisanje starih funkcij precej poenostavljeno, kar ustreza zahtevi možnosti implementacije po novi funkcionalnosti merilnika.

Uporabljen primer se imenuje BDC-UI in se nahaja v mapi ...\StellarisWareAll\boards\rdkbdc\bdc-ui [35]. Uporaba tipk je realizirana preko periodične časovne prekinitve, sistemskega časovnika SysTick [39] in že vsebuje zaznavanje pritisnjenosti tipke (ang. debouncing). V primeru, da pritisnemo katero od obstoječih tipk, se stanje zabeleži v posebno spremenljivko stanj, ki je globalno dostopna. Meniji, ki se prikazujejo na zaslonu razvojnega kompleta, so realizirani s pomočjo posebnih gradnikov (ang. widgets), ki jim določimo številne lastnosti, kot so postavitev na zaslonu, velikost vnesenega niza znakov, senčenje in druge, kar smo izkoristili pri izdelavi uporabniškega vmesnika. Način posodabljanja menijev je vedno izveden v lokalni neskončni zanki in poteka toliko časa, dokler ne pritisnemo katere od možnih tipk in tako zahtevamo spremembo stanja pozicije, nastavitve ali zamenjave menija. Po izvedbi omenjene spremembe se osveževanje zaslona zopet nadaljuje v neskončni zanki, kjer se ponovno preverja status spremembe stanja. Čas med osveževanjem zaslona in pogojem preverjanja stanja tipk izkoristimo za izvajanje naših algoritmov.

5.1 Naloga merilnika moči

Spomnimo se, da smo v nalogi kot primarni cilj definirali merjenje optične moči spektra CWDM prikazane v enotah dBm in μ W ter v sekciji 3.2 že omenjene funkcije izračuna izgub merjenca tudi, če referenca vira ni absolutno znana.

Merjenje moči posameznih valovnih dolžin spektra zahteva poleg ustrezne opreme opisane v sekciji 2.2, tudi njim lastne kalibracijske enačbe, kar pokažemo v poglavju 6. Spomnimo naj, da s pomočjo tokovno napetostnega pretvornika in AD pretvornika kot merjeno veličino pridobimo le napetost, ki jo je potrebno preoblikovati v merjeno moč v enoti dBm. Enačbe temeljijo na opravljenih meritvah in upoštevajo lastnost spektra fotodiode in velikost faktorja odzivnosti pri vsaki valovni dolžini, ki v nobeni izmed enačb v sekciji 4.2 ni

54
upoštevan. Uporabnik z izbirnimi tipkami izbere valovno dolžino, na kateri opravlja meritev, merilnik pa temu primerno prilagodi rezultat. Za pretvorbo enote dBm v enoto μ W preoblikujemo enačbo 4 in dobljeni izraz množimo s 1000 zaradi prilagoditve enoti μ W. Dobimo enačbo 21.

$$P \left[\mu W\right] = 10^{\frac{P[dBm]}{10}} \cdot 1mW \cdot 1000$$
(21)

Vidimo, da za realizacijo slednje potrebujemo potenčno funkcijo, ki žal ni vključena v nobeno izmed obstoječih knjižnic, zato smo jo poiskali na svetovnem spletu. Funkcija se imenuje fastPow [40] in je v približku dovolj natančna za demonstracijski prikaz.

Poleg nastavitve valovne dolžine imamo na voljo možnost nastavitve vrednosti reference, ki predstavlja zadnjo merjeno vrednost, pri kateri smo nastavitev opravili. Kot smo opisali v sekciji 3.2, služi referenca za avtomatski izračun izgub merjenca ali izračun izgub prenosne poti, če jo naprej nastavimo pri samem viru svetlobe ter nato opravimo še meritev v končni točki vlakna. Za izračun uporabimo enačbo 11, v kateri smo spremenili le oznaki koeficientov za lažjo predstavo. Predstavlja jo enačba 21.

$$Loss = P_{\rm ref} - P_{\rm trenutna} \tag{21}$$

Pri tem P_{ref} predstavlja shranjeno referenčna vrednost, $P_{trenutna}$ pa zadnjo merjeno vrednost. Izgube (loss) so v skladu z že omenjenim dogovorom pozitivne vrednosti.

V delu smo realizirali izbiro 4-ih valovnih dolžin 1471 nm, 1531 nm, 1571 nm ter 1591 nm. Število valovnih dolžin in njim pripadajočih faktorjev kalibracijskih enačb je moč enostavno razširiti z manjšimi posegi v kodo.

Opisan način smo zaradi enostavnosti upravljanja poimenovali enostavni merilnik moči (ang. Simple power meter). Nahaja se na poziciji ena sistemskega menija. Ob tem naj dodamo, da smo zaradi vedno bolj izvozno naravnanega načina poslovanja podjetja v celotnem sklopu menijev uporabili angleški jezik.

5.2 Uporabniški vmesnik

Uporabniški vmesnik smo realizirali na podlagi že omenjenega primera BDC-UI. Glede na strukturo omenjenega programa smo za potrebe zgoraj opisanih funkcionalnosti merilnika morali dodati, spremeniti ali zbrisati dele kode, ki se nahajajo v datotekah menu.c, voltage.c ter status.c. Popolnoma na novo smo napisali rutine, ki se nahajajo v datoteki measure.c. Datoteka voltage.c je v originalnem programu 1. sistemski podmeni, ki ga v našem primeru nadomestimo s funkcijo v sekciji 5.1 omenjenega enostavnega merilnika moči.

5.2.1 Glavni meni

V datoteki menu.c se nahaja glavni sistemski meni. V njem smo v skladu s potrebami spremenili del kode, ki ga prikazuje izsek kode 1. Definicijo funkcije CanvasStruct() in pomen njenih parametrov bralec najde v datoteki canvas.h.

menu.c:

```
// Definicija zgradbe menija
                                                     _____
static tCanvasWidget g_psMenuWidgets[] =
       CanvasStruct(0, 0, 0, &q sRIT128x96x4Display, 0, 0, 128, 8,
      CanvasStruct(0, 0, 0, &g_sRITi28x96x4Display, 0, 24, 128, 8,
CANVAS_STYLE_FILL | CANVAS_STYLE_TEXT, ClrBlack, 0, ClrWhite,
&g_sFontFixed6x8, "Fiber Length", 0, 0),
CanvasStruct(0, 0, 0, &g_sRITI28x96x4Display, 0, 32, 128, 8,
CANVAS_STYLE_FILL | CANVAS_STYLE_TEXT, ClrBlack, 0, ClrWhite,
&g_sFontFixed6x8, "Calibration", 0, 0),
CanvasStruct(0, 0, 0, &g_sRITI28x96x4Display, 0, 40, 128, 8,
CANVAS_STYLE_FILL | CANVAS_STYLE_TEXT, ClrBlack, 0, ClrWhite,
&g_sFontFixed6x8, "Set welcome screen", 0, 0),
CanvasStruct(0, 0, 0, &g_sRITI28x96x4Display, 0, 48, 128, 8,
CANVAS_STYLE_FILL | CANVAS_STYLE_TEXT, ClrBlack, 0, ClrWhite,
&g_sFontFixed6x8, "Set Date/Time", 0, 0),
CanvasStruct(0, 0, 0, &g_sRITI28x96x4Display, 0, 46, 128, 8,
CANVAS_STYLE_FILL | CANVAS_STYLE_TEXT, ClrBlack, 0, ClrWhite,
&g_sFontFixed6x8, "Set Date/Time", 0, 0),
CanvasStruct(0, 0, 0, &g_sRITI28x96x4Display, 0, 56, 128, 8,
CANVAS_STYLE_FILL | CANVAS_STYLE_TEXT, ClrBlack, 0, ClrWhite,
&g_sFontFixed6x8, "About", 0, 0),
       CanvasStruct(0, 0, 0, &g_sRIT128x96x4Display, 0, 64, 128,
                               CANVAS_STYLE_FILL, ClrBlack, 0, 0, 0, 0, 0, 0),
(0, 0, 0, &g_sRIT128x96x4Display, 0, 72, 128, 8,
CANVAS_STYLE_FILL, ClrBlack, 0, 0, 0, 0, 0, 0),
      80.
                                                                                                            128,
                                                                                                                      8.
                                                                                                        0, 0, 0),
      14
};
```



Končni izgled sprememb je sistemski meni prikazan na zaslonu našega razvojnega kompleta, ki ga prikazuje slika 33.



Slika 33: Izgled sistemskega menija

Na sliki vidimo več možnih načinov delovanja, od katerih smo zaradi že omenjenih razlogov realizirali le prvega, ki smo ga opisali v sekciji 5.1.

5.2.2 Enostavni merilnik moči

Omenjeni podmeni smo podrobneje opisali že v sekciji 5.1, zato na tem mestu prikažemo le rezultat dela in funkcije, ki smo jih pri tem uporabili. Zgradba menija se nahaja v datoteki voltage.c, ki poleg vnosa nastavitev s strani uporabnika skrbi tudi za prikaz meritev, za kar med izvajanjem kliče funkcije v datoteki status.c. Uporabniški vmesnik je zgrajen iz dveh oken. V prvem uporabnik izbira valovno dolžino, nastavi referenco ali se vrne v osnovni meni. Drugo okno je statusno, kjer se v realnem času periodično osvežujejo rezultati merjenja. Sestavljeno je iz rezultata merjenja moči v enoti dBm, kvalitativnega rezultata meritev moči v µW, vrednosti nastavljene reference ter prikaza rezultata izgub v dB. Rezultat tega dela prikazuje slika 34.



Slika 34: Enostavni merilnik moči

Koda, ki pripada realizaciji podmenija enostavnega merilnika moči, je podana v izseku kode 2 in izseku kode 3. Kode podrobneje nismo razčlenjevali, saj menimo, da je s vsemi komentarji in pripombami, ki smo jih vanjo umestili, bralcu razumljiva. Opomnimo, da so deli komentirani v angleškem jeziku, deli osnovnega programa BDC-ui, ki so nujno potrebni za delovanje celotnega programa.

```
voltage.c:
//Simple power meter vhodni program
// Vsebina gradnika za valovno dolzino
static char g_waweLengthBuffer[5];
// Vsebina gradnika za indikator vklopljene reference (set, none)
static char g_referenceBuffer[5];
// Trenutno izbrana pozicija valovne dolzine iz tabele wavelengths
int g_waveLengthId = 0;
// Ali smo nastavili referecno (0=none, 1=set)
int g_referenceId = 0;
// Vrednost reference
float g_referenceValue;
//Zgradba uporabniskega vmesnika
static tCanvasWidget g_psVoltageWidgets[] =
   CANVAS_STILL_III,

0),

CanvasStruct(0, 0, 0, &g_sRIT128x96x4Display, 0, 32, 90, 8,

CANVAS_STYLE_TEXT | CANVAS_STYLE_TEXT_LEFT, 0, 0, ClrWhite, &g_sFontFixed6x8,

"Set Reference :", 0, 0),

CanvasStruct(0, 0, 0, &g_sRIT128x96x4Display, 0, 9, 128, 1,

CANVAS_STYLE_FILL, ClrWhite, 0, 0, 0, 0, 0, 0)
};
// Vhodna funkcija up. vmesnika
//=======
unsigned long
DisplayVoltage(void)
    unsigned long ulPos, ulIdx, ulDelay, ulDemo, ulTime, ulStep;
    long lVoltage;
           // Vektor valovnih dolžin
          int wavelengths[] = {1491, 1531, 1571, 1591};
           // Inicializacija I2C modula
          initMeasure();
           // Inicializacija ADS1115 in nastavitev na neprekinjeni način delovanja
           I2C_burstsend();
           // Definiranje registra iz katerega beremo pretvorbo
           ReadStart();
    //Del kode, ki je ostanek BDC-ui primera.
    //
// Initially, updates to the voltage occur immediately.
    ulDelay = 0;
    // Initially, demo mode is disabled.
    ulDemo = 0;
    ulTime = 0;
ulStep = 0;
```

```
// Disable the widget fill for all the widgets except the one for the
       device ID selection.
    //
for(ulIdx = 0; ulIdx < 4; ulIdx++)</pre>
        CanvasFillOff(g_psVoltageWidgets + ulIdx);
    CanvasFillOn(g_psVoltageWidgets + 1);
    //
// Add the "Voltage Control Mode" panel widgets to the widget list.
    for(ulIdx = 0; ulIdx < NUM_WIDGETS; ulIdx++)</pre>
        WidgetAdd(WIDGET_ROOT, (tWidget *)(g_psVoltageWidgets + ulIdx));
    // Enable the status display.
    StatusEnable(1);
    ^{\prime\prime} // Set the default cursor position to the device ID selection.
    ulPos = 1;
    // Loop forever. This loop will be explicitly exited when the proper
// condition is detected.
Glavna lokalna zanka programa
                ____
    while(1)
                     // V graficni element g_waweLengthBuffer zapišemo trenutno valovno dolzino
usnprintf(g_waweLengthBuffer, sizeof(g_waweLengthBuffer), "%d", wavelengths[g_waveLengthId]);
                     // Prikazemo indikator ali je refernca nastavljena in zapišemo vrednost v gradnik if (g_referenceId == 0) {
                               usnprintf(g_referenceBuffer, sizeof(g_referenceBuffer),"none");
                     }
else {
                               usnprintf(g_referenceBuffer, sizeof(g_referenceBuffer),"set");
                     }
         // Preberemo meritve
        StatusUpdate();
                                                    //se nahaja v status.c
         // Posodobimo zaslon
        DisplayFlush();
        // Sencenje polj (del vzet iz primera)
        //
// See if the up button was pressed.
        if(HWREGBITW(&g_ulFlags, FLAG_UP_PRESSED) == 1)
             // Only move the cursor if it is not already at the top of the
// screen and a delayed voltage update is not in progress.
             if((ulPos != 0) && (ulDelay == 0))
                 // Disable the widget fill for the currently selected widget.
                 CanvasFillOff(g_psVoltageWidgets + ulPos);
                 // Decrement the cursor row, skipping the voltage row when demo
                 // mode is enabled.
                 //
ulPos--;
                 if((ulPos == 2) && (ulDemo != 0))
                 {
                     ulPos--;
                 }
                 //
// Enable the widget fill for the newly selected widget.
                 CanvasFillOn(g_psVoltageWidgets + ulPos);
             }
             // Clear the press flag for the up button.
            HWREGBITW(&g_ulFlags, FLAG_UP_PRESSED) = 0;
        }
        ^{\prime\prime} // See if the down button was pressed.
        if(HWREGBITW(&g_ulFlags, FLAG_DOWN_PRESSED) == 1)
```

```
59
```

```
{
    // Only move the cursor if it is not already at the bottom of the // screen and a delayed voltage update is not in progress.
    //
if((ulPos != 3) && (ulDelay == 0))
         // Disable the widget fill for the currently selected widget.
         CanvasFillOff(g_psVoltageWidgets + ulPos);
         // Increment the cursor row, skipping the voltage row when demo // mode is enabled.
         ulPos++;
         if((ulPos == 2) && (ulDemo != 0))
              ulPos++;
         // Enable the widget fill for the newly selected widget.
         CanvasFillOn(g_psVoltageWidgets + ulPos);
    }
    // // Clear the press flag for the down button.
    HWREGBITW(&g_ulFlags, FLAG_DOWN_PRESSED) = 0;
}
//
// See if the left button was pressed.
//
if(HWREGBITW(&g_ulFlags, FLAG_LEFT_PRESSED) == 1)
{
    // Preverimo, ce se nahajamo na poziciji valovne dolzine
    //
if(ulPos == 1)
     {
         //
// Ker smo pritisnili tipko levo, zmanjsamo pozicijo valovne dolzine, ce ze ni najmanjsa
// Ce smo na prvi poziciji (id=0) ne moremo vec nazaj
                                     if (g_waveLengthId > 0)
                                                 g_waveLengthId--;
                                      }
    }
    //
// Preverimo, ce se nahajamo na poziciji gradnika reference
    else if(ulPos == 2)
{
         // Ker smo pritisnili tipko levo izbrišemo nastavitev refernce
                                     if (g_referenceId > 0)
                                                 q referenceId--;
                                     }
    }
    //
// Clear the press flag for the left button.
    //
HWREGBITW(&g_ulFlags, FLAG_LEFT_PRESSED) = 0;
HWREGBITW(&g_ulFlags, FLAG_LEFT_ACCEL1) = 0;
HWREGBITW(&g_ulFlags, FLAG_LEFT_ACCEL2) = 0;
HWREGBITW(&g_ulFlags, FLAG_LEFT_ACCEL3) = 0;
}
//
// See if the right button was pressed.
if(HWREGBITW(&g_ulFlags, FLAG_RIGHT_PRESSED) == 1)
    // Preverimo, ce se nahajamo na poziciji valovne dolzine
//
if(ulPos == 1)
     {
         g_waveLengthId++;
                                     }
    }
    // Preverimo, ce se nahajamo na poziciji gradnika reference
     else if(ulPos == 2)
    { // ce referenco nastavimo, potem jo tudi preberemo iz ADC v dbm
                                     if (g_referenceId == 0) {
    g_referenceId++;
                                                 // Beremo referenco iz ADC v dBm
```

```
}
             }
             ^{\prime\prime} // Clear the press flag for the right button.
             ///
HWREGBITW(&g_ulFlags, FLAG_RIGHT_PRESSED) = 0;
HWREGBITW(&g_ulFlags, FLAG_RIGHT_ACCEL1) = 0;
HWREGBITW(&g_ulFlags, FLAG_RIGHT_ACCEL2) = 0;
HWREGBITW(&g_ulFlags, FLAG_RIGHT_ACCEL3) = 0;
         }
        //
// See if the select button was pressed.
//
if(HWREGBITW(&g_ulFlags, FLAG_SELECT_PRESSED) == 1)
{
             // // Clear the press flag for the select button.
             HWREGBITW(&g_ulFlags, FLAG_SELECT_PRESSED) = 0;
             //
// Vrnemo se v glavni meni.
             //
if(ulPos == 0)
{
                  //
// Display the menu.
                  ulldx = DisplayMenu(PANEL_VOLTAGE);
                  //
// See if another panel was selected.
                  //
if(ulldx != PANEL_VOLTAGE)
{
                      //
// Disable the status display.
                      StatusDisable();
                      //
// Remove the "Voltage Control Mode" panel widgets.
                      //
for(ulPos = 0; ulPos < NUM_WIDGETS; ulPos++)</pre>
                           WidgetRemove((tWidget *)(g_psVoltageWidgets + ulPos));
                      CanvasTextColorSet(g_psVoltageWidgets + 2, ClrWhite);
                      // // Return the ID of the newly selected panel. //
                      return(ulIdx);
                  }
                     Since the "Voltage Control Mode" panel was selected from the
                  // menu, move the cursor down one row.
                  CanvasFillOff(g_psVoltageWidgets);
                 ulPos++;
CanvasFillOn(g_psVoltageWidgets + 1);
             }
        }
//=======
voltage.h
/_____
// Globalna vhodna funkcija v up. vmesnik (klicana iz menu.c)
```

g referenceValue = ydBm(g waveLengthId, I2C readAVG());

```
// Globalna vhodna funkcija v up. vmesnik (klicana iz menu.c)
extern unsigned long DisplayVoltage(void);
// Globalna spremenljivka trenutno izbrane pozicije valovne dolzine
extern int g_waveLengthIG;
// Globalna spremenljivka, ki definira, ali je refernca trenutno nastavljena
extern int g_referenceId;
// Globalna spremenljivka z vrednostjo reference
extern float g_referenceValue;
```

}

Izsek kode 2: Realizacija podmenija Enostavnega merilnika moči

V voltage.c smo realizirali prvo (nastavitveno) okno podmenija enostavnega merilnika moči. Znotraj glavne lokalne zanke, kot smo že omenili, periodično posodabljamo statusni meni (funkcija StatusUpdate()), katerega definicija in delovanje je podano v datoteki status.c. V tej datoteki smo realizirali tudi funkciji, ki skrbita za pravilen prikaz rezultatov in preračun enot moči. Funkciji se imenujeta abs() in fastPow().

```
status.c:
                            _____
// Funkcije ReadAVG, ydm
#include "measure.h"
   Globalne spremenljivke iz up. vmesnika (referenca, valovna dolžina)
#include "voltage.h"
//------
// Vsebina gradnikov za prikaz statusa
//------
static char g_powerdBm[8];
static char g_poweruW[8];
static char g_Reference[8];
static char g_loss[8];
//==
// Definicija prikaza statusa (spodnji del zaslona)
                ------
static tCanvasWidget g_psStatusWidgets[] =
    // Ločilna črta
CanvasStruct(0, 0, 0, &g_sRIT128x96x4Display, 0, 61, 128, 1,
    CANVAS_STYLE_TEXT | CANVAS_STYLE_TEXT_LEFT, 0, 0, ClrWhite, &g_sFontFixed6x8, "Power [dBm]:",
    0, 0),
CanvasStruct(0, 0, 0, &g_sRIT128x96x4Display, 80, 64, 36, 8,
CANVAS_STYLE_TEXT | CANVAS_STYLE_TEXT_RIGHT, 0, 0, ClrWhite, &g_sFontFixed6x8, g_powerdBm,
    0, 0),

// Druga vrstica vsebuje trenutno meritev moči v [uW]

CanvasStruct(0, 0, 0, &g_sRIT128x96x4Display, 0, 72, 70, 8,
                  CANVAS_STYLE_TEXT | CANVAS_STYLE_TEXT_LEFT, 0, 0, ClrWhite, &g_sFontFixed6x8, "Power [uW] :",
    0, 0),
CanvasStruct(0, 0, 0, &g_sRIT128x96x4Display, 80, 72, 36, 8,
CANVAS_STYLE_TEXT | CANVAS_STYLE_TEXT_RIGHT, 0, 0, ClrWhite, &g_sFontFixed6x8,
    g_poweruW, 0, 0),
// Tretja vrstica vsebuje vrednot reference v [dBm]
   CanvasStruct(0, 0, 0, 0, &g_sRIT128x96x4Display, 0, 80, 70, 8,
CANVAS_STYLE_TEXT | CANVAS_STYLE_TEXT_LEFT, 0, 0, ClrWhite, &g_sFontFixed6x8, "Ref. [dBm]:",
0, 0),
    CanvasStruct(0, 0, 0, &g_sRIT128x96x4Display, 80, 80, 36, 8,
CANVAS_STYLE_TEXT | CANVAS_STYLE_TEXT_RIGHT, 0, 0, ClrWhite, &g_sFontFixed6x8,
g_Reference, 0, 0),
// Četrta vrsebuje vrednot izgub proti v [dB]
CanvasStruct(0, 0, 0, &g_sRIT128x96x4Display, 0, 88, 70, 8,
CANVAS_STYLE_TEXT | CANVAS_STYLE_TEXT_LEFT, 0, 0, ClrWhite, &g_sFontFixed6x8, "Loss [dB] :",
0, 0)
                  0, 0),
          CanvasStruct(0, 0, 0, &g_sRIT128x96x4Display, 80, 88, 36, 8,
CANVAS_STYLE_TEXT | CANVAS_STYLE_TEXT_RIGHT, 0, 0, ClrWhite, &g_sFontFixed6x8,
                 g_loss, 0, 0)
};
// Inicializacija prikaza
//===
 ,
void
StatusEnable(unsigned long ulVOutIdeal)
    unsigned long ulIdx;
    // Add the status display widgets to the widget list.
    for(ulidx = 0; ulidx < NUM WIDGETS; ulidx++)</pre>
        WidgetAdd(WIDGET_ROOT, (tWidget *)(g_psStatusWidgets + ulIdx));
    }
}
// Izracun absolutne vrednosti
long abs(long x)
          if (x < 0)
                    return x*(-1);
          else
                    return x;
}
// Potencna funkcija
```

```
//------
double fastPow(double a, double b) {
  union uu {
double d;
    int x[2];
 } u;
u.d = a;
 u.x[1] = (int)(b * (u.x[1] - 1072632447) + 1072632447);
u.x[0] = 0;
  return u.d;
}
//------
// Preberemo meritve in posobimo prikaz
.......
                                      _____
void StatusUpdate()
          // FreDeremo povprecho meritev v dBm
float ydbm = ydBm(g_waveLengthId, I2C_readAVG());
// Pomnozimo z 100, ker usnprintf ne podpira prikaza floating stevil
long ydbml = 100 * ydbm;
long ydbuw = 0;
long ydbuw = 0;
           // Preberemo povprecno meritev v dBm
          long reference, loss;
          // Prikazujemo samo, ce je vrednost smiselna (definirano z MIN_DEM, ki je definiran v measure.h)
// Drugace prikazemo UNDER
if (ydbm > MIN_DBM) {

                     // Prikaz v dbm
// g_powerdBm je gradnik, ki ga prikazujemo
usnprintf(g_powerdBm, sizeof(g_powerdBm), "%d.%02d", ydbml /100, abs(ydbml) % 100);
ydbuw = fastPow(10, ydbm/10) * 1000;
// Prikaz v uW
                      usnprintf(g_poweruW, sizeof(g_poweruW), "%d", ydbuw);
           else {
                      usnprintf(g_powerdBm, sizeof(g_powerdBm), "UNDER");
usnprintf(g_poweruW, sizeof(g_poweruW), " ");
          }
           // Prikaz reference
           // Ce je referenca set, potem prikazemo njeno vrednost (g_referenceValue) v gradniku g_Reference,
           // sicer pustimo prazno
          if (g referenceId == 0)
                     usnprintf(g_Reference, sizeof(g_Reference), "
usnprintf(g_loss, sizeof(g_loss), " ");
                                                                              ");
          }
else {
                      usnprintf(g_Reference, sizeof(g_Reference), "%d.%02d", reference /100, abs(reference) % 100);
loss = (g_referenceValue - ydbm) * 100;
if (ydbm > MIN_DBM) {
                                            usnprintf(g_loss, sizeof(g_loss), "%d.%02d", loss /100, abs(loss) % 100);
                                 else {
                                            usnprintf(g_loss, sizeof(g_loss), "
                                                                                         ");
                                 }
                      }
else {
                                usnprintf(g_Reference, sizeof(g_Reference), "UNDER");
usnprintf(g_loss, sizeof(g_loss), " ");
                     }
          }
}
                                       Izsek kode 3: Izdelava in posodobitev statusnega okna
```

5.3 Vzorčenje in shranjevanje podatkov

Najpomembnejši del kode se nahaja v datoteki measure.c. V tem delu realiziramo funkcije, ki jih kličejo sklopi glavnega programa. Na začetku podamo koeficiente kalibracijskih premic, ki jih dobimo iz analize merjenja (poglavje 6). Funkcija, ki s pomočjo omenjenih koeficientov in že povprečene vrednosti meritve AD pretvornika izračuna trenutno merjeno moč, je funkcija ydBm(). Inicializacijo I²C modula na mikrokrmilniku izvedemo s funkcijo initMeasure().

Povprečno vrednost rezultata meritve izračunamo iz števila dobljenih vzorcev. Za izračun povprečja skrbi funkcija I2C_readAVG(), ki nima definiranega vhodnega parametra, saj je število vzorcev, katerih povprečno vrednost iščemo, definirano v datoteki measure.h. Inicializacijo AD pretvornika na ponovljivi način delovanja izvedemo s funkcijo I2C_burstsend().

Po inicializaciji AD pretvornik vsake 1,16 ms zajame nov vzorec in ga shrani v register pretvorbe (ang. coversion register), kjer čaka na prevzem. V kolikor podatka ne prevzamemo pravočasno se le-ta prepiše z novim takoj, ko je ta na voljo. Če želimo brati iz AD pretvornika, moramo v kodi nastaviti naslov registra pretvorbe [25]. To storimo s funkcijo ReadStart(). Od te točke dalje lahko brez novih nastavitev zajemamo vzorce, kar storimo s funkcijo I2C_read2bytes(). Za izbiro števila vzorcev in minimalno vrednost, do katere je naša meritev še natančna, poskrbimo z definicijama v datoteki measure.h. Vse zgoraj opisane funkcije in definicije smo zapisali v izseku kode 4.

measure.c:
Funkcije za inicializacijo in branje iz ADC pretvornika
//=
<pre>float k[] = {25.063,25.049,25.065,25.059}; float n[] = {-56.193,-56.382,-56.724,-56.845};</pre>
// Pretvorba meritve ADC v napetost in nato v vrednost moči v dBm // value: vrednost prebrana iz ADC
//====================================
<pre>{ //ADC vrednost pretvorimo v vrednost napetosti preko M0=4096mV in FS=32767 float valuemV = ((value * 4096.0)/32767.0)/1000.0; //Izračunamo vrednost moči v enoti dEm po linearni enačbi y=kx+n return (k[waveLengthId] * valuemV + n[waveLengthId]); }</pre>
//
//====================================
<pre>{ SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_GPIOA); SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_I2Cl); GPIOPinTypeI2C(GPIO_PORTA_BASE, GPIO_PIN_6 GPIO_PIN_7); //Pa7,Pa6 I2CMasterInitExpClk(I2Cl_MASTER_BASE, SysCtlClockGet(), false); }</pre>
//
//====================================
<pre>int i; unsigned long allRead = 0; //unsigned long> da slučajno ne prekoračimo območja</pre>
<pre>//Računanje povrečne vrednosti iz prebranih vzorcev; //NUM_AVG definira število želenih vzorcev> definicija v mesure.h for (i = 0; i < NUM_AVG; i++) allRead += I2C_read2bytes();</pre>
<pre>//funkcija vrača povprečno vrednost meritve return (allRead / NUM_AVG); }</pre>
//

```
// Inicializacija ADC na ponovljivi nacin delovanja
void I2C_burstsend(void)
                                                                   //nastavimo I2C naslov AD pretvornika,kot podaja katalog
//false --> definiramo, da se mikrokrmilnik obnaša kot
     I2CMasterSlaveAddrSet(I2C1_MASTER_BASE, 0x48, false);
                                                                   //gospodar
     I2CMasterDataPut(I2C1_MASTER_BASE, 0x01);
                                                                             //Pošljemo naslov registra, kamor želimo pisati
                                                                             //Za nastavitev delovanja je to config register
//Za nastavitev delovanja je to config register
//Povemo, da bomo pošiljali več zlogov
//Počakamo, da se vodilo izprazni
     I2CMasterControl(I2C1_MASTER_BASE, I2C_MASTER_CMD_BURST_SEND_START);
     while(I2CMasterBusy(I2C1_MASTER_BASE));
          I2CMasterDataPut(I2C1 MASTER BASE, 0xC2);
                                                                             //Pošljemo zgornjih 8 bitov config registra
                                                                             //Definicijo vrednosti dobimo v katalogu
    I2CMasterControl(I2C1 MASTER BASE, I2C MASTER CMD BURST SEND CONT);
     while(I2CMasterBusy(I2C1_MASTER_BASE));
                                                                             //Počakamo, da se vodilo izprazni
          I2CMasterDataPut(I2C1_MASTER_BASE, 0xE3);
                                                                            //Pošljemo spodnjih 8 bitov config registra
    IIICMasterControl(IIC1_MASTER_BASE, I2C_MASTER_CMD_BURST_SEND_FINISH);
while(I2CMasterBusy(IIC1_MASTER_BASE));
}
// Definiramo register iz katerega beremo pretvorbo
void ReadStart(void){
     I2CMasterSlaveAddrSet(I2C1_MASTER_BASE, 0x48, false);
    while(I2CMasterBusy(I2C1_MASTER_BASE)){}
 }
//-
                       // Branje vzorcev iz ADC
unsigned long I2C_read2bytes(void)
{
    unsigned long ulreceiveI2C=0;
    I2CMasterSlaveAddrSet(I2C1_MASTER_BASE, 0x48, true);
     I2CMasterControl(I2C1_MASTER_BASE, 12C_MASTER_CMD_BURST_RECEIVE_START);
while(I2CMasterBusy(I2C1_MASTER_BASE)){}
    // prevzamemo zgornjih 8 bitov rezultata
ulreceiveI2C = I2CMasterDataGet(I2C1_MASTER_BASE);
ulreceiveI2C <<= 8;</pre>
     I2CMasterControl(I2C1_MASTER_BASE, I2C_MASTER_CMD_BURST_RECEIVE_FINISH);
     while(I2CMasterBusy(I2C1_MASTER_BASE)){}
           // prevzamemo spodnjih 8 bitov rezultata
     ulreceiveI2C |= I2CMasterDataGet(I2C1_MASTER_BASE);
     // Vrnemo rezultat vzorca
    return ulreceiveI2C;
}
measure.h:
// Minimalna sprejemljiva prikazana vrednost v dBm
#define MIN_DBM -37
// Stevilo zelenih vzorcev
#define NUM_AVG 150
```

Izsek kode 4: Inicialiacija AD pretvornika, zajem vzorcev in izračun meritev

6 Kalibracija, testiranje, verifikacija

V tem poglavju predstavimo dva načina kalibracije instrumenta. Na podlagi analize izberemo primernejšega in ga uporabimo. Sledi testiranje instrumenta, s katerim določimo napako meritev. Z verifikacijo potrdimo doseg zastavljenih ciljev.

6.1 Načini kalibracije

V sekciji 3.3. smo predstavili spektralni odziv fotodiode ter z njim povezan faktor odzivnosti *R*. Videli smo, da je ta odvisen od valovne dolžine in je pri vsaki valovni dolžini, vsaj na sliki, konstanten (slika 18). Za naš senzor, ki smo ga opisali v sekciji 4.1, smo ugotovili, da spektralnega odziva v proizvajalčevem katalogu ni. Na voljo imamo le razpon faktorja odzivnosti, ki se giblje med 40 mA/W in 70 mA/W, za območje valovnih dolžin med 1271 nm in 1611 nm.

Glede na podane podatke in enačbe tokovno napetostnega pretvornika (sekcija 4.2) obstajata dva možna načina kalibracije našega instrumenta. Pri prvem s pomočjo meritev določimo spektralni odziv fotodiode, s katerim pridobimo vrednost faktorja *R* za vsako valovno dolžino, ki jo želimo meriti. Drugi način je po principu merjenja enak, le da faktorja odzivnosti ne določamo, saj ga zajamemo že znotraj postopka. Pri tem primerjamo izhodno moč iz senzorja ter napetost na izhodu tokovno napetostnega pretvornika. Izkaže se, da je vhodno-izhodna karakteristika do neke spodnje meje praktično linearna.

Oba načina sodita med neposredne principe merjenja, kot smo omenili v sekciji 3.2 in temeljita na definiciji podatka o odzivnosti *R*, definirane kot razmerje vrednosti moči na glavnem, 95 odstotnem izhodu, proti izhodnemu toku fotodiode, kot smo zapisali v 4.1. To definicijo izkoristimo tudi pri naši kalibraciji. Naša natančnost je v veliki meri odvisna od preciznosti merilne opreme, s katero postopek opravimo. Za oba postopka potrebujemo precizni nastavljivi laserski vir, priključen na vhod in referenčni merilnik optične moči, priključen na izhod našega senzorja. Pri tem ne smemo zanemariti pogojev, pod katerimi opravljamo kalibracijo (temperatura, vlaga,...).

67

6.1.1 Kalibracija z določanjem faktorja R

Na laserskem izvoru svetlobe nastavimo neko izhodno moč (običajno 0 dBm) ter valovno dolžino, ki jo želimo meriti. S pomočjo odčitka referenčnega merilnika moči, v skladu z definicijo odzivnosti našega senzorja ter vrednostjo izhodne napetosti, ki nam jo poda naš tokovno napetostni pretvornik, izračunamo faktor odzivnosti *R*. Pri tem za izračun toka fotodiode *I*_{PD} iz merjene napetosti uporabimo enačbo 17, medtem ko za izračun *R*, uporabimo enačbo 13. Ko smo *R* za določeno valovno dolžino izračunali, lahko s ponovno uporabo enačb 17 ter 13, iz merjene napetosti, izračunamo izhodno moč. Omenjeni princip je korekten, a ima dve glavni pomanjkljivosti.

Za izračun toka fotodiode iz enačbe 17, potrebujemo natančno potenčno funkcijo, ki jo je zaradi pomanjkanja višjenivojskih matematičnih funkcij v mikrokrmilniku potrebno dodatno realizirati. Druga pomanjkljivost izhaja iz nekonsistentnosti vrednosti faktorja odzivnosti, saj smo v podsekciji 3.3.2 omenili, da se ta rahlo spreminja tudi v odvisnosti od zaporne napetosti. V sekciji 4.2 smo omenili, da fotodiodo notranje krmilimo s prilagodljivo zaporno napetostjo in ne s konstantno, pri kateri v praksi [23] določamo faktor odzivnosti. Da sprememba faktorja odzivnosti v odvisnosti od napajalne napetosti le ni tako majhna, prikažemo v tabelah 2-5.

6.1.2 Kalibracija s pomočjo linearizacije vhodno izhodne karakteristike

Drugi način kalibracije odpravi obe zgoraj omenjeni pomanjkljivosti in izhaja iz preprostega dejstva enačbe 17, kjer vidimo, da je izhodna napetost linearno proporcionalna logaritemskemu razmerju toka fotodiode IPD in toka presečišča Iz. Slednjo s pomočjo enačbe 13 preoblikujemo v enačbo 22 tako, da namesto I_{PD} vstavimo izraz $I_{PD} = R * P_{opt}$ ter namesto I_Z , izraz $I_Z = R * P_Z$ [23].

$$U_{\rm izh} = V_{\rm Y} \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{\rm PD}}{P_{\rm Z}}\right) \tag{22}$$

Iz enačbe vidimo, da se faktor odzivnosti krajša in je tako že vštet v vrednosti izhodne napetosti. Pri tem sta P_{PD} in P_z podana v enoti W,mW,µW. Ker imamo na referenčnem merilniku navadno podan rezultat v dBm, izkoristimo lastnost enačbe 22, da je v primeru moči izražene v enoti dBm logaritemska pretvorba že opravljena, zato se enačba 22 poenostavi v enostavno razliko veličin [23]. V izogib zmedi moč v dBm zapišemo z novo spremenljivko *D* in dobimo enačbo 23.

$$U_{\rm izh} = V_{\rm Y}' * (D_{\rm PD} - D_{\rm Z}) \left[\frac{\rm v}{\rm dB}\right]$$
(23)

Pri tem je $V'_{\rm Y} = \frac{V_{\rm Y}}{10}$ [23]. Za naš primer, ob upoštevanju faktorja ojačenja G = 2, znaša ta koeficient 0,04 V/dB pri vrednosti $V_{\rm Y}$ = 0,4 V/dek. Iz enačbe je zdaj očitno, da je povezava pri vrednosti merjene moči v dBm dejansko linearna, zato upravičeno pričakujemo linearno razmerje med vrednostjo izhodne moči ter vrednostjo napetosti na izhodu tokovno napetostnega pretvornika, seveda do neke spodnje meje, kjer vrednost šuma še ne pokvari meritev.

Iz tega vidika je izračun moči na merilniku precej poenostavljen, saj povezavo med izhodno napetostjo tokovno napetostnega pretvornika in vrednostjo pripadajoče moči določa premica po enačbi y = kx + n, ki jo z omenjenima parametroma zapišemo kot enačbo 24.

$$P [dBm] = k \cdot U_{izh} [V] + n$$
(24)

Postopek določitve koeficientov premice izhaja iz množice opravljenih meritev, kjer za vsako valovno dolžino, ki jo želimo kalibrirati, v maksimalnem možnem razponu nastavljamo vrednosti moči laserskega izvora in ob tem zapisujemo vrednosti parametrov izhodne moči merilnika ter izhodne napetosti. Preko metode najmanjših kvadratov, ki je v danem primeru najbolj optimalen postopek, nato v izbranem območju linearnosti dobljenih krivulj določimo koeficiente naših premic. Rezultati testiranj so podani v sekciji 6.2.

6.2 Testiranje

Postopek in ovrednotenje izbrane kalibracije smo podrobno opisali v podsekciji 6.1.2. Na tem mestu prikažemo rezultate vseh merjenj, ki poleg kalibracije zajemajo še testiranje odvisnosti sistema glede na temperaturne spremembe ter primerjavo rezultatov kalibriranega merilnika z referenčnim merilnikom. Kot zaključni test opravimo še primerjavo merjenih rezultatov na realnem sistemu. Ob tem še enkrat pripomnimo, da smo kalibracijo izvedli na štirih valovnih dolžinah spektra CWDM, od katerih tri ustrezajo valovnim dolžinam laserjev našega realnega sistema.

6.2.1 Popis instrumentov

Oprema, ki smo jo pri merjenju in kalibraciji uporabili, je last laboratorija za telekomunikacije na Fakulteti za elektrotehniko in zajema:

- nastavljivi laserski izvor HP6168F TUNABLE LASER SOURCE
 - o razpon nastavljivosti od 1450 nm do 1592 nm
 - o nastavljivost moči med 5,0 dBm in -60,0 dBm
 - o datum zadnje kalibracije 29.10.2002
- referenčni merilnik optične moči HP 8153A LIGHTWAVE MULTIMETER
 - o razpon merjenja od 800 nm do 1700 nm
 - o ločljivost 0,001 dB
 - o točnost meritve 0,01 dB
 - o minimalna občutljivost –75,000 dBm
- multimeter FLUKE 117
 - o ločljivost 0,001 V
 - o točnost meritve 0,5% + 2 → ±([% odčitka]+[števka])

Realni sistem, na katerem smo merilnik preizkusili, je last podjetja Initra d.o.o.. Sestavljata ga:

- 4 kanalni CWDM video distributer
 - o uporabljane valovne dolžine 1491 nm, 1531 nm, 1571 nm, 1611 nm
 - o izhodna moč med -2 dBm in -5 dBm
 - o intenzitetno modulirani izhodi konstantnega toka podatkov
- 8 kanalni razdruževalnik XSCO8L-0-SB-47 [16]
 - o podpora valovnim dolžinam med 1471 nm in 1611 nm po koraku 20 nm

6.2.2 Rezultati kalibracijskih meritev

Spodnje štiri tabele prikazujejo rezultate meritev štirih valovnih dolžin, 1491 nm, 1531 nm, 1571 nm ter 1591 nm. V njih smo poleg merjenih podatkov dodali še vrednosti faktorja odzivnosti *R* ter toka fotodiode IPD, ki smo jih izračunali s pomočjo enačb 23, 4, 13 in 17 v tem zaporedju. Za kalibracijo omenjenih valovnih dolžin smo se odločili, ker naš realni sistem poseduje prve tri od omenjenih. Za zadnjo, 1611 nm, nismo imeli referenčnega vira, kot vidimo iz podatkov v podsekciji 6.2.1. Opomnimo še to, da je z omenjenim pristopom in rahlo modifikacijo programske kode, kot smo videli v poglavju 5, nabor kalibriranih valovnih dolžin mogoče razširiti na celotno področje CWDM in v primeru referenčne opreme tudi na DWDM spekter. Temperatura, pri kateri smo meritve opravljali, je bila 21 ⁰C.

$\lambda = 1491 \text{ nm}$										
D _{LD} [dBm]	D _{PD} [dBm]	U _{izh} [V]	D _z [dBm]	<i>P</i> _z [mW]	<i>R</i> [mA/W]	<i>Ι</i> _{PD} [μΑ]	I _{PD} [nA]			
5,00	1,76	2,313	-56,07	0,00	40,41	60,60	60603,82			
0,00	-3,20	2,114	-56,05	0,00	40,27	19,28	19275,25			
-5,00	-8,13	1,917	-56,06	0,00	40,32	6,20	6201,55			
-10,00	-13,06	1,721	-56,09	0,00	40,60	2,01	2006,78			
-15,00	-18,07	1,521	-56,10	0,00	40,69	0,63	634,60			
-20,00	-23,08	1,322	-56,13	0,00	41,02	0,20	201,84			
-25,00	-28,07	1,122	-56,12	0,00	40,93	0,06	63,83			
-30,00	-33,06	0,923	-56,14	0,00	41,07	0,02	20,30			
-35,00	-38,07	0,723	-56,15	0,00	41,16	0,01	6,42			
-37,00	-40,05	0,639	-56,03	0,00	40,04	0,00	3,96			
-39,00	-42,04	0,539	-55,52	0,00	35,60	0,00	2,23			
-41,00	-44,07	0,403	-54,15	0,00	25,97	0,00	1,02			
-43,00	-46,02	0,309	-53,75	0,00	23,69	0,00	0,59			
-45,00	-48,12	0,249	-54,35	0,00	27,20	0,00	0,42			
-50,00	-52,96	0,176	-57,36	0,00	54,45	0,00	0,28			
-55,00	-57,93	0,148	-61,63	0,00	145,55	0,00	0,23			
-60,00	-61,97	0,141	-65,50	0,00	354,41	0,00	0,23			
ni osvetlitve	-74,80	0,137	-78,23	0,00	6645,08	0,00	0,22			

Tabela 2: Kalibracijske meritve pri valovni dolžini 1491 nm

	$\lambda = 1531 \text{ nm}$										
D _{LD} [dBm]	D _{PD} [dBm]	U _{izh} [V]	D _z [dBm]	<i>P</i> _z [mW]	<i>R</i> [mA/W]	<i>Ι</i> _{PD} [μΑ]	I _{PD} [nA]				
5,00	1,97	2,329	-56,26	0,00	42,22	66,45	66450,77				
0,00	-3,02	2,130	-56,27	0,00	42,36	21,13	21134,89				
-5,00	-7,95	1,934	-56,30	0,00	42,66	6,84	6839,12				
-10,00	-12,87	1,737	-56,30	0,00	42,61	2,20	2200,39				
-15,00	-17,89	1,537	-56,32	0,00	42,81	0,70	695,82				
-20,00	-22,89	1,338	-56,34	0,00	43,05	0,22	221,31				
-25,00	-27,87	1,138	-56,32	0,00	42,85	0,07	69,98				
-30,00	-32,85	0,941	-56,38	0,00	43,40	0,02	22,52				
-35,00	-37,85	0,738	-56,30	0,00	42,66	0,01	7,00				
-37,00	-39,82	0,655	-56,20	0,00	41,64	0,00	4,34				
-39,00	-41,86	0,563	-55,94	0,00	39,22	0,00	2,56				
-41,00	-43,84	0,427	-54,52	0,00	28,28	0,00	1,17				
-43,00	-45,84	0,323	-53,92	0,00	24,63	0,00	0,64				
-45,00	-47,94	0,259	-54,42	0,00	27,64	0,00	0,44				
-50,00	-52,80	0,181	-57,33	0,00	54,01	0,00	0,28				
-55,00	-57,84	0,152	-61,64	0,00	145,88	0,00	0,24				
-60,00	-62,03	0,143	-65,61	0,00	363,50	0,00	0,23				
ni osvetlitve	-75,00	0,138	-78,45	0,00	6998,42	0,00	0,22				

Tabela 3: Kalibracijske meritve pri valovni dolžini 1531 nm

<i>λ</i> = 1571 nm											
D _{LD} [dBm]	D _{PD} [dBm]	U _{izh} [V]	D _z [dBm]	<i>P</i> _z [mW]	R[mA/W]	<i>Ι</i> _{PD} [μΑ]	<i>I</i> _{PD} [nA]				
5,00	2,02	2,344	-56,58	0,00	45,50	72,44	72443,60				
0,00	-3,06	2,140	-56,56	0,00	45,29	22,39	22387,21				
-5,00	-7,90	1,948	-56,60	0,00	45,71	7,41	7413,10				
-10,00	-12,83	1,752	-56,63	0,00	46,03	2,40	2398,83				
-15,00	-17,85	1,551	-56,63	0,00	45,97	0,75	754,22				
-20,00	-22,88	1,351	-56,66	0,00	46,29	0,24	238,51				
-25,00	-27,80	1,153	-56,63	0,00	45,97	0,08	76,30				
-30,00	-32,79	0,955	-56,67	0,00	46,40	0,02	24,41				
-35,00	-37,80	0,755	-56,68	0,00	46,51	0,01	7,72				
-37,00	-39,79	0,672	-56,59	0,00	45,60	0,00	4,79				
-39,00	-41,80	0,581	-56,33	0,00	42,90	0,00	2,83				
-41,00	-43,82	0,454	-55,17	0,00	32,89	0,00	1,36				
-43,00	-45,80	0,338	-54,25	0,00	26,61	0,00	0,70				
-45,00	-47,88	0,267	-54,56	0,00	28,54	0,00	0,47				
-50,00	-52,75	0,183	-57,33	0,00	54,01	0,00	0,29				
-55,00	-57,83	0,150	-61,58	0,00	143,88	0,00	0,24				
-60,00	-62,14	0,142	-65,69	0,00	370,68	0,00	0,23				
ni osvetlitve	-75,00	0,137	-78,43	0,00	6958,25	0,00	0,22				

Tabela 4: Kalibracijske meritve pri valovni dolžini 1571 nm

	<i>λ</i> = 1591 nm										
D _{LD} [dBm]	D _{PD} [dBm]	U _{izh} [V]	D _z [dBm]	<i>P</i> _z [mW]	R[mA/W]	<i>Ι</i> _{PD} [μΑ]	I _{PD} [nA]				
5,00	-1,54	2,207	-56,72	0,00	46,94	32,92	32923,05				
0,00	-2,85	2,154	-56,70	0,00	46,77	24,27	24266,10				
-5,00	-7,85	1,955	-56,73	0,00	47,04	7,72	7717,92				
-10,00	-12,78	1,759	-56,76	0,00	47,37	2,50	2497,47				
-15,00	-17,70	1,563	-56,78	0,00	47,59	0,81	808,16				
-20,00	-22,70	1,363	-56,78	0,00	47,59	0,26	255,56				
-25,00	-27,66	1,164	-56,76	0,00	47,42	0,08	81,28				
-30,00	-32,66	0,965	-56,79	0,00	47,70	0,03	25,85				
-35,00	-37,62	0,767	-56,80	0,00	47,81	0,01	8,27				
-37,00	-39,65	0,684	-56,75	0,00	47,32	0,01	5,13				
-39,00	-41,61	0,596	-56,51	0,00	44,77	0,00	3,09				
-41,00	-43,67	0,473	-55,50	0,00	35,44	0,00	1,52				
-43,00	-45,65	0,352	-54,45	0,00	27,86	0,00	0,76				
-45,00	-47,75	0,274	-54,60	0,00	28,84	0,00	0,48				
-50,00	-52,62	0,186	-57,27	0,00	53,33	0,00	0,29				
-55,00	-57,74	0,151	-61,52	0,00	141,74	0,00	0,24				
-60,00	-62,12	0,141	-65,65	0,00	366,86	0,00	0,23				
ni osvetlitve	-75,00	0,136	-78,40	0,00	6918,31	0,00	0,22				

Tabela 5: Kalibracijske meritve pri valovni dolžini 1591 nm

Edina neznana spremenljivka v vseh tabelah je spremenljivka D_{LD} , ki predstavlja moč referenčnega laserskega vira. Opomnimo še, da je moč P_Z dejansko reda nW, zato so v stolpcih same ničle. Iz podanih tabel ugotovimo, da je več kot očitno, kako faktor odzivnost *R* ni eksaktno fiksna vrednost in se od meritve do meritve rahlo razlikuje. Posebej zanimivo jo območje okoli meje temnega toka, ki je pri našem senzorju podan le pri 5 V zaporne napetosti, pri kateri znaša 5 nA [20]. Dejanska vrednost zaporne napetosti na naši fotodiodi je zaradi specifičnosti tokovno-napetostnega pretvornika precej nižja in hkrati še prilagodljiva v odvisnosti od toka fotodiode (prilagodljivi bias – sekcija 4.2).

Brez ustreznih podatkov o odvisnosti temnega toka od zaporne napetosti na diodi težko določimo dejansko spodnjo mejo, do katere bodo naše meritve še relevantne. V osnovi se odločimo za neko območje malo nad podatkom o temnem toku in malo pod njim, kjer je vrednosti faktorja odzivnosti *R* še stabilna. Omenjeno območje smo v tabelah označili z zeleno, rumeno in rdečo barvo. Za najugodnejše privzamemo vrednosti v zeleni barvi, saj smo v tem primeru zagotovo nad vrednostjo temnega toka (tabela 2-5). Najnižja vrednost toka fotodiode, ki jo dobimo v zelenem območju, se nahaja v tabeli 2 in znaša 6,42 nA.

Izmerjeni vrednosti merjene moči in pripadajoče izhodne napetosti izrišemo na graf, ki ga prikazuje slika 35.



Slika 35: Odvisnost merjene moči od izhodne napetosti za merjene valovne dolžine

Iz grafa vidimo, da je za merjeno območje med 0 dBm in –40 dBm vhodno izhodna karakteristika resnično linearna, zato je zastavljeni koncept za določitev koeficientov linearnih premic, ki povezujejo merjeno moč z merjeno napetostjo, pravilen. Točka ukrivljanja karakteristike sovpada z mejo, ki smo jo določili na podlagi tabel, zato določanje koeficientov opravimo znotraj območja do spodnje meje pri –38 dBm.

Pripadajoči graf in koeficiente premic, dobljene po metodi najmanjših kvadratov podaja slika 36. Dobljene koeficiente uporabimo v algoritmu našega programa, ki smo ga opisali v sekciji 5.3.



Slika 36: določitev koeficientov premic za vsako valovno dolžino v omejenem območju linearnosti

6.2.3 Rezultati temperaturnih testiranj

V sekciji 4.2 smo omenili, da tokovno napetostni pretvornik že vsebuje modul za izravnavo temperature, ki je potreben zaradi temperaturne stabilnosti vezja. Poleg tega smo v podsekciji 3.3.4 podali, da se s povečevanjem temperature zvišuje tudi tok nasičenja fotodiode, ki je kot že rečeno neželen, saj zmanjšuje spodnjo mejo občutljivosti fotodiode in hkrati povišuje skupni tok fotodiode, zaradi česar je izhodna napetost višja. Omenjeni vpliv preverimo v tej sekciji.

Za analizo smo uporabili že omenjen kalibracijski postopek, le da smo zaradi precej večjega obsega dela, kot ključni vrednosti vzeli le začetno in končno točko merilnega območja s spodnjo mejo pri –40 dBm. Na vezje smo pritrdili merilnik temperature in vezje s sušilnikom za lase segreli na dobrih 95 °C. Nato smo sušilnik izključili in počakali, da je temperatura padla na 70 °C, kjer smo zapisali prvi odčitek in z upadanjem temperature vse nadaljnje odčitke izhodne napetosti vezja vse do sobne temperature pri 21 °C. Postopek smo ponovili še z ohlajanjem vezja, kjer smo celotno vezje s hladilnim sprejem ohladili na dobrih –20 °C. Ob dosegu temperature 0 °C smo zapisali prvi odčitek in nadaljevali s postopkom, dokler nismo dosegli sobne temperature. Razliko 20 °C pri zgornji in spodnji temperaturni meji smo dopustili za doseganje notranje stabilizacije vezja, saj je iz velikih temperaturni komore, ki je še vedno lahko predmet nadaljnji raziskavah. Rezultate meritev prikazuje slika 37.



Slika 37: Rezultati temperaturnih merjenj v območju med 0 ^oC in 70 ^oC

Iz slike vidimo, da do meje –20 dBm odstopanj med karakteristikami praktično ni. Bistvena odstopanja se pojavijo pod to mejo in so pri končni meji –40 dBm že izrazita. Koliko to vpliva na končni rezultat, pokažemo v tabeli 6.

		70 ⁰ C		60 ⁰ C		50	0°C	40 ⁰ C	
1491	21 ⁰ C	y = 27,615x - 61,593	D _{PDizm} - D _{PDizr}	y = 26,611x - 59,534	D _{PDizm} - D _{PDizr}	y = 25,947x - 58,129	D _{PDizm} - D _{PDizr}	y = 25,519x - 57,284	D _{PDizm} - D _{PDizr}
<i>U</i> _{izh} [V]	D _{PDizm} [dBm]	D _{PDizr} [dBm]	⊿ [dB]						
2,313	1,76	2,28	0,52	2,02	0,26	1,89	0,13	1,74	0,02
2,114	-3,20	-3,21	0,01	-3,28	0,08	-3,28	0,08	-3,34	0,14
1,917	-8,13	-8,66	0,53	-8,52	0,39	-8,39	0,26	-8,36	0,23
1,721	-13,06	-14,07	1,01	-13,74	0,68	-13,47	0,41	-13,37	0,31
1,521	-18,07	-19,59	1,52	-19,06	0,99	-18,66	0,59	-18,47	0,40
1,322	-23,08	-25,09	2,01	-24,35	1,27	-23,83	0,75	-23,55	0,47
1,122	-28,07	-30,61	2,54	-29,68	1,61	-29,02	0,95	-28,65	0,58
0,923	-33,06	-36,10	3,04	-34,97	1,91	-34,18	1,12	-33,73	0,67
0,723	-38,07	-41,63	3,56	-40,29	2,22	-39,37	1,30	-38,83	0,76
0,639	-40,05	-43,95	3,90	-42,53	2,48	-41,55	1,50	-40,98	0,93
30	⁰ C	25	⁰ C	20 ⁰ C		10 ºC		0	°C
y = 25,299x - 56,799	D _{PDizm} - D _{PDizr}	y = 25,258x - 56,723	D _{PDizm} - D _{PDizr}	y = 25,065x - 56,256	D _{PDizm} - D _{PDizr}	y = 25,145x - 56,422	D _{PDizm} - D _{PDizr}	y = 25,15x - 56,473	D _{PDizm} - D _{PDizr}
D _{PDizr} [dBm]	⊿ [dB]								
1,72	0,04	1,70	0,06	1,72	0,04	1,74	0,02	1,70	0,06
-3,32	0,12	-3,33	0,13	-3,27	0,07	-3,27	0,07	-3,31	0,11
-8,30	0,17	-8,30	0,17	-8,21	0,08	-8,22	0,09	-8,26	0,13
-13,26	0,20	-13,25	0,19	-13,12	0,06	-13,15	0,09	-13,19	0,13
-18,32	0,25	-18,31	0,24	-18,13	0,06	-18,18	0,11	-18,22	0,15
-23,35	0,27	-23,33	0,25	-23,12	0,04	-23,18	0,10	-23,22	0,14
-28,41	0,34	-28,38	0,31	-28,13	0,06	-28,21	0,14	-28,25	0,18
-33,45	0,39	-33,41	0,35	-33,12	0,06	-33,21	0,15	-33,26	0,20
-38,51	0,44	-38,46	0,39	-38,13	0,06	-38,24	0,17	-38,29	0,22

Tabela 6: Temperaturna odvisnost merilnika in napaka meritve

0,19

-40,35

-40,40

0,35

0,30

-40,24

0,53

-40,63

0,58

-40,58

Pri snovanju tabele smo si pomagali z izmerjenimi vrednostmi moči pri temperaturi 21 ^oC in njim pripadajoče vrednosti izhodne napetosti tokovno napetostnega pretvornika (tabela 2). Vrednosti merjene napetosti služijo za teoretični izračun izhodne moči pri posamezni temperaturi s pomočjo kalibracijskih premic pridobljenih iz slike 37. Omenimo, da omenjene enačbe lahko uporabimo tudi kot nadgradnjo merilnika za kalibracijo temperaturnih odstopanj.

Nepoznana veličina v tabelah je Δ , ki predstavlja napako našega merilnika. V tem primeru je definirana kot absolutna vrednost razlike merjene vrednosti referenčnega merilnika (D_{PDizm}) in teoretično izračunane vrednosti našega merilnika pri posamezni temperaturi (D_{PDizr}). Iz tabele vidimo, da smo znotraj meje odstopanja za 1 dB pri končnem rezultatu v območju med 0 in +40 °C, kar se nam zdi ugodno. Mejne vrednosti smo za lažjo predstavo označili z rdečo barvo. Z znižanjem dinamičnega območja merjenja, je brez korigiranja temperature, mogoče doseči obratovanje znotraj napake 1 dB, tudi pri +70 °C, kar je razvidno tudi iz slike 38.



Slika 38: Napaka meritve v odvisnosti od temperature

Pri tem posamezna krivulja predstavlja napako meritve v izbranem temperaturnem območju, pri določeni teoretični merjeni vrednosti v enoti dBm, katere vrednost prikazuje legenda na sliki.

Temperaturno testiranje smo zaradi obilice dela opravili le pri valovni dolžini 1491 nm, in še to le na teoretičnem nivoju. Iz opisanega sklepamo, da se merilnik pri ostalih valovnih dolžinah in tudi v praksi obnaša precej podobno, morebiti z majhnimi odstopanji.

6.2.4 Primerjava merjenj našega in referenčnega instrumenta

Po opravljeni kalibraciji, določitvi koeficientov kalibracijskih premic in namestitvi programske kode na mikrokrmilnik, smo opravili še končni test našega merilnika. Rezultati so prikazani v tabelah 7 in 8.

	14	91		1531			
D _{LD} [dBm]	D _{IPD} [dBm]	D _{ref} [dBm]	⊿ [dB]	D _{LD} [dBm]	D _{IPD} [dBm]	D _{ref} [dBm]	⊿ [dB]
4,00	0,79	0,78	0,01	4,00	0,96	0,95	0,01
0,00	-3,19	-3,21	0,02	0,00	-3,03	-3,03	0,00
-4,00	-7,13	-7,16	0,03	-4,00	-6,97	-6,97	0,00
-8,00	-11,06	-11,08	0,02	-8,00	-10,89	-10,90	0,01
-12,00	-15,06	-15,07	0,01	-12,00	-14,87	-14,88	0,01
-16,00	-19,05	-19,08	0,03	-16,00	-18,97	-18,98	0,01
-20,00	-23,05	-23,07	0,02	-20,00	-22,90	-22,90	0,00
-24,00	-27,14	-27,07	0,07	-24,00	-26,92	-26,86	0,06
-28,00	-31,10	-31,04	0,06	-28,00	-30,90	-30,82	0,08
-32,00	-35,20	-35,05	0,15	-32,00	-35,00	-34,84	0,16
-34,00	-37,50	-37,06	0,44	-34,00	-37,30	-36,81	0,49
-35,00	-39-40	-38,06	1,44	-35,00	-38-39	-37,87	0,63
-36,00	-40-41	-39,04	1,46	-36,00	-40-41	-38,82	1,68
-37,00	-41-43	-40,02	1,98	-37,00	-41-43	-39,86	2,14
-38,00	-43-45	-41,06	2,94	-38,00	-42-44	-40,85	2,15

Tabela 7: Primerjava rezultatov merilnika in referenčnega instrumenta za λ = 1491 nm in λ = 1531 nm

	15	71		1591			
D _{LD} [dBm]	D _{IPD} [dBm]	D _{ref} [dBm]	⊿ [dB]	D _{LD} [dBm]	D _{IPD} [dBm]	D _{ref} [dBm]	⊿ [dB]
4,00	1,03	1,00	0,03	4,00	-1,54	-1,57	0,03
0,00	-3,04	-3,08	0,04	0,00	-2,85	-2,87	0,02
-4,00	-6,94	-6,96	0,02	-4,00	-6,80	-6,82	0,02
-8,00	-10,83	-10,87	0,04	-8,00	-10,79	-10,82	0,03
-12,00	-14,83	-14,78	0,05	-12,00	-14,71	-14,75	0,04
-16,00	-18,85	-18,90	0,05	-16,00	-18,67	-18,72	0,05
-20,00	-22,87	-22,90	0,03	-20,00	-22,67	-22,72	0,05
-24,00	-26,90	-26,88	0,02	-24,00	-26,70	-26,73	0,03
-28,00	-30,85	-30,81	0,04	-28,00	-30,70	-30,67	0,03
-32,00	-34,90	-34,83	0,07	-32,00	-34,70	-34,68	0,02
-34,00	-37,20	-36,83	0,37	-34,00	-36,80	-36,61	0,19
-35,00	-38-39	-37,81	0,69	-35,00	-38,20	-37,60	0,60
-36,00	-40-41	-38,84	1,66	-36,00	-39-40	-38,65	0,85
-37,00	-41-42	-39,80	1,70	-37,00	-41-42	-39,66	1,84
-38,00	-42-44	-40,82	2,18	-38,00	-42-43	-40,66	1,84

Tabela 8: Primerjava rezultatov merilnika in referenčnega instrumenta za λ = 1571 nm in λ = 1591 nm

Pri tem opomnimo, da smo vrednosti laserskega izvora izbrali nekoliko drugače kot pri sami kalibraciji, da zagotovimo ustrezno drugačnost merilnih rezultatov. Končni rezultat predstavlja Δ , ki podaja natančnosti našega merilnika in je v tem primeru definiran kot absolutna vrednost razlike vrednosti našega merilnika (D_{IPD}) in vrednosti referenčnega instrumenta (D_{ref}).

Iz obeh tabel vidimo, da je natančnost našega merilnika do meje okoli –37 dB za merjene vse valovne dolžine nižja od 0,5 dB. S premikom dveh decibelov višje, do meje –35 dB, se natančnost izboljša že na 0,16 dB. Višje kot gremo, natančnejši je naš merilnik. Očitno je, da s primerno izbiro dinamičnega območja delovanja določimo razred kakovosti našega instrumenta.

Od meje –37 dB navzdol so razmere bistveno drugačne. Iz tabel opazimo, da napaka skokovito naraste. Pri tem opomnimo na vrednosti meritev našega merilnika, ki smo jih namerno označili z belo barvo. Vrednosti v teh kvadratkih prikazujejo dejanski razpon in ne končne vrednosti rezultata merilnika, saj je prisotnost šuma že tako očitna, da merjene vrednosti napetosti enostavno ni bilo mogoče bolje stabilizirati.

Pri tem ni pomagalo niti povečevanje števila zajetih vzorcev v AD pretvorniku. Izhodna moč merilnika pod to mejo enostavno niha v teh razponih, zato smo doseg merilnika upravičeno omejili na –37 dB. Algoritem pod to vrednostjo na zaslonu meritev moči prikaže oznako »UNDER«. Omenimo še, da smo za izračun napake instrumenta v tem območju vzeli povprečne vrednosti posameznih razponov.

Grafični prikaz napake meritev iz zgornjih tabel je prikazan na sliki 39, ki potrjuje vse, kar smo zgoraj zapisali.

80



Slika 39: Napaka meritve v izbranem dinamičnem razponu za vse štiri merjene valovne dolžine

6.2.5 Test merilnika na realnem sistemu

Po opravljenem testiranju na statičnem sistemu smo opravili še test na realnem sistemu, ki ga sestavljata 4 kanalni CWDM video distributer in 8 kanalni razdruževalnik, ki smo ju podrobneje predstavili v podsekciji 6.2.1. in ju prikazuje slika 40.



Slika 40: Realni sistem, 4 kanalni video distributer in 8 kanalni razdruževalnik (levo) ter referenčni merilnik (desno)

Razdruževalnik potrebujemo za selekcijo valovne dolžine, ki jo želimo meriti, saj so te na izhodu iz video distributerja že združene v enem vlaknu po principu, ki smo ga opisali v podsekciji 2.2.5. Rezultate testiranj prikazuje tabela 9. Faktor ∆ tudi v tem primeru prikazuje natančnost merilnika.

	1491			1531		1571			
D _{IPD} [dBm]	D _{ref} [dBm]	⊿ [dB]	D _{IPD} [dBm]	D _{ref} [dBm]	⊿ [dB]	D _{IPD} [dBm]	D _{ref} [dBm]	⊿ [dB]	
-4,58	-4,38	0,20	-1,80	-1,74	0,06	-5,43	-5,47	0,04	
-4,43	-4,41	0,02	-1,85	-1,80	0,05	-5,50	-5,43	0,07	

Tabela 9: Test merjenja na realnem sistemu pri valovnih dolžinah 1491 nm, 1531 nm in 1571 nm

Iz tabele vidimo, da so vsi rezultati, razen prvega, pri 1491 nm znotraj meje natančnosti 0,07 dB. Večje odstopanje prve meritve smo podali namensko, saj v tem primeru realni sistem še ni deloval v ustaljenem stanju. Opomnimo, da je za korektno izvajanje meritev priporočeno vsaj 2 urno delovanje sistema, da se ta zaradi močne temperaturne odvisnosti laserskih izvorov resnično popolnoma stabilizira.

6.2.6 Slike iz merjenja

Oprema, ki smo jo uporabili za kalibracijo in merjenje, smo podrobneje opisali v podsekciji 6.2.1. V tem delu jo izpostavimo še v obliki slikovnega gradiva za bralčevo lažjo predstavo. Vsa uporabljena oprema je prikazana na slikah od 41 do 45, medtem ko se pripomočki, s katerimi pred opravljanjem meritev očistimo ferule na konektorjih, nahajajo na sliki 41. Spomnimo, da že minimalna nečistoča na vlakenskem konektorju, močno pokvari meritve, kar smo podrobneje predstavili že v podsekcijah 2.2.3 in 2.2.4.



Slika 41: Pripomočki za čiščenje konektorjev; za SC tip (zgoraj) ter za LC tip (spodaj)



Slika 42: Referenčni laserski izvor HP6168F TUNABLE LASER SOURCE



Slika 43: Mikrokrmilniški kit (levo), merilnik moči (sredina), merilnik napetosti Fluke 117 (desno)



Slika 44: Referenčni merilnik optične moči HP 8153A LIGHTWAVE MULTIMETER



Slika 45: Delovna miza in kompletna oprema

6.3 Verifikacija instrumenta

Zgodbo našega merilnika moči smo na tem mestu pripeljali do točke, kjer preverimo in ovrednotimo zastavljene cilje. V uvodu smo omenili, da želimo izdelati merilnik optične moči spektra CWDM, ki je uporaben tako v klasičnem načinu delovanja kot na realnem sistemu z neposredno vključitvijo v zvezo, kar smo v preteklih sekcijah uspešno pokazali.

Za dinamični razpon instrumenta smo prvotno območje izbrali med –30 dBm in +2 dBm. Iz tabel 2-5 ter 7 in 8 vidimo, da smo rezultat presegli za dobrih 7 dB, vse do meje –37 dBm.

Pri tem smo se nekoliko slabše odrezali pri pogoju temperaturne stabilnosti ±1 dB glede na želeno temperaturno območje delovanja med 0 °C in 50 °C. Iz tabel 2-5 vidimo, da smo znotraj območja te napake le v razponu med 0 °C in 40 °C, kar vseeno ni slab rezultat. Glede na to, da pri tem ne upoštevamo praktično nobene temperaturne kompenzacije, razen tiste, ki je že realizirana v samem tokovno napetostnem pretvorniku, smo kljub tej pomanjkljivosti, dobili želene rezultate.

Iz pogoja o absolutni natančnosti instrumenta ±0,5 dB za prvotno omenjeno dinamično območje med +2 dBm in –30 dBm na podlagi povprečnega rezultata napake za vse 4 valovne dolžine skupaj sklepamo, da smo bili precej uspešni, saj izračun povprečja napake za to območje znese natančnost ±0,03 dB, kar se nam zdi odličen rezultat. Za interval med +2 dB in –35 dB znese ta napaka ±0,04 dB, medtem ko za celotno stabilno območje med +2 dB in – 37 dB naraste na še vedno zavidljivih 0,07 dB. Največji prispevek k tej napaki prispevajo predvsem napake na spodnji meji -37 dB, ki se že nahajajo v območju ±0,5 dB, kolikor smo pravzaprav načrtovali v samem uvodu.

Za določitev ločljivosti instrumenta opravimo kratek izračun. Kot osnovo vzamemo našo kalibracijsko enačbo 24, ki jo zaradi lažjega zapisa preoblikujemo v enačbo 25.

$$P [dBm] = k \cdot U_{izh} [V] + n$$
(24)

$$P = k \cdot U + n \tag{25}$$

Karakterističen podatek za izračun moči je izhodna napetost tokovno napetostnega pretvornika podana v enoti Volt. Omenjeno napetost dobimo kot rezultat pretvorbe analogno digitalnega pretvornika, katerega maksimalna ločljivost ob upoštevanju njegove maksimalne možne napake, je ±3LSB. Izhodna moč, ki jo izračunamo po enačbi 25, je zato negotova za toliko, kot prikazuje enačba 26.

$$P_{\pm 3\text{LSB}} = k \cdot (U \pm 3 \cdot LSB) + n \tag{26}$$

Od enačbe 26 sedaj odštejemo enačbo 25, da dobimo napako merilnega rezultata.

(26)-(25)
$$\Delta P = P_{+3LSB} - P = \pm k \cdot 3 \cdot LSB$$
(27)

Ločljivost enega kvanta (LSB) izračunamo na podlagi izbire MO analogno digitalnega pretvornika in števila logičnih nivojev, ki so nam na voljo. V našem primeru je MO postavljeno na 4,096 V, medtem ko je število logičnih nivojev 32767.

$$LSB = \frac{MO[V]}{32767}$$
 (28)

$$\Delta P [dB] = \pm k \cdot 3 \cdot \frac{MO[V]}{32767}$$
(29)

Ob upoštevanju povprečne vrednosti koeficientov naših kalibracijskih premic in s pomočjo zgoraj omenjenih podatkov izračunamo dejansko ločljivost merilnika. Iz rezultata enačbe 31 vidimo, da smo dosegli zastavljeni cilj ločljivosti instrumenta, ki znaša 0,01 dB.

$$k \approx k_1 \approx k_2 \approx k_3 \approx k_4 \approx 25,059 \tag{30}$$

(30)
$$\rightarrow$$
 (29) $\Delta P = \pm 0,0094 \, \text{dB} \approx \pm 0,01 \, \text{dB}$ (31)

Glede na vse podane rezultate v tej in prejšnjih sekcijah zaključimo, da smo merilnik moči izdelali v skladu s pričakovanji in zastavljenimi cilji. Iz vrednosti podatkov je moč sklepati, da bi večje dinamično območje z izbranimi elementi le težko dosegli, saj je vpliv šuma pri spodnji meji enostavno prevelik. Kot eno možnih rešitev tega problema omenimo izbira fotodiode z nekoliko nižjo pasovno širino in nižjih temnim tokom, kar bi lahko povečalo domet merilnika.

Druga možna izboljšava je implementacija temperaturne kompenzacije s pomočjo ustreznih kompenzacijskih premic, kot smo pokazali v podsekciji 6.2.3. V tem primeru bi na samem vezju potrebovali tudi merilnik temperature, s katerim bi s pomočjo programske opreme glede na merjene vrednosti temperature ustrezno korigirali rezultat. Ob tem ne smemo pozabiti na množico novih meritev, ki jo zahteva tovrstni pristop.

7 Zaključek

Na samem začetku smo govorili o visoki integraciji merilnika preko različnih komunikacijskih poti, s katerimi zagotovimo nadzor nad delovanjem optičnega omrežja lokalno ali na daljavo. Omenili smo serijsko komunikacijo preko USB povezave in povezavo Ethernet. Obe možnosti sta strojno že podprti, zato potrebujemo le izdelavo dodatnih programskih modulov. Obstoječi primeri za tovrstne potrebe se nahajajo v že omenjeni Stellarisovi knjižnici in zahtevajo določeno manipulacijo kode.

V podsekciji 5.2.1. smo predstavili zasnovo glavnega menija in glavnih načinov delovanja, od katerih smo v diplomskem delu realizirali le prvega. Naslednji v vrsti, glede na sliko 33, je način »monitor mode«. Že ime samo pove, da v tem načinu izvajamo nadzor preko omenjenih komunikacijskih poti in sicer tako, da iz izbirnega menija izberemo ustrezno komunikacijsko pot, preko katere mikrokrmilnik periodično pošilja podatke o meritvah. Poleg izbire serijske komunikacije in Ethernet-a imamo na voljo še periodično shranjevanje na medij SD. Način nastavitev meritev je enak kot pri enostavnem merilniku moči. Dodatna opcija je izbira limitne vrednosti, pri kateri mikrokrmilnik pošlje alarmno sekvenco. Za uporabo zgoraj omenjenih funkcionalnosti potrebujemo še nekaj dodatne, računalniško podprte programske opreme. V primeru vzpostavitve spletnega strežnika na mikrokrmilniku to sicer ni potrebno, medtem ko je za povezavo preko serijske komunikacije ta za računalnik nujna.

Naslednji način je »measurement« oz. upravljanje z meritvami. V tem načinu upravljamo z meritvami, ki smo jih predhodno shranili na prenosni nosilec podatkov. Pri tem dodajmo, da se v prvi način doda še funkcija shranjevanja trenutnih meritev na omenjeni medij. Načinu upravljanja z meritvami sledi »Fiber Length«. Tukaj nam mikrokrmilnik iz rezultata izgub (loss) po enačbi 12 izračuna dolžino optičnega vlakna, v kolikor mu podamo ustrezen koeficient α. V petem načinu omogočimo uporabniku možnost kalibracije lastne valovne dolžine v spektru med 1271 nm in 1611 nm. Šesti, sedmi in osmi načini so zelo preprosti in zajemajo nastavitev pozdravnega okna ob vklopu merilnika (Set Welcome Screen), nastavitev datuma in ure (Set Date/Time) in vizitko merilnika (About).

89

Vse zgoraj omenjene funkcionalnosti bodo vgrajene v komercialno različico merilnika, ko bo ta tudi fizično na voljo. Pri tem menimo, da je izdelava omenjenih sklopov lahko predmet nadaljnjega podiplomskega udejstvovanja.
8 Literatura

- Boštjan Batagelj, Optične komunikacije, Ljubljana, 23. maj 2011, <u>http://www2.arnes.si/~bbatag/ook.pdf</u>, dostopnost preverjena novembra 2011
- Boštjan Batagelj, Optična spektralna analiza, Ljubljana, 8. april 2004, <u>http://www2.arnes.si/~bbatag/OSA_2004.pdf</u>, dostopnost preverjena novembra 2011
- Djafar K. Mynbaev, Lowell L. Scheiner, Fiber-Optic Communication Technology, Prentice Hall, New Jersey, 2001
- Peter Reinhardt, Karakterizacija pasivnih optičnih komponent,
 <u>http://sup.xenya.si/sup/info/xenya/predstavitev/pr/Karakterizacija%20pasivnih%20o</u>
 <u>pticnih%20komponenet-d5.doc</u>, dostopnost preverjena januarja 2012
- Stellaris-ov razvojni komplet (ang. evaluation kit), LM3S6965,
 <u>http://www.ti.com/tool/ekk-lm3s6965</u>, dostopnost preverjena januarja 2012
- IDT, opis produkta, <u>http://www.initra.com/?id=6&t=p</u>, dostopnost preverjena marca
 2012
- Spletno mesto podjetja Initra d.o.o., <u>http://www.initra.com</u>, dostopnost preverjena januarja 2012
- Boštjan Batagelj, Zapiski predavanj iz predmeta optične komunikacije, 02.poglavje:
 Optični spekter, <u>http://antena.fe.uni-lj.si/optika_vse/gradivo/02p_ook.pdf</u>,
 dostopnost preverjena januarja 2012
- ITU-T, International Telecommunication Union, Wikipedia,
 <u>http://en.wikipedia.org/wiki/ITU-T</u>, dostopnost preverjena januarja 2012
- CWDM,DWDM tehnologija, poljudnoznanstveni članek , Wikipedia, <u>http://en.wikipedia.org/wiki/Wavelength-division_multiplexing</u>, dostopnost preverjena januarja 2012
- ITU-T, priporočila G.694.2, <u>http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.2-200312-I/en</u>, dostopnost preverjena januarja 2012
- ITU-T, priporočila G.695, <u>http://www.itu.int/rec/T-REC-G.695-201010-I/en</u>, dostopnost preverjena januarja 2012
- 13. Boštjan Murovec, Peter Šuhel, Industrijska elektronika: elementi, Ljubljana, 2005

- 14. Mark Johnson, Photodetection and Measurement: maximizing performance in optical systems, The McGraw-Hill Companies, New York, 2003
- Boštjan Batagelj, Optična komunikacije Svetlobni delilniki, zapiski predavanj VŠŠ,
 Ljubljana, <u>http://antena.fe.uni-lj.si/optika_vse/zapiski_optika.php</u>, dostopnost
 preverjena januarja 2011
- CWDM passive optical components, XSC Single Fiber series, Xenya d.o.o., <u>http://sup.xenya.si/sup/info/XenOpt/XSC Series Datasheet 1b pA4.pdf</u>, dostopnost preverjena januarja 2012
- 17. Robert Lorencon, Elektronski elementi in vezja, Studio Maya, Ljubljana, 1996
- Boštjan Batagelj, Zapiski predavanj iz predmeta optične komunikacije, 15.poglavje: Sprejemniki svetlobe, <u>http://antena.fe.uni-lj.si/optika_vse/gradivo/15p_ook.pdf</u>, dostopnost preverjena januarja 2012
- Boštjan Murovec, Elektronika v avtomatiki, Elektronika z digitalno tehniko:
 Laboratorijske vaje, Ljubljana, 2009, <u>http://lie.fe.uni-lj.si/LabEAR.pdf</u>, dostopnost
 preverjena februarja 2012
- Delilnik z vgrajenim polprepustnim zrcalom in fotodiodo, IPD, Santec, <u>http://www.santec.com/jp/wp-content/uploads/IPD-C-E-v12print.pdf</u>, dostopnost preverjena februarja 2012
- Delilnik z vgrajeno fotodiodo 2, <u>http://www.ozoptics.com/ALLNEW_PDF/DTS0042.pdf</u>, dostopnost preverjena februarja 2012
- 22. Delilnik z vgrajeno fotodiodo 3, <u>http://www.jdsu.com/ProductLiterature/miniipm_ds_cc_ae.pdf</u>, dostopnost preverjena februarja 2012
- Logaritemski tokovno-napetostni pretvornik, AD8304, Analog Devices, <u>http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8304.pdf</u>, dostopnost preverjena februarja 2012
- 24. Logaritemski tokovno-napetostni pretvornik, Analiza, <u>http://www.analog.com/static/imported-</u> <u>files/tech_articles/388413524Log_Processing_Applied_to_Network_Power_Monitori</u> <u>ng.pdf</u>, dostopnost preverjena februarja 2012

- 25. Analogno digitalni pretvornik, ADS115, Texas Instruments, <u>http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf</u>, dostopnost preverjena februarja 2012
- Napetostni stabilizator, LM1117, Texas Instruments, <u>http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm1117-n.pdf</u>, dostopnost preverjena februarja 2012
- Mikrokrmilnik LM3S6965, <u>http://www.ti.com/product/lm3s6965</u>, dostopnost preverjena februarja 2012
- Procesorsko jedro ARM Cortex[™] M3, <u>http://www.arm.com/products/processors/cortex-m/cortex-m3.php</u>, dostopnost preverjena februarja 2012
- Stellaris-ov razvojni komplet, Uporabniška navodila,
 <u>http://www.ti.com/lit/ug/spmu029a/spmu029a.pdf</u>, dostopnost preverjena februarja
 2012
- JTAG komunikacijski vmesnik, <u>http://en.wikipedia.org/wiki/Joint Test Action Group</u>, dostopnost preverjena februarja 2012
- Ulink2, razhroščevalni vmesnik, <u>http://www.keil.com/ulink2/</u>, dostopnost preverjena februarja 2012
- Keil, spletna stran podjetja, <u>http://www.keil.com/</u>, dostopnost preverjena februarja
 2012
- Razvojno okolje µvision4, <u>http://www.keil.com/uvision/uv4.asp</u>, dostopnost
 preverjena februarja 2012
- 34. Extech High Power FiberMeter Optical Power Meter, <u>http://www.extech.com/instruments/resources/manuals/FO600_FO610_UM.pdf</u>
- 35. Stellarisova knjižnica za razvoj aplikacij, <u>http://www.ti.com/tool/sw-lm3s</u>,
- Krtačni motor, osnova predstavitev kompleta, <u>http://www.ti.com/lit/ml/spmu001c/spmu001c.pdf</u>
- Razvojni komplet Stellaris RDK-BDC, krtačni motor, <u>http://www.ti.com/tool/RDK-BDC</u>,
- Stellaris-ov razvojni komplet, LM3S2965, <u>http://www.ti.com/tool/ek-lm3s2965</u>, dostopnost preverjena januarja 2012

- 39. LM3S6965, detajlni opis mikrokrmilnika, <u>http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm3s6965.pdf</u>, dostopnost preverjena januarja 2012
- 40. Potenčna funkcija fastPow(), primer kode,
 <u>http://martin.ankerl.com/2007/10/04/optimized-pow-approximation-for-java-and-c-</u>
 <u>c/</u>, dostopnost preverjena januarja 2012

9 Priloga

Shema tiskanega vezja (PCB), ki je prikazano na sliki 46.



Izjava

Izjavljam, da sem diplomsko delo izdelal samostojno pod vodstvom mentorja doc. dr. Boštjana Murovca in somentorja doc. dr. Boštjana Batagelja. Izkazano pomoč drugih sodelavcev sem v celoti navedel v zahvali.

Dejan Jurač