

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva

Dominik Barbarić

**Distribuirani svjetlovodni senzorski
sustav za mjerenje temperature**

Zagreb, 2017.

Ovaj rad izrađen je u Laboratoriju za primijenjenu optiku Zavoda za radiokomunikacije pod vodstvom prof. dr. sc. Zvonimira Šipuća i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2016./2017.

Popis kratica

| | |
|------|---|
| AC | Izmjenična struja |
| ASE | Pojačana spontana emisija (engl. <i>Amplified spontaneous noise</i>) |
| DAQ | Dohvat ili akvizicija podataka (engl. <i>Data acquisition</i>) |
| DC | Istosmjerna struja |
| DTS | Distribuirani temperaturni senzor |
| EDFA | Erbijem obogaćeno svjetlovodno pojačalo (engl. <i>Erbium doped fibre amplifier</i>) |
| LMS | Najmanji srednji kvadratni (engl. <i>Least mean square</i>) |
| MMF | Višemodni svjetlovod (engl. <i>Multi-mode fibre</i>) |
| OTDR | Optička reflektometrija u vremenskoj domeni (engl. <i>Optical time-domain reflectometry</i>) |
| SMF | Jednomodni svjetlovod (engl. <i>Single-mode fibre</i>) |
| SNR | Omjer signala i šuma (engl. <i>Signal-to-noise ratio</i>) |
| SRS | Stimulirano Ramanovo raspršenje (engl. <i>Stimulated Raman scattering</i>) |

Sadržaj

| | |
|--------------------------|----|
| 1. Uvod | 1 |
| 2. Mjerna metoda | 3 |
| 3. Mjerni postav | 8 |
| 4. Obrada podataka | 11 |
| 4.1. Dohvat podataka | 11 |
| 4.2. Filtriranje | 12 |
| 4.3. Izračun temperature | 15 |
| 4.4. Prikaz rezultata | 17 |
| 5. Rezultati | 19 |
| 6. Zaključak | 25 |
| Literatura | 26 |
| Sažetak | 28 |

1. Uvod

Svjetlovodni sustavi danas predstavljaju najveći dio telekomunikacijskih mreža. Uz izuzetak većine pristupnih mreža do samog korisnika, sva infrastrukturna čvorišta u svijetu povezana su brzim optičkim vezama. Sve je veći porast optičkih sustava i u pristupnim mrežama, kroz FTTx rješenja, odnosno „vlakno do doma / zgrade / bloka“ (engl. *Fibre to the home / building / curb*). Svjetlovodi tako nude visoke pristupne brzine, prvenstveno radi vrlo niske atenuacije signala i širokog spektra dostupnog na optičkim frekvencijama. Nova istraživanja dovela su svjetlovode i u područje senzorskih primjena, korištenjem efekata koji proizlaze iz fizikalne i kemijske strukture svjetlovoda. Nerijetko, iskorištavaju se nelinearni efekti koji u komunikacijskim sustavima predstavljaju smetnju.

Distribuirani senzorski sustavi temeljeni na optičkom vlaknu omogućuju udaljeno mjerenje fizikalnih veličina. U ovim sustavima, optičko vlakno služi kao mjerni element, a kao rezultat mjerenja dobiva se profil fizikalne veličine po duljini mjernog vlakna u zadanom trenutku ili vremenskom prozoru. Ovo svojstvo velika je prednost distribuiranih senzora u odnosu na klasične, koji omogućuju mjerenje fizikalne veličine u jednoj diskretnoj točki. Ovisno o fizikalnoj osnovi korištene mjerne metode, mjerenje je moguće vršiti na istom svjetlovodu koji se koristi i u telekomunikacijske svrhe, korištenjem tehnika multipleksiranja po valnoj duljini. Tipična primjena ovih mjernih metoda je nadzor optičkih veza operatera u aktivnim optičkim mrežama. Moderni OTDR sustavi omogućuju lociranje kvarova na optičkim vezama s prostornom razlučivošću od nekoliko metara, čime se olakšava održavanje mreže. Dodatna prednost reflektometrijskih metoda, kao što je OTDR, jest nužnost pristupa svjetlovodu samo s jedne strane. Odnosno, kraj svjetlovoda koji služi kao mjerni element može biti udaljen. Dapače, aktivna oprema mjernog sustava može biti kilometrima udaljena od točke promatranja fizikalne veličine, čineći tako sustav nadzora robusnim i lakšim za implementaciju na velikim infrastrukturnim objektima. Ovim pristupom je, osim povećanja prostorne razlučivosti mjerenja, smanjena i količina potrebne opreme (kao što je duljina električnih kablova do diskretnih senzora), a smanjene su i smetnje zbog činjenice da je optički signal na njih puno manje osjetljiv od električkog.

Distribuiranim optički senzorskim sustavima mogu se mjeriti i fizikalne veličine koje su u izravnoj sprezi s mjernim svjetlovodom. Polazište ovih mjernih metoda leži u ovisnosti različitih optičkih efekata o prilikama koje vladaju u mjernom svjetlovodu. Primjena ovakvog mjernog sustava može biti praćenje uvjeta u dugačkim konstrukcijama, kao što su cestovni i željeznički tuneli. Kontinuiranim praćenjem svjetlovoda, koje operateri velikih infrastrukturnih objekata često polažu za komunikacijske

potrebe, može se vrlo brzo detektirati prisustvo i točna pozicija požara. Velikim rastom tržišta svjetlovodnih komunikacija, cijene optičkih komponenti i cjelovitih svjetlovodnih sustava značajno su pale. Trenutna istraživanja u području distribuiranih senzora fokusiraju se na korištenje postojećih, konvencionalnih svjetlovoda i komponenata u implementaciji mjernog sustava.

U ovom radu obrađena je metoda distribuiranog mjerenja temperature temeljena na nelinearnom Ramanovom raspršenju. Raspravlja se teorijska podloga mjerne metode. Istražuju se mogućnosti poboljšanja razlučivosti metodama digitalne obrade signala. Primjenjuju se različiti mjerni postavi, izmjenom nekoliko vrsta svjetlovoda.

2. Mjerna metoda

Optičko se vlakno u telekomunikacijskim primjenama koristi u režimu malih snaga. Pri većim snagama do izražaja dolaze nelinearni efekti koji onečišćuju spektar i smanjuju kapacitet komunikacijskog kanala. Sustav za distribuirano mjerenje temperature (DTS) koji ovaj rad opisuje temeljen je na principu mjerenja koji koriste OTDR sustavi. U osnovnom obliku, OTDR sustav koristi se za karakterizaciju optičkog vlakna po cijeloj njegovoj dužini [1]. Karakterizacija se vrši tako da se laserski impuls spregne u vlakno, nakon čega se duž vlakna događa Rayleighjevo raspršenje; Linearni efekt koji uzrokuje raspršenje fotona i stvara povratni raspršni val koji će se moći mjeriti u točki gdje se nalazio pobudni laser [2]. Vremenska razlika između primljene refleksije i polaznog impulsa odgovara udaljenosti koju je svjetlost za to vrijeme prešla. Na taj način, moguće je odrediti točku na optičkom vlaknu na kojoj se promatrana refleksija dogodila, prema relaciji

$$z_0 = \frac{c}{n_{eff}} \cdot \frac{t_0}{2} \quad (2.1)$$

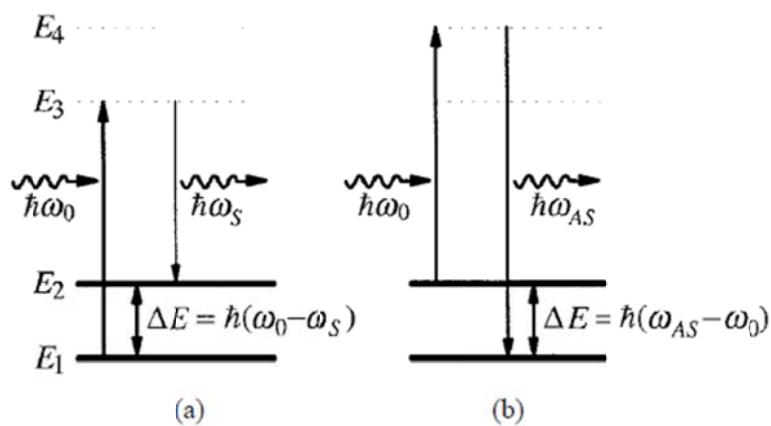
Mjerenjem Rayleighjevog raspršenja, može se dobiti profil refleksije duž optičkog vlakna. Različite pojave, koje se mogu grafički promotriti na dobivenom profilu, opisuju nesavršenosti svjetlovoda te se mogu identificirati priključci, spajanja, prekidi te odrediti atenuacija svjetlovoda na radnoj valnoj duljini. Prostorna rezolucija OTDR mjerenja ovisi o trajanju polaznog impulsa T_0 te se može prikazati relacijom

$$w = \frac{c}{n_{eff}} \cdot T_0 \quad (2.2)$$

Isti principi kao i kod OTDR-a mogu se primijeniti u DTS sustavu [3] [4] [5]. Međutim, za ovu primjenu zanimljivi su upravo nelinearni efekti jer ih možemo vezati uz druge fizikalne veličine koje vladaju u vlaknu. Mjerenje temperature moguće je postići promatranjem nelinearnog Brillouinovog raspršenja ili Ramanovog raspršenja koji se javljaju zbog strukture vlakna [6] [7] [8].

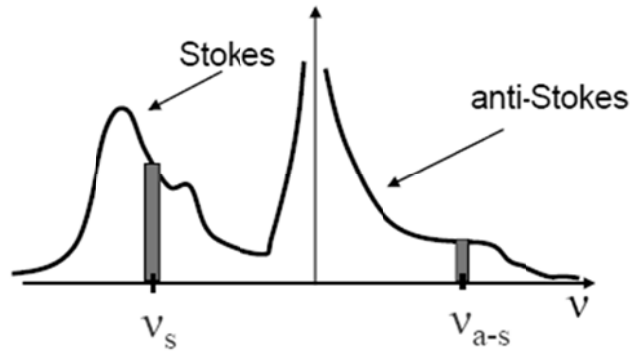
Brillouinovo raspršenje nastaje zbog fenomena elektrostrikcije, odnosno sabijanja materijala pod djelovanjem elektromagnetskog polja [9]. Djelovanjem optičkog impulsa stvaraju se akustički fononi čija frekvencija izravno ovisi o temperaturi materijala. Frekvencija akustičkih valova je reda veličine 100 MHz. Promatranje Brillouinovog raspršenja zahtjeva promatranje optičkog spektra kako bi se točno odredio frekvencijski pomak, čiji je iznos izravno ovisan o temperaturi vlakna [10].

Ramanovo raspršenje rezultat je pobuđivanja atoma silicija u svjetlovodu u neko drugo vibracijsko stanje. Fenomen se može opisati prijelazima u energijskom dijagramu kao na slici 1. Nova vibracijska stanja molekule po energetskej se razini razlikuju u odnosu na osnovnu razinu. Kako je atom inicijalno pobuđen fotonom ulazne kružne frekvencije ω_P , foton koji se emitira u prijelazu može biti niže kružne frekvencije ω_S ili više ω_{AS} . Frekvencijski pomak $\omega_P - \omega_S$ naziva se Stokesovim, a $\omega_P - \omega_{AS}$ anti-Stokes pomakom. Za razliku od Brillouinovog raspršenja, koje rezultira uskopojasnim spektrom raspršenog signala, Ramanovo je raspršenje izrazito širokopojasno, no sam iznos frekvencijskog pomaka nije ovisan o vanjskim čimbenicima, već o intrinzičnom odzivu materijala. Iz tog razloga, kod Ramanovog raspršenja možemo promatrati samo intenzitet raspršenja i na taj način dobiti informaciju o temperaturi optičkog vlakna.



Slika 1: Prijelaz energetskih stanja atoma Si za a) Stokes pomak i b) Anti-Stokes pomak [3]

Spektar Ramanovog raspršenja prikazan je slikom 2. Os ordinata na slici odgovara frekvenciji upadnog fotona iz lasera. Izražena spektralna komponenta oko osi ordinate dolazi od Rayleighjevog i Brillouinovog raspršenja. Anti-Stokes komponenta je po intenzitetu značajno manja od Stokes komponente. Širokopojasni profil Stokes i anti-Stokes signala može se dobro aproksimirati trokutastom karakteristikom, te je moguće naći efektivne frekvencije pomaka, kako je ilustrirano slikom 2 [11].



Slika 2: Spektar Ramanovog raspršenja [11]

Snaga raspršenih Stokes i anti-Stokes komponenti izravno je ovisna o temperaturi optičkog vlakna. U svakoj točki svjetlovoda, snaga raspršnog Stokesovog zračenja može se izraziti kao

$$dP_S = P_0 \rho_S \Gamma_S dz \quad (2.3)$$

gdje je P_0 upadna optička snaga, ρ_S Bose-Einsteinova distribucija vjerojatnosti fonona na temperaturi T_0 i razlici energija $\Delta E = \hbar(\omega_P - \omega_S)$, a Γ_S koeficijent prihvata raspršene svjetlosti koji ovisi o geometriji svjetlovoda i valnoj duljini Stokesova raspršenja. Bose-Einsteinova distribucija ρ_S izravno ovisi o temperaturi te se može izraziti kao

$$\rho_S = \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right)} \quad (2.4)$$

gdje je k Boltzmannova konstanta. Na isti način, može se i za anti-Stokes raspršenje odrediti

$$dP_{AS} \cong P_0 \rho_{AS} \Gamma_{AS} dz. \quad (2.5)$$

Bose-Einsteinova distribucija u ovom slučaju glasi

$$\rho_{AS} = \frac{\exp\left(\frac{-\Delta E}{kT}\right)}{1 - \exp\left(\frac{-\Delta E}{kT}\right)} \quad (2.6)$$

Time je dobivena ovisnost pojedinih komponenti raspršenja o temperaturi. Mjerenjem OTDR metodom dobiva se profil raspršenja Stokes i anti-Stokes komponente duž mjernog vlakna. Izravno očitavanje temperature iz jedne od komponenti zahtjeva kalibraciju, odnosno točno poznavanje raspršnih koeficijenata unutar mjernog vlakna. Ovakav postupak bi i uz poznavanje tvorničkih parametara bio vrlo neprecizan, jer se u vlaknu lako mogu pojaviti nesavršenosti koje predstavljaju nehomogenost materijala. Rješenje nalazimo u mjerenju obadviju raspršnih komponenti [12].

Dobivene profile možemo aritmetički podijeliti, time uklanjajući ovisnost o mjernom vlaknu koja predstavlja dio izraza Γ_S i Γ_{AS} . Za omjer snaga na poziciji z_a dobiva se

$$\frac{P_{AS}(z_a)}{P_S(z_a)} = \left(\frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}}\right)^4 \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT} + \Delta\alpha_P z_a\right) \quad (2.7)$$

gdje je $\Delta\alpha$ razlika u atenuaciji svjetlovoda između valnih duljina jedne od raspršenih komponenti i valne duljine pobudnog lasera. Kod proračuna temperature, potrebno je uračunati i različite odzive detektorskih dioda te parametre mjernog postava koji uključuju dodatna pojačanja ili atenuacije. Konačno, temperatura u točki z_a u kelvinima može se dobiti iz izraza

$$T(z_a) = \frac{\Delta E}{k \ln \left[\frac{I_S}{I_{AS}} \frac{\mathfrak{R}_{AS}}{\mathfrak{R}_S} \frac{a_{AS}}{a_S} \left(\frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}}\right)^4 \right] + \Delta\alpha_P z_a} \quad (2.8)$$

U formuli \mathfrak{R}_{AS} i \mathfrak{R}_S su odzivi dioda na valnim duljinama anti-Stokesa i Stokesa, respektivno, dok je a_{AS}/a_S koeficijent koji opisuje omjer pojačanja, odnosno gušenja između Stokes i anti-Stokes grana mjernog sustava. I_S i I_{AS} su struje detektorskih dioda koje promatraju Stokes i anti-Stokes komponentu raspršenja, respektivno.

Iako je koeficijent koji opisuje utjecaj svjetlovoda eliminiran dijeljenjem snaga, odnosno struja dioda na Stokes i anti-Stokes kanalima, odabir svjetlovoda je i dalje bitan za uspješno mjerenje. Kao prvi, no manje bitan čimbenik, tu je i dalje razlika atenuacija $\Delta\alpha_P$ koju je poželjno imati specificiranu od proizvođača svjetlovoda. No, ovaj parametar će se moći i izmjeriti, o čemu će biti govora u poglavlju 4. Druga bitna stavka jest ulazna snaga impulsa o kojoj ovisi snaga raspršenog signala obadviju komponenti. Vršna je snaga laserskog impulsa izravno povezana s SNR-om primljenog raspršnog signala, o kojemu pak ovisi mjerna nesigurnost. Poželjno je da vršna snaga lasera P_0 bude što veća, kako bi se povećala i snaga Ramanovog raspršenja. Međutim, nelinearni efekt na koji se oslanja ova mjerna metoda jest spontano Ramanovo raspršenje. Povećanjem snage impulsa, javlja se efekt stimuliranog Ramanovog raspršenja (SRS). Snaga pri kojoj se počinje javljati SRS može se aproksimirati kao

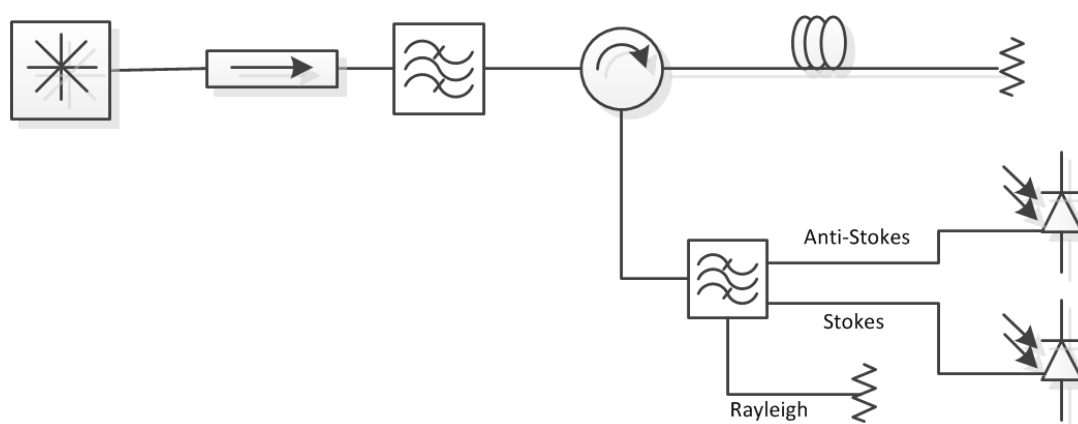
$$P_{th} \approx 16 \frac{A_{eff}}{L_{eff} g_R} \approx 16 \alpha \frac{\pi w^2}{g_R} \quad (2.9)$$

gdje je $A_{eff} = \pi w^2$ efektivna površina jezgre svjetlovoda, a g_R tzv. Ramanovo pojačanje u jedinici m/W. Iz ovoga je jasno kako je snaga praga SRS-a izravno ovisna o površini, odnosno tipu mjernog svjetlovoda. Ulaskom u područje stimuliranog Ramanovog raspršenja, izmjereni će se profil Stokes i anti-Stokes komponenti izrazito izobličiti, onemogućujući dobivanje temperature. U ovom radu obrađeno je mjerenje temperature na SMF-u i na MMF-u.

Već na nižim snagama, javlja se i stimulirano Brillouinovo raspršenje. No, kako je taj efekt, kao i spontano Brillouinovo raspršenje, izrazito uskopojasan u odnosu na Ramanovo raspršenje, pojavljivanje stimuliranog Brillouinovog raspršenja neće utjecati na ovaj mjerni sustav. Posebnu pozornost treba obratiti prilikom filtriranja pojedinih komponenti raspršnog Stokesovog signala. Rayleighjevo je raspršenje po iznosu snage puno veće od Stokes i anti-Stokes komponenti Ramanovog raspršenja. Ovisno o kvaliteti filtra kojim se odvajaju pojedine komponente promatranog signala, moguća je pojava curenja Rayleighjevog raspršenja prema drugim izlazima Ramanove kocke [13]. Na širokopojasnim detektorskim diodama ova pojava može uzrokovati sustavnu pogrešku mjerenja.

3. Mjerni postav

Kao što je opisano u poglavlju 2, mjerni postav zapravo predstavlja optički reflektometar u vremenskoj domeni (OTDR). Razlika u odnosu na klasične OTDR sustave za karakterizaciju svjetlovoda jest što se u ovoj primjeni reflektirana i promatrana valna duljina razlikuje od valne duljine lasera. Mjerni postav shematski je prikazan slikom 3.



Slika 3: Blokovska shema mjernog postava

Sustav se sastoji od nanosekundnog lasera kratkih i podesivih trajanja impulsa koji se ponavljaju frekvencijom repeticije f_R . Frekvencija f_R mora biti podešena dovoljno visoko tako da DAQ kartica može uhvatiti mjereni signal dovoljno često. Time se omogućuje prikupljanje dovoljnog broja mjerenja za daljnju obradu. Ipak, frekvencija f_R mora biti i dovoljno niska kako vremenski neovisna mjerenja ne bi utjecala jedno na drugo, odnosno da se izbjegne preklapanje pobudnog optičkog impulsa unutar mjernog svjetlovoda. Korišteni laser tipa NPL-1550-37-R proizvođača Optilab ima mogućnost repeticije impulsa od 100 Hz do 1 MHz [14]. Ovime su zadovoljeni zahtjevi učestalosti mjerenja, a osigurana je i neovisnost različitih mjerenja. Trajanje impulsa lasera može se podesiti u koracima od 2,5 ns sve do 1000 ns, a ukupna energija impulsa je do 100 μ J. Laser u sebi sadrži dva EDFA pojačala podesivih struja pumpi. Time se izravno može kontrolirati izlazna snaga lasera. Laser ima kontrolni izlaz kojim je spregnuto 1% od ukupne izlazne snage lasera (engl. *1% tap*). Ovaj izlaz koristit će se kao okidni signal za DAQ karticu. Također, time će se mjeriti i vršna snaga impulsa iz glavnog izlaza lasera.

Nakon lasera, postavljen je jednostavni izolator kojim se osigurava poništavanje eventualno spregnutog povratnog vala prema laseru. Idući element je DWDM filtar kojim se smanjuje spektar ASE šuma koji dolazi od EDFA pojačala unutar lasera. Ovakav će pristup u konačnici dati bolji SNR kod mjerenja raspršnih spektralnih komponenti. Filtar je centriran na valnoj duljini

$$\lambda_0 = 1550 \text{ nm} \quad (3.1)$$

a širina pojasa propuštanja je

$$\Delta f = 200 \text{ GHz} \quad (3.2)$$

što je dovoljno za filtriranje velikog dijela ASE šuma EDFA pojačala.

Cirkulator osigurava usmjeravanje polaznog laserskog impulsa u mjerni svjetlovod te reflektiranog mjernog signala prema mjernoj grani sustava. U prolaznoj grani cirkulatora spaja se mjerni svjetlovod koji se može sastojati i od kaskade nekoliko različitih svjetlovoda. Dijelovi svjetlovoda ili cijeli svjetlo vodi mogu se staviti u komore za grijanje i hlađenje kako bi se ciljano upravljalo temperaturama svjetlovoda. Kraj sustava mjernih svjetlovoda potrebno je zaključiti tako da visoka optička snaga lasera, koja dolazi do kraja svjetlovoda, ne bi bila spregnuta u okolinu. Dodatno, zaključenjem se smanjuje refleksija na kraju svjetlovoda koja može izazvati SRS i pokvariti oblik profila izmjerenih raspršnih komponenti. U ovom radu, izmjenjivani su postavi sa SMF i MMF svjetlovodima, a korišteni su i SMF svjetlo vodi s izraženim nelinearnim efektima, odnosno visokom apsolutnom vrijednošću parametra $|\beta_3|$. Korišteni mjerni sustavi imaju ukupnu duljinu svjetlovoda do 5 km.

U mjernoj grani sustava nalazi se tzv. Ramanova kocka koja ima 4 izvoda. Jedan izvod je ulazni, dok se u tri izlazna izvoda sprežu filtrirane komponente Rayleighjevog raspršenja (na valnoj duljini lasera) te Stokes i anti-Stokes komponente. Kako bi se minimizirao efekt preslušavanja Rayleighjevog raspršenja u Stokes i anti-Stokes kanale, Ramanova kocka mora imati visoku izolaciju između svih reflektiranih komponenti. Izolacija između Rayleighjeve i Ramanovih komponenti iznosi

$$I_{Ray} > 60 \text{ dB} \quad (3.3)$$

što je dovoljno za eliminaciju utjecaja curenja Rayleighjevog raspršenja. Ramanova kocka spregnuta je višemodnim vlaknom.

Izlazi iz Ramanove kocke spojeni su na PIN InGaAs detektorske diode s podesivim pojačanjem transimpedancijskog pojačala. Diode su tipa PDA10CS-EC proizvođača Thorlabs. Pojačalo ima umnožak pojačanja i širine pojasa 600 MHz, a za pojačanje se koriste visoke vrijednosti od 30 do 40 dB. Konačne će širine pojasa dioda iznositi 775 kHz za pojačanje od 30 dB te 320 kHz za 40 dB. Jasno je da će se morati osmisliti dodatna obrada signala za rekonstrukciju profila raspršenja te da će

diode ovako malih širina pojasa ograničiti i rezoluciju i preciznost mjerenja. Krivulja odziva u ovisnosti o valnoj duljini dana je u [15].

Izlaz detektorskih dioda tvornički je izveden BNC priključkom. Izlazni signali s detektorskih dioda kojima se promatraju Stokes i anti-Stokes kanali dohvaćeni su s DAQ karticom PXIe-5160 proizvođača National Instruments. Ulaz kanala na koji su spojene diode podešen je na visokoomski. Dodatno, jednim kanalom praćen je spregnuti 1% tap izlaz lasera, a na još jedan kanal spojen je obični temperaturni senzor tipa TMP36 proizvođača Analog Devices, čije se očitavanje koristi za kalibraciju mjernog sustava. Senzor je postavljen na početak sustava mjernih svjetlovoda koji se drži na sobnoj temperaturi.

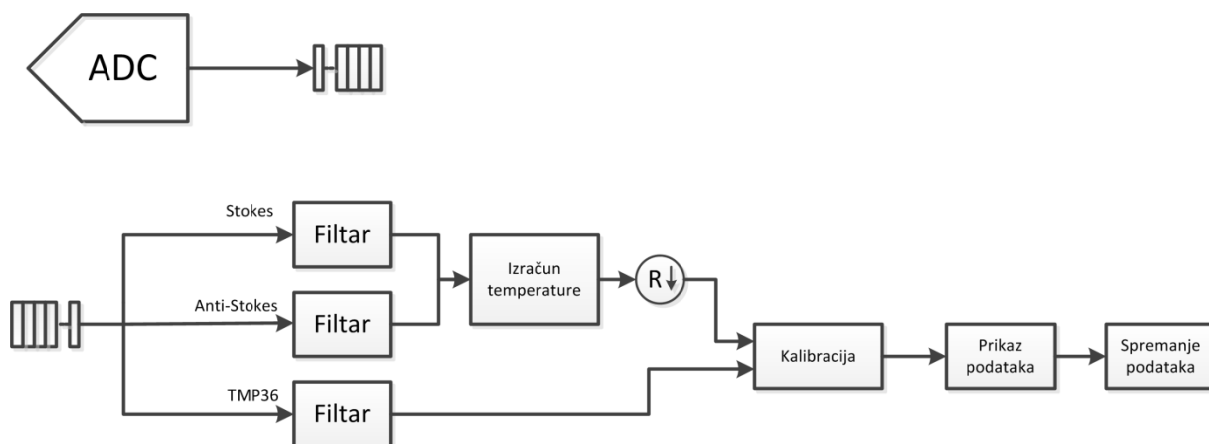
4. Obrada podataka

4.1. Dohvat podataka

Podaci se obrađuju u programskom paketu LabVIEW 2013 proizvođača National Instruments te se istim paketom grafički prikazuju na zaslonu računala. DAQ kartica omogućuje dohvat podataka brzinom otipkavanja od 1,25 GS/s. Time je Nyquistovim teoremom obuhvaćen dio frekvencijskog pojasa do 625 MHz. Period koji odgovara najvišoj frekvenciji uzorkovanja jest $T = (625 \text{ MHz})^{-1} = 1,6 \text{ ps}$. Dakle, kada promatramo korištene širine impulsa lasera, a osobito i širine pojasa detektorskih dioda, DAQ kartica sigurno zadovoljava Nyquistov teorem. Veličina akvizicijske memorije podešena je na 50000 uzoraka, što je u ovom mjernom postavu dovoljno za dohvat signala koji propagira s kraja mjernog svjetlovoda. Kontrolni izlaz lasera služi kao okidač (engl. *trigger*) za početak akvizicije. Pokazuje se da korištena DAQ kartica na ovoj brzini otipkavanja ima prijelaznu pojavu na prvih nekoliko dohvaćenih uzoraka. Stoga je okidaču postavljena referentna pozicija na 50% od ukupnog broja uzoraka. Podešeni broj uzoraka je unatoč tomu još uvijek dovoljan za promatranje cijelog mjernog svjetlovoda. Detektorska dioda ima DC pomak koji nije od interesa u ovoj primjeni. Kako bi se pojednostavila obrada signala, kanali na kojim se nalaze diode koje promatraju Stokes i anti-Stokes komponente spregnuti su izmjenično (AC). Budući da je trajanje impulsa u odnosu na period ponavljanja lasera izrazito malen, signal izvan raspona mjernog svjetlovoda bi time trebao biti doveden na nultu razinu. Ipak, dodatna korekcija je uvedena, o čemu će biti govora kasnije.

Dohvat podataka ponavlja se za cijelog trajanja izvođenja programa, unutar *while* petlje. DAQ kartice proizvođača National Instruments imaju izvrsnu podršku kroz programski paket LabVIEW. Potrebno je osigurati da se DAQ kartica konfigurira samo jednom za cijelog trajanja programa. To znači da se nakon svake iteracije *while* petlje DAQ kartica treba ostaviti *otvorenom*.

Algoritam za obradu podataka može se blokovski prikazati slikom 4. Radi povećanja brzine obrade, uveden je paralelizam kojim se osigurava neovisnost slijeda izvođenja dijelova programa koji se odnose na dohvat podataka te na obradu podataka. Prijenos dohvaćenih podataka u obradu obavlja se pomoću strukture reda, a LabVIEW inherentno osigurava pokretanje obrade podataka tek nakon što dohvaćeni podaci postanu dostupni u redu. Time LabVIEW osigurava upravljanje tokom podataka i izvođenjem programa.

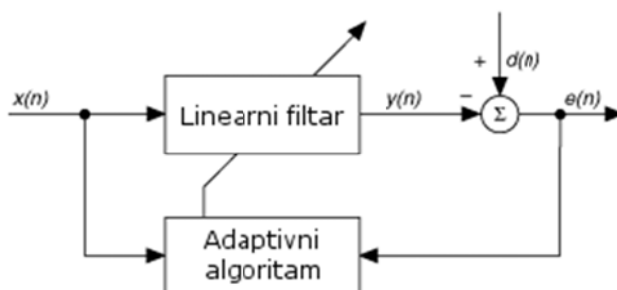


Slika 4: Blokvska shema algoritma za obradu signala

4.2. Filtriranje

Na izlazu iz detektora, koristan je signal vrlo zašumljen te je potrebno dohvatiti mnogo mjerenja i filtrirati ih kako bi se povećao SNR. Time se smanjuje pogreška izmjerene temperature. Tijekom razvoja programa, implementirano je nekoliko različitih algoritama za filtriranje. Prilikom dizajniranja algoritma za uklanjanje šuma, bitno je imati na umu da je šum bijelog karaktera i kao takav nekoreliran s korisnim signalom.

Prvi implementirani algoritam je obično usrednjavanje. Rezultati koji se postižu odgovaraju očekivanoj temperaturnoj rezoluciji, no vrijeme usrednjavanja do dosezanja konačne točnosti postupka, ovisno o ulaznoj snazi, veće je od 5 minuta. Drugi pristup je korištenje adaptivnog filtra s metodom najmanje kvadratne pogreške (engl. *Adaptive LMS filter*). Blokvska shema takvog filtra prikazana je slikom 5 [16] [17] [18].



Slika 5: Blokvska shema adaptivnog LMS filtra [17]

Linearni filtar predstavlja obični digitalni FIR filtar. Njegova se funkcija može prikazati relacijom

$$y(n) = x(n) \cdot w(n) \quad (4.1)$$

gdje je $w(n)$ vektor koeficijenata filtra. Izlazni signal pogreške $e(n)$ predstavlja razliku između dobivenog signala i referentnog signala $d(n)$. Koeficijenti filtra upravljani su adaptivnim algoritmom koji u svakom koraku filtriranja dobiveni izlazni signal uspoređuje s referentnim signalom. Algoritam traži optimalne koeficijente tako da se dobije najmanja kvadratna pogreška u odnosu na referentni signal. Izračun koeficijenata vrši se po relaciji

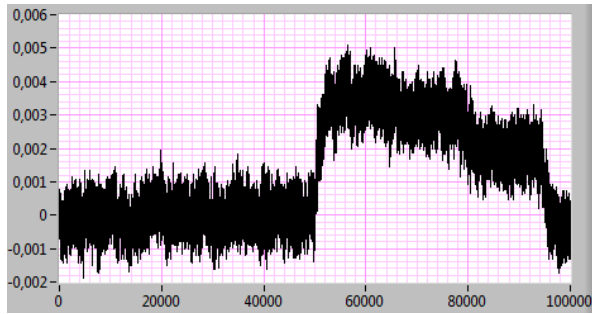
$$w(n+1) = w(n) + \mu e(n) \frac{x(n)}{\|x(n)\|^2} \quad (4.2)$$

pri čemu je μ parametar filtra. Ova relacija predstavlja normalizirani LMS algoritam. Postoje i druge inačice adaptivnog LMS filtra, no ova je u razvoju odabrana kao najjednostavnija za implementaciju. Zbog nekoreliranosti šuma i korisnog signala, iteracijom ovog postupka kroz veliki broj mjerenja, filtar će konvergencijom FIR koeficijenata odgovarati prilagođenom Wienerovom filtru.

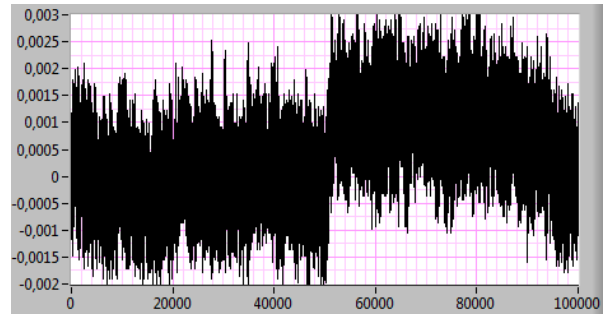
Kao referentni signal u idealnom bi se slučaju mogao uzeti referentni profil mjernog optičkog vlakna. Takav profil može se dobiti algoritmom običnog usrednjavanja s vrlo dugim vremenom obrade, odnosno s vrlo velikim brojem neovisnih mjerenja. Dodatno, referentni je profil moguće izgladiti kasnijom obradom podataka, poznavajući karakteristike mjernog vlakna. Međutim, taj postupak može biti vremenski zahtjevan, a i sustav će time biti kalibriran na jedan svjetlovod, uz minimalnu toleranciju na ponovljivost mjernog postava. Greške bi se mogle pojaviti već i kod ponovnog spajanja priključka optičkog vlakna. U mnogim praktičnim primjenama, pokazuje se kako je dovoljno koristiti zakašnjeni ulazni signal kao referencu na ulazu adaptivnog algoritma. Ova je metoda efikasna u slučaju ispunjenja dviju pretpostavki. Prva je nekoreliranost šuma i korisnog signala. Druga je uskopojasnost korisnog signala u slučaju da je šum širokopojasan ili obrnuto; Širokopojasnost korisnog signala uz uskopojasni šum. Korisni se signal može smatrati uskopojasnim zbog visoke brzine otipkavanja DAQ kartice. Bilo kakva promjena temperature duž optičkog vlakna manifestirat će se u brzim skokovima unutar nekoliko koraka prostorne rezolucije mjernog sustava. Stoga, spektar korisnog dijela informacije o temperaturi bit će koncentriran oko osnovne komponente koja odgovara trajanju laserskog impulsa (npr. $f_0 = 40$ MHz za trajanje impulsa $T_0 = 25$ ns). Bijeli šum, s druge strane, djeluje na cijelom periodičnom spektru diskretiziranog mjerenog signala.

Implementirani algoritam dobro uklanja šum u Stokes i anti-Stokes komponentama, no potrebno je vrijeme od nekoliko sekundi da adaptivni algoritam dovoljno konvergira vrijednosti koeficijenta FIR filtra. Tek tada apsolutna vrijednost dobivenih signala počinje konvergirati prema stvarnoj vrijednosti mjerenih veličina. Ipak, algoritam se pokazuje znatno bržim od običnog usrednjavanja.

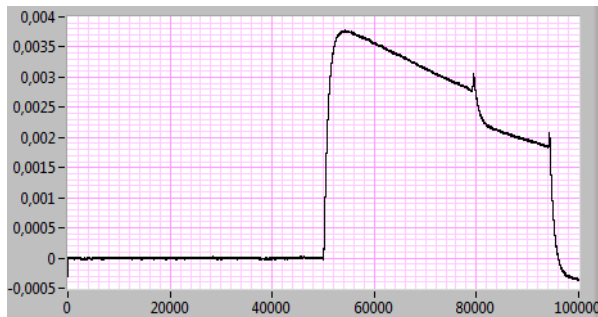
Nakon filtriranja, dobiveni signal je refleksija Stokes i anti-Stokes komponente u vremenu. Vremenska os odgovara poziciji na vlaknu na kojoj se refleksija dogodila, prema formuli (2.2) iz klasičnih OTDR sustava. Zbog puno manje snage anti-Stokes komponente, očekivana je i manja amplituda, ali i puno veća zašumljenost u odnosu na Stokes. Primjer dohvaćenih podataka u jednom DAQ prozoru (nefiltrirani signal) i filtriranog signala prikazan je slikom 6.



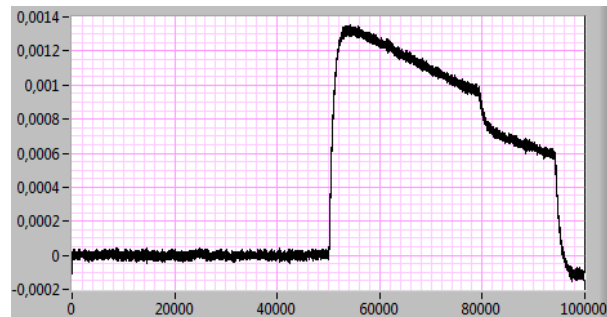
a) Stokes komponenta u jednom DAQ prozoru



b) Anti-Stokes komponenta u jednom DAQ prozoru



c) Stokes komponenta nakon filtriranja



d) Anti-Stokes komponenta nakon filtriranja

Slika 6: Valni oblik reflektiranog signala

Obadvije komponente imaju stalni negativni nagib koji dolazi od atenuacije svjetlovoda na zadanoj valnoj duljini. Dvije će komponente imati različite nagibe zbog različitog koeficijenta atenuacije svjetlovoda na dvjema valnim duljinama. Skokovi i propadi se pojavljuju kao rezultat refleksije na priključcima i krajevima mjernog svjetlovoda.

4.3. Izračun temperature

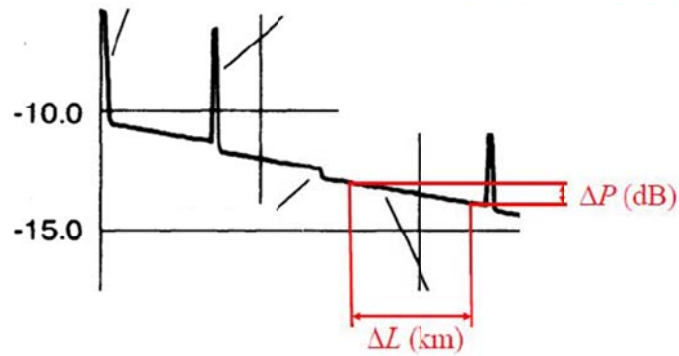
Iz filtriranih profila Stokes i anti-Stokes komponenti može se dobiti temperatura optičkog vlakna. Za točan proračun temperature stvoren je novi virtualni instrument (VI) koji kao ulaz prima Stokes i anti-Stokes signale, valne duljine Stokes, anti-Stokes signala i signala lasera te parametre detektora i akvizicije za Stokes i anti-Stokes komponentu. Program koristi formulu (2.8) za izračun temperature, pri tome vodeći računa o atenuacijama i pojačanjima svih elemenata u Stokes i anti-Stokes granama mjernog sustava sa slike 3. Valne duljine λ_S i λ_{AS} uzete su kao ulazni parametri, a razlika energija ΔE proračunata je iz relacije

$$\Delta E = \hbar(\omega_0 - \omega_S) \quad (4.3)$$

gdje je ω_0 frekvencija lasera. Prilikom zadavanja valnih duljina Stokes i anti-Stokes komponenti, potrebno je voditi računa o razmatranjima širokopojsnosti Ramanovih raspršenja koja su opisana u poglavlju 2. Za frekvencije svake komponente uzeta je efektivna valna duljina. Aritmetička sredina tih valnih duljina je upravo valna duljina lasera. Kako je signal lasera vrlo visoke snage, za razliku od Stokes i anti-Stokes komponenti, njegov je spektar lako izmjeriti u svrhu provjere.

Odziv detektorske diode \mathfrak{R} zadan je tehničkim podacima o diodi. Ovisnost odziva o valnoj duljini zadaje se grafom. Atenuacije optičkog vlakna na traženim valnim duljinama u manjoj se mjeri razlikuju, no ta razlika može dovesti do zakrivljenosti konačnog temperaturnog profila. Idealno, proizvođač optičkog vlakna može dati graf ovisnosti atenuacije o valnoj duljini. Međutim, većina komunikacijskih lasera isporučuje se uz podatke o gušenju na valnim duljinama koje odgovaraju prvom i drugom komunikacijskom prozoru. Na valnim duljinama od interesa je, stoga, potrebno pristupiti mjerenjem.

Mjerenje atenuacije može se izvesti klasičnim metodama, posebnim mjernim postavom koji se sastoji od lasera ugodive valne duljine, svjetlovoda i detektora. Međutim, kako ovdje već postoji distribuirani mjerni sustav, mogu se iskoristiti principi klasičnog OTDR sustava. Primjer profila dobivenog klasičnim OTDR mjerenjem prikazan je slikom 7.



Slika 7: Mjerenje atenuacije iz OTDR profila [11]

Profil je sličnog karaktera kao i onaj na Stokes i anti-Stokes valnim duljinama. Iz nagiba neprekinutog dijela krivulje, može se dobiti gušenje svjetlovoda na promatranoj valnoj duljini kao

$$\alpha \text{ [dB/km]} = \frac{\Delta P}{\Delta L} \quad (4.4)$$

Mjerenjem gušenja na obadvije valne duljine dobivene su vrijednosti α_S i α_{AS} . Program dalje uzima pretpostavku linearne promjene gušenja s valnom duljinom u području korištenih valnih duljina. Iz toga se izračunava i α_0 za valnu duljinu lasera. Sada se razlika atenuacije uslijed frekventijskog pomaka može dobiti kao

$$\Delta\alpha_P = \alpha_0 - \alpha_S \quad (4.5)$$

Sada, uz poznate sve parametre iz formule (2.8), može se dobiti temperaturni profil duž optičkog vlakna. Treba imati na umu da su Stokes i anti-Stokes očitavanja dobivena u frekvenciji uzorkovanja $f_H = 1,25 \text{ GHz}$. Stoga će i dobiveni temperaturni profil biti izračunat u istom broju uzoraka. Razlučivost mjernog postupka je, međutim, puno manja, odnosno odgovara onoj iz izraza (2.2). Jasno je kako je rezolucija mjerenja određena trajanjem laserskog impulsa. Postupkom decimacije temperaturnog profila s visoke frekvencije uzorkovanja f_H na nisku frekvenciju $f_S = 1/T_0$, dobivamo temperaturni profil u odgovarajućoj rezoluciji. Faktor decimacije je uzet kao

$$R = \frac{f_H}{f_S} = f_H \cdot T_0 \quad (4.6)$$

Tako je, primjerice, za korištenu širinu impulsa od $T_0 = 25 \text{ ns}$ ostvarena rezolucija mjerenja 2.4 m.

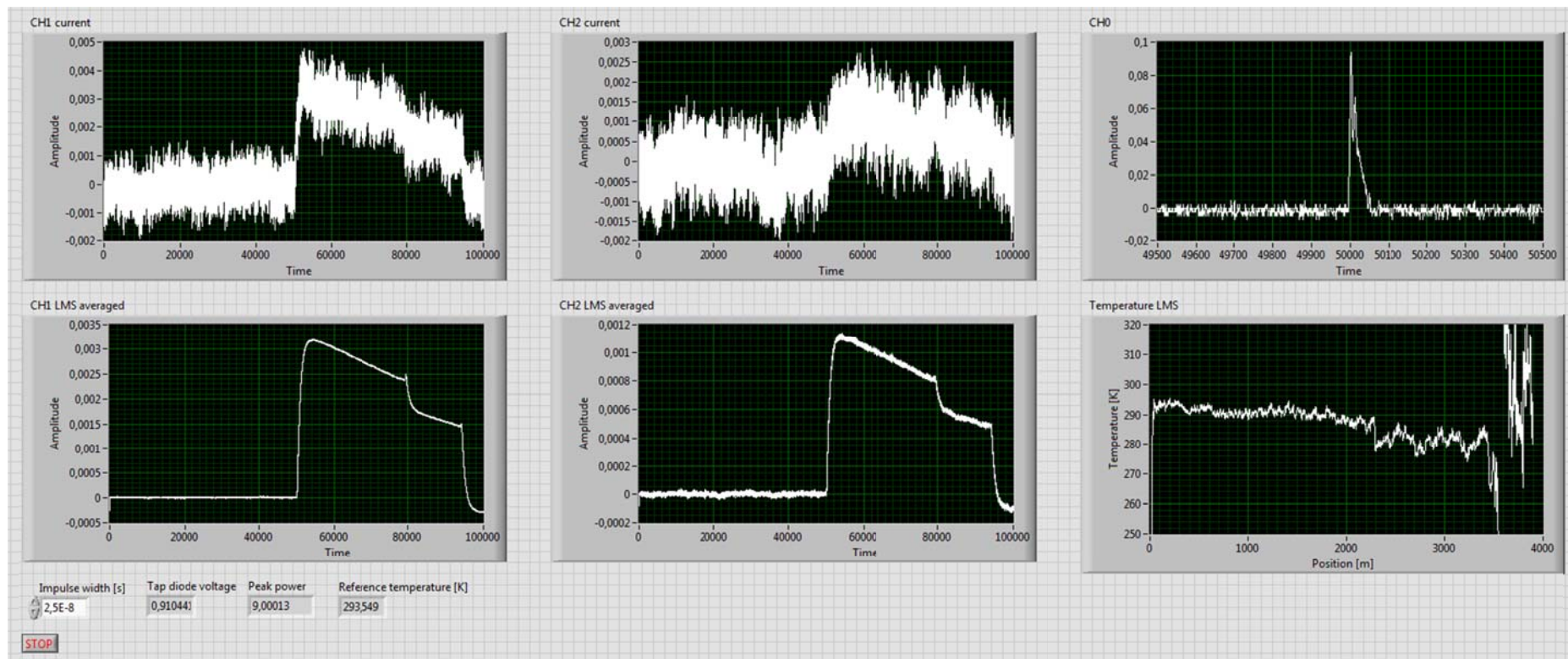
O koeficijentima \mathfrak{R}_i i α_i iz formule (2.8) te o točno određenim atenuacijama i pojačanjima pojedinog kanala izrazito ovisi apsolutna pogreška mjerenja temperature. Zbog vrlo niskih optičkih razina Stokes, a osobito anti-Stokes komponente, vrlo je teško izmjeriti spektar povratnog signala i točno odrediti efektivnu valnu duljinu. Stoga je potrebno napraviti kalibraciju mjernog sustava korištenjem klasičnog temperaturnog senzora. Ovdje je korišten senzor tipa TMP36 koji ima veliki raspon i

linearan odziv na promjenu temperature. Njegov izlaz spojen je na slobodni kanal DAQ kartice, a sam senzor smješten je na početak mjernog svjetlovoda. Konačni temperaturni profil se sada može korigirati uspoređivanjem dobivenog temperaturnog profila na početku svjetlovoda s očitanjem temperaturnog senzora. Izračunati pomak se zatim oduzme od svih točaka temperaturnog profila te je time sustav kalibriran s preciznošću koja odgovara preciznosti klasičnog temperaturnog senzora. U ovom slučaju, to je 2 °C.

4.4. Prikaz rezultata

Korisničko sučelje prikazano je slikom 8. Na sučelju su grafički prikazani trenutni signal detektorskih dioda, filtrirani profili raspršenog signala, konačna temperatura i valni oblik laserskog impulsa. Na osi apscisa na svim je grafovima prikazan redni broj dohvaćenog uzorka, osim kod temperature gdje je na osi apscisa prikazana izračunata pozicija raspršnog signala na mjernom vlaknu. Ordinata na grafu temperature prikazuje temperaturu u kelvinima, a na ostalim grafovima naponsku razinu očitane na ulazu DAQ kartice. Numerički se dodatno ispisuju i vršni napon diode kojom se promatra 1% tap izlaz lasera, iz toga izračunata vršna snaga laserskog impulsa u vatima te referentna temperatura senzora TMP36 u kelvinima. Zbog točnosti preračunavanja fizikalnih veličina i određivanja rezolucije mjerenja, korisnik ručno upisuje širinu laserskog impulsa kako je unesena i u postavkama lasera.

Pritiskom na tipku STOP, *while* petlja se zaustavlja i DAQ kartica se zatvara. Korisniku se potom nudi mogućnost spremanja rezultata obrade u CSV datoteku.



Slika 8: Korisničko sučelje mjernog sustava

5. Rezultati

Parametre lasera neovisne o odabiru svjetlovoda čine širina optičkog impulsa T_0 i frekvencija repeticije f_R . Frekvencija repeticije uzeta je kao $f_R = 1$ kHz. Odabrana je kao optimum između učestalosti okidanja *triggera* DAQ kartice i sigurnog razmaka između dva vremenski odvojena mjerenja mjernog svjetlovoda. Širina optičkog impulsa treba biti čim manja kako bi se ostvarila visoka prostorna rezolucija mjerenja. No, vrlo kratki optički impuls može pasti izvan frekvencijskog opsega detektorskih dioda, čime nastaje pogreška mjerenja. Konfiguracijsko sučelje lasera omogućuje odabir širine impulsa u koracima od 2,5 ns. Isprobavanjem različitih vrijednosti pokazalo se da je

$$T_{\min} = 15 \text{ ns} \quad (5.1)$$

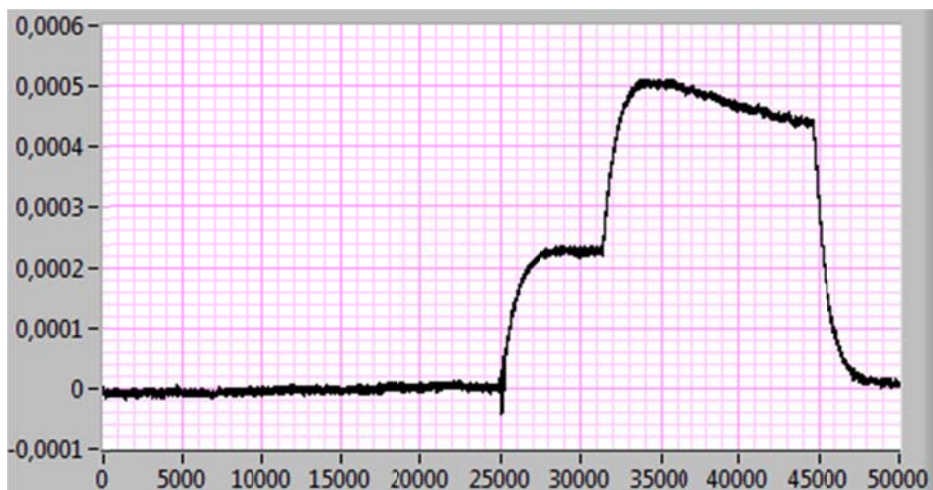
najmanja širina pri kojoj diode i dalje vjerno detektiraju valni oblik impulsa. Međutim, daljnjim mjerenjem pokazalo se da je između 15 ns i 30 ns vrlo mala promjena u konačnoj pogrešci mjerenja temperature. Stoga je kao širina impulsa konačno odabrana

$$T_0 = 25 \text{ ns} \quad (5.2)$$

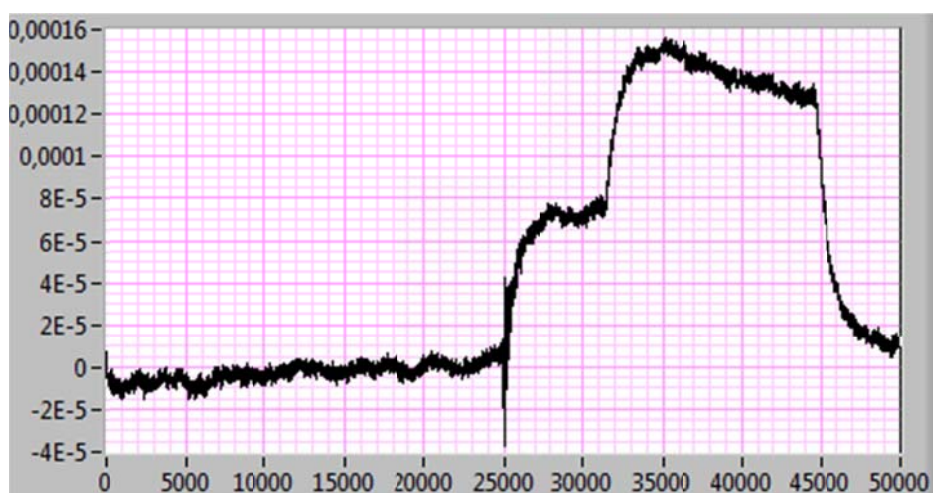
Za EDFA pojačala odabrana je stalna struja prve pumpe

$$I_1 = 400 \text{ mA} \quad (5.3)$$

Struja druge pumpe podešavana je u ovisnosti o vrsti korištenog svjetlovoda, u skladu s razmatranjima u poglavlju 2. Sljedeći korak je određivanje najviše vršne snage impulsa do koje se još ne javlja SRS. Vršna snaga određivana je empirijski. U prvom mjernom postavu uzeta je kaskada SMF svjetlovoda. Prvi svjetlovod u kaskadi je tipični komunikacijski svjetlovod prema standardu G.652, a drugi je svjetlovod s izraženim nelinearnostima. Razlika u odzivu na nelinearne efekte vidljiva je iz profila Stokes i anti-Stokes raspršenja prikazanih na slici 9. Jasno je vidljiv skok koji slijedi kao rezultat različitih koeficijenata β_3 .



a) Stokes komponenta



b) Anti-Stokes komponenta

Slika 9: Profil raspršenja kaskadiranih SMF svjetlovoda

Kod određivanja najveće vršne snage optičkog impulsa, vodilo se računa o pragu pri kojem je primjetna deformacija profila raspršnog signala. Pojava SRS-a izaziva visoke šiljke u profilu, a njihova se relaksacija produžuje nekoliko stotina metara od mjesta pojave, koje je najvjerojatnije na priključcima i krajevima mjernog sustava. Međutim, povećanjem vršne snage vidljivo je i povećanje preciznosti mjerenja. Nekoliko rezultata pogreške mjerene temperature te kvalitativnih rezultata promatranja pojave SRS-a u ovisnosti o vršnoj snazi prikazano je tablicom 1.

Tablica 1: Rezultati mjerenja kaskade SMF svjetlovoda

| Struja pumpe 2 I_2 [mA] | Vršna snaga impulsa P_p [W] | Pogreška temperature ΔT [K] | Kvalitativna ocjena pojave SRS |
|------------------------------|-------------------------------------|---|-----------------------------------|
| 700 | 2,30 | 75 | Nema SRS |
| 800 | 4,50 | 30 | Nema SRS |
| 1000 | 5,54 | 20 | Vidljiv šiljak na kraju vlakna |
| 1050 | 6,57 | 15 | Šiljak na kraju vlakna je izražen |

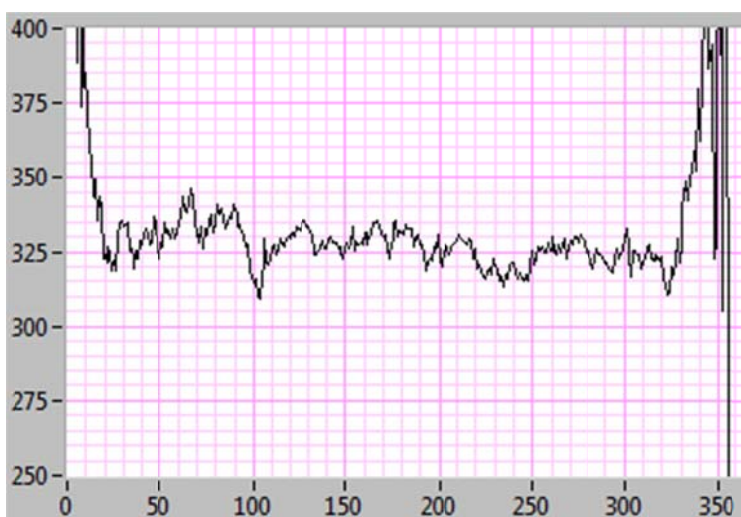
Sva mjerenja obavljena su s vremenom usrednjavanja od 3 min. Procjena najviše vršne snage za SMF iznosi

$$P_{\max} = 6 \text{ W} \quad (5.4)$$

Pri tome se očekuje pogreška određivanja temperature od

$$\Delta T = 20 \text{ K} \quad (5.5)$$

Temperaturni profil dobiven s ovim mjernim parametrima prikazan je slikom 10. Potrebno je napomenuti kako prilikom SMF mjerenja nije izvršena kalibracija apsolutne temperature. Os apscisa sadrži redne brojeve diskretnih uzoraka nakon decimacije.



Slika 10: Temperaturni profil SMF svjetlovoda

Kod mjerenja s MMF svjetlovodima, u mjerni postav su uvedena dva MMF svjetlovoda sličnih karakteristika. Svjetlovodi odgovaraju komunikacijskim svjetlovodima prema standardu G.651. Očekivana je mogućnost korištenja veće vršne snage s ciljem smanjenja gustoće snage u svjetlovodu.

Ista metodologija mjerenja primijenjena je kao i kod SMF svjetlovoda, i dobiveni su rezultati kao u tablici 2.

Tablica 2: Rezultati mjerenja kaskade MMF svjetlovoda

| Struja pumpe 2 I_2 [mA] | Vršna snaga impulsa P_p [W] | Pogreška temperature ΔT [K] | Kvalitativna ocjena pojave SRS |
|------------------------------|-------------------------------------|---|--|
| 1000 | 5,64 | 10 | Nema SRS |
| 1100 | 9,59 | 8 | Nema SRS |
| 1200 | 13,44 | 7 | Nema SRS |
| 1240 | 15,42 | 5 | Visoki reflektirani SRS na kraju vlakna |

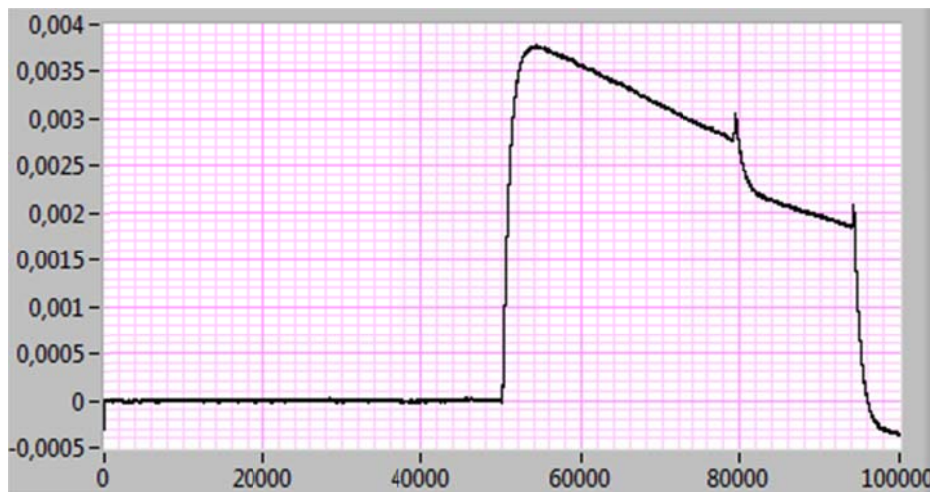
Jasno je vidljivo da je već pri istim optičkim snagama postignuta bolja preciznost mjerenja temperature nego kod SMF vlakna. Povećanjem optičke snage do maksimalnih

$$P_{\max} = 13,5 \text{ W} \quad (5.6)$$

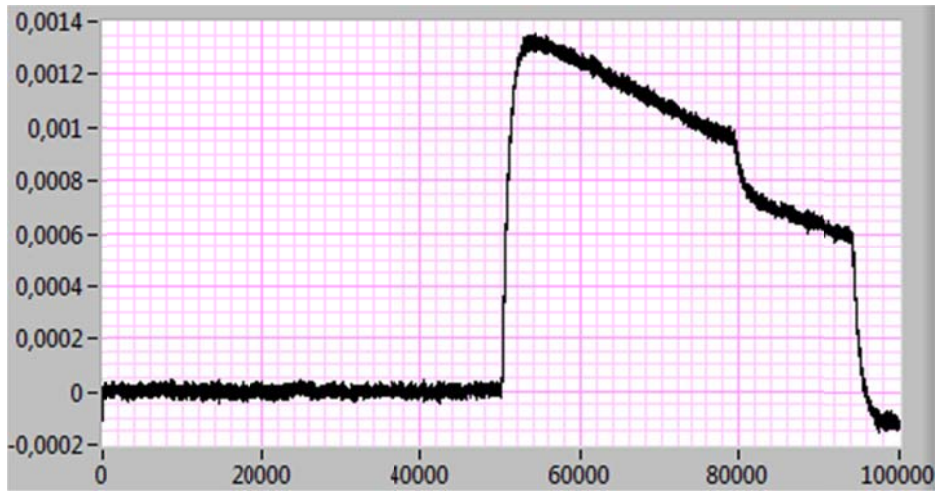
postignuta je bolja preciznost koja sada iznosi

$$\Delta T = 5 \text{ K} \quad (5.7)$$

Izmjereni profili Stokes i anti-Stokes komponenti prikazani su slikom 11.



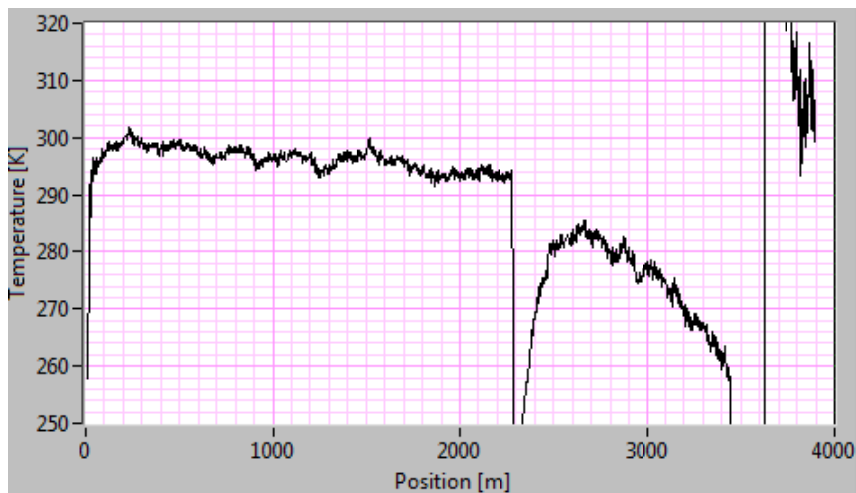
a) Stokes komponenta



b) Anti-Stokes komponenta

Slika 11: Profil raspršenja kaskadiranih MMF svjetlovoda

Jasno je vidljivo poboljšanje SNR u odnosu na mjerenje na SMF vlaknu. Slikom 12 prikazan je konačni temperaturni profil dobiven mjerenjem na prethodno određenoj maksimalnoj snazi.

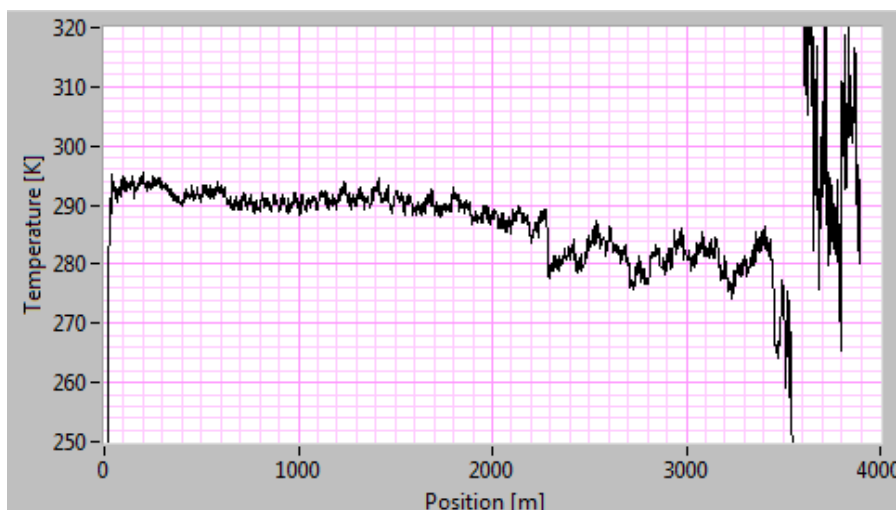


Slika 12: Temperaturni profil MMF svjetlovoda uz maksimalnu optičku snagu

Pojava SRS-a na kraju drugog svjetlovoda u kaskadi stvorila je velike probleme kod konačnog određivanja temperaturnog profila. Bolja mjerna preciznost ostvarena je kod nižih snaga, osobito u području drugog svjetlovoda kaskade. Uz optičku snagu lasera

$$P_0 = 9 \text{ W} \tag{5.8}$$

dobiven je puno čišći temperaturni profil prikazan slikom 13.



Slika 13: Temperaturni profil MMF svjetlovoda uz nižu optičku snagu

Ipak, u odnosu na mjerenje na SMF vlaknu, očekivalo se i još veće povećanje SNR-a. Probleme prilikom korištenja MMF vlakna može izazvati sprega između SMF vlakna, koje se nalazi na izlazu lasera, i MMF vlakna. Također, upitna je i kvaliteta sprega u mjernoj grani sustava na ulazu u detektorske diode. Dio energije je time potencijalno izgubljen, ali i reflektiran u vlakno, čime se mogu potaknuti dodatne mjerne nesigurnosti.

Također, očekivane vršne snage prije pojave SRS-a su bile i veće. SRS se u mjerenjima najprije manifestirao na poziciji priključaka između dva vlakna te završetka kaskade mjernih svjetlovoda. Izvor problema je, stoga, neprikladno zaključenje sustava FC priključcima i FC zaključenjem. Bolji rezultati mogu se postići spajanjem (engl. *splicing*) optičkih vlakana te zaključenjem sa SC priključkom.

6. Zaključak

Ovim radom opisan je optički sustav za distribuirano mjerenje temperature. U uvodnom poglavlju istaknuta je trenutna pozicija svjetlovodne tehnike u telekomunikacijskom svijetu te je ukazano na rastuće zanimanje za korištenje svjetlovoda za druge namjene.

Izložena je teorijska podloga za proračun temperature iz mjerenja raspršnog signala nastalog kao posljedica Ramanovog nelinearnog efekta. Ramanov efekt fizikalno je opisan i dane su relacije koje su bitne za mjerni postupak. Opisane su metode pojednostavljivanja izraza s ciljem jednostavnije kalibracije mjernog sustava. Istaknute su razlike između mjerenja SMF i MMF svjetlovodima. Razmotrena su teorijska ograničenja cjelokupnog mjernog sustava.

U radu je opisan stvarni mjerni postav za distribuirano mjerenje temperature. Predstavljene su karakteristike pojedinih komponenti sustava i istaknuta ograničenja koja mogu utjecati na konačnu mjernu nesigurnost. Predložena su rješenja za prepreke koje teorijska osnova mjerne metode postavlja zahtjevima na točno poznavanje karakteristika mjernog svjetlovoda.

Razvojem algoritma za obradu podataka ispitane su različite metode uklanjanja bijelog šuma iz mjerenog signala. U radu je opisan i cjelokupni algoritam programa za dohvrat podataka s DAQ kartice. Razmotreni su parametri koji mogu utjecati na mjernu nesigurnost te su opisani algoritmi koji takve nesavršenosti mogu poništiti obradom dohvaćenih podataka.

Konačno, prikazani su rezultati mjerenja temperature implementiranim distribuiranim sustavom. Određene su najveće snage koje SMF, odnosno MMF svjetlovodi mogu prihvatiti prije pojave stimuliranog Ramanovog raspršenja. Određene su mjerne nesigurnosti dobivene uz zadane optičke snage. Raspravljani su dobiveni rezultati. Posebno su istaknuti uzroci nesavršenosti mjerenja te odstupanja od očekivanih promjena nakon zamjene svjetlovoda i povećanja optičke snage. Dobiveni rezultati pokazuju kako se uz relativno kratka vremena mjerenja temperature mogu dobiti velike preciznosti uz gustu prostornu razlučivost. Karakteristika cjelokupnog sustava može se dodatno unaprijediti spajanjem svjetlovoda te korištenjem detektorskih dioda većih širina pojasa.

Literatura

- [1] GN Nettest, *Understanding OTDR*, 2000.
- [2] Optical Telecommunications Lab, FEEI, Budapest University of Technology and Economics, »Measurement Guide, OTDR - Optical Time Domain Reflectometer,« 1997.
- [3] T. G. M. A. Farahani, »Spontaneous Raman Scattering in Optical Fibers with Modulated Probe Light for Distributed Temperature Raman Remote Sensing,« *Journal of Lightwave Technology*, svez. 17, br. 8, pp. 1379-1391, 1999.
- [4] E. Karamehmedović, »Incoherent Optical Frequency Domain Reflectometry for Distributed Thermal Sensing,« Technical University of Denmark, Lyngby, 2006.
- [5] Y. Gong, »Guideline for the design of a fiber optic distributed temperature and strain sensor,« *Optics Communications*, svez. 272, pp. 227-237, 2007.
- [6] T. S. M. Gonzáles-Herráez, »Nonlinear Effects In Optical Fibers,« u *Advanced Fibre Optics: Concepts And Technology*, Lausanne, Switzerland, EPFL Press, 2011.
- [7] L. Thévenaz, »Inelastic Scatterings And Applications To Distributed Sensing,« u *Advanced Fibre Optics: Concepts And Technology*, Lausanne, Switzerland, EPFL Press, 2011.
- [8] S. F. M. S. A. Signorini et al., »40 km long-range Raman-based distributed temperature sensor with meter-scale spatial resolution,« u *Conference on Optical Fiber Communication (OFC/NFOEC), collocated National Fiber Optic Engineers*, San Diego, California, 2010.
- [9] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 4. izdanje, Rochester, New York: John Wiley & Sons, 2010.
- [10] K. D. S. T. N. P.C. Wait, »A theoretical comparison of spontaneous Raman and Brillouin based fibre optic distributed temperature sensors,« *Optics Communications*, svez. 144, pp. 17-23, 1997.
- [11] M. B. T. K. Z. Šipuš, *Optički komunikacijski sustavi, Bilješke s predavanja*, Zagreb: Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu, 2016.

- [12] R. K. S. M. K. S. S. K. A. L. Chakraborty, »Compensation for temperature dependence of Stokes signal and dynamic self-calibration of a Raman distributed temperature sensor,« *Optics Communications*, svez. 274, pp. 396-402, 2007.
- [13] J. J. B.N. Sun et al., »Accuracy improvement of Raman distributed temperature sensors based on eliminating Rayleigh noise impact,« *Optics Communications*, svez. 306, pp. 117-120, 2013.
- [14] Optilab, *NPL-1550-37-R datasheet*, 2015.
- [15] Thorlabs, *PDA10CS(-EC) InGaAs Switchable Gain Detector - User Guide*, 2017.
- [16] A. Singh, »Adaptive Noise Cancellation,« Netaji Subhas Institute of Technology, 1997.
- [17] National Instruments, »Least Mean Square (LMS) Adaptive Filter,« [Mrežno]. URL: <http://www.ni.com/example/31220/en/>. [Pristupljeno 27. svibnja 2017].
- [18] National Instruments, »Least Mean Squares (LMS) Algorithms (Adaptive Filter Toolkit),« [Mrežno]. URL: http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/372357A-01/lvaftconcepts/aft_lms_algorithms/. [Pristupljeno 27 svibnja 2017].

Sažetak

Dominik Barbarić, Distribuirani svjetlovodni senzorski sustav za mjerenje temperature

Opisana je metoda distribuiranog mjerenja temperature u optičkom vlaknu. Sustav je baziran na metodi optičke reflektometrije u vremenskoj domeni, pri čemu se promatra raspršno Ramanovo zračenje čiji intenzitet ovisi o temperaturi. Izložena je teorijska osnova mjerne metode. Izrađen je mjerni postav za mjerenje temperature u visokoj prostornoj i temperaturnoj razlučivosti. Implementirano je programsko rješenje za poništavanje šuma u mjerenom signalu. Usporedbom mjerenja jednomodnim i višemodnim svjetlovodom predstavljena je karakteristika sustava u oba slučaja. Raspravljena su ograničenja te mogućnosti povećanja razlučivosti i smanjenja mjerne nesigurnosti sustava.

Ključne riječi: Distribuirani senzorski sustav, Temperaturni senzor, Optička reflektometrija, Ramanovo nelinearno raspršenje, Adaptivno filtriranje

Summary

Dominik Barbarić, Distributed fibre-optical temperature sensing system

A distributed temperature measurement method in optical fibre is described. The system is based on the optical time-domain reflectometry method, in which temperature-dependant Raman backscattered signal is observed. Theory behind the measurement method is presented. A measurement setup with high spatial and temperature resolution is built. A software solution for noise cancellation in the measured signal is implemented. Comparative measurements with single-mode and multi-mode fibres are conducted, and system characteristics in both cases are presented. Limitations and possibilities of resolution improvement and decreasing measurement uncertainties are discussed.

Keywords: Distributed sensor system, Temperature sensor, Optical reflectometry, Raman non-linear scattering, Adaptive filtering