

Reflektometerski nadzor dostopovnega pasivnega optičnega omrežja

Aljoša Kalanj, Boštjan Batagelj

Laboratorij za sevanje in optiko, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani
E-pošta: aljosa20@gmail.com

Reflectometric Monitoring of an Access Passive Optical Network

Abstract. This paper presents the latest technology in the field of optical-communications monitoring, on the basis of which it is possible to have continuous, fast, efficient and, above all, cost-effective network monitoring of the physical layer in access passive optical networks. It is a network technology with embedded optical reflectometry, where measurements can be carried out from the central office and from the user side. In both cases it is necessary for the monitoring to be carried out smoothly and without interruptions in the transmission of useful data traffic. An exhaustive review of embedded monitoring systems is given, considering both Optical Time-Division Reflectometry (OTDR) and Optical Frequency-Division Reflectometry (OFDR).

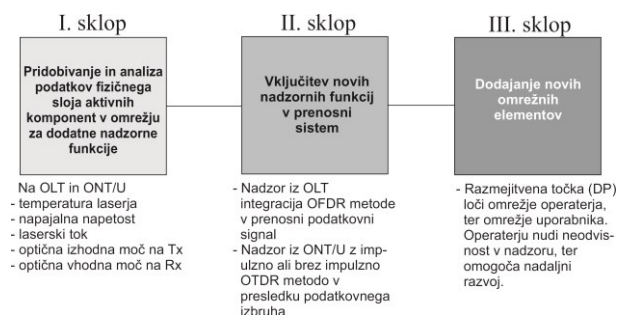
1 Uvod

Čeprav so optična omrežja zelo robustna in odporna na več zunanjih dejavnikov, kot so vlažnost, elektromagnetne motnje in presluh med posameznimi vlakni, še vedno lahko pride do številnih napak, kot so nenamenske prekinitve med gradbenimi deli, kontaktna nepravilnost, umazani konektorji, poškodovani razcepniki, stisnjena ali zdrobljena vlakna, preoster krivinski zavoj vlakna ali poškodovan optični omrežni terminal. Težave na dostopovnem pasivnem optičnem omrežju (angl. Passive Optical Network – PON) [1] lahko nastanejo praktično povsod, zaradi česar jih je težko in zamudno lokalizirati, kar pa lahko potencialno vpliva na več sto fiksnih ali celo mobilnih uporabnikov [2].

Današnje rešitve nadzora temeljijo na sistemih s pomočjo optičnega reflektometra v časovnem prostoru (angl. Optical Time-Division Reflectometry – OTDR), kar zahteva prenosno opremo ali daljinsko testno opremo, ki je ročno ali avtomatsko povezana v optično omrežje. Tovrstne rešitve poleg zahtevane dodatne opreme potrebujejo tudi dodaten čas za namestitev, kar je oboje v nasprotju s pričakovanimi operativno vzdrževalnimi in investicijskimi stroški operaterjev. V praktičnih izvedbah običajno zunanji OTDR nadzoruje več PON-ov, kar zahteva uporabo nastavljivega optičnega stikala, to pa vodi v dodatne naložbe ter operativno zahtevnost, večjo porabo energije ter več prostora v centralni enoti. [1] Druga možnost je, da se meritve tipično izvajajo na zahtevo, po tem, ko se v omrežju že pojavi napaka. Takšna izvedba meritev

običajno vodi v prekinitev zveze, čeprav so v nekaterih primerih meritve izvedene na drugi valovni dolžini od tiste, ki se uporablja za prenos podatkov.

Kakršno koli zmanjšanje operativnih stroškov pozitivno vpliva na uvajanje optičnih omrežji, zato je nujno potrebna rešitev po cenovno učinkovitejšem nadzoru. V splošnem vgradne nadzorne koncepte razdelimo na tri sklope, ki jih prikazuje slika 1. V prvi sklop sodi nadzor s pomočjo pridobljenih podatkov iz fizičnega sloja, ki so na voljo v vsakem PON. V drugi sklop sodijo rešitve, ki zahtevajo vključevanje novih nadzornih funkcij na osnovi časovne ali frekvenčne reflektometrije. V tretji sklop pa sodijo rešitve, pri katerih je potrebno v PON dodajati nove pasivne ali aktivne elemente.



Slika 1. Način integracije nadzornega sistema v prenosni sistem pasivnega optičnega omrežja

V tem članku se pozornost posveča prav ideji vgradnje funkcije optične reflektometrije na optičnem oddajnem modulu v sam prenosni signal, kjer bi operater lahko stalno spremljal stanje fizičnega sloja. Glavni cilj učinkovitega ter ekonomsko upravičenega nadzornega sistema je izvedba vseh meritev brez prekinitve telekomunikacijske zveze in brez potrebnih dodatnih merilne opreme [3], kar posledično pomeni, da za opravljanje meritev ni potrebno nobeno dodatno prerazporejanje usposobljenega osebja ali dodatnega izobraževanja.

2 Nadzor PON z vgrajeno reflektometrijo

Glavna prednost vgrajenih nadzornih sistemov je oddajanje nadzornega signala na isti valovni dolžino kot poteka komunikacijski promet. Za zagotovitev boljših rezultatov meritve se v najboljšem primeru le-te opravlja iz obeh strani vlakna. Iz centrale, od kjer podatki odtekajo konstanto brez prekinitve, se pri oddanem signalu uporabi metodo moduliranega sinusnega signala. Iz uporabniške strani pa se meritve

opravi v vmesnem času med oddajanjem podatkovnega signala, saj se v tej smeri podatki prenašajo v časovnih presledkih s t.i. podatkovnimi izbruhi. Vse merilne funkcije so vgrajene v oddajniku oz. oddajnem modulu. Tovrstna rešitev je cenovno zelo ugodna, saj je za njeno delovanje potrebna majhna nadgradnja in le nekaj dodatnih opto-električnih komponent. [4]

2.1 Vgrajen reflektometer pri uporabniku

V primeru vgrajenega reflektometra pri uporabnikih od koder prihajajo izbruhi prometa (angl. burst mode system), se uporabi metodo enega testnega impulza, kot je prikazano na Sliki 2. Tovrsten primer prometa je odhodni podatkovni tok iz uporabniških ONU. Nadzor poteka v času premorov med podatkovnim tokom. Tovrstna tehnika nadzora se od tehnike nadzora z OTDR-merilnikom razlikuje le v uporabljeni valovni dolžini, ki je v tem primeru enaka valovni dolžini podatkovnega signala.

V primeru nadzora s pomočjo metode enega impulza se za izvor impulza uporablja laserska dioda v ONU. OTDR odziv na impulz poteka od vlakna preko signalnega delilnika do fotodiode. Merilni proces in analizo sprejetega signala iz vlakna nadzoruje elektronika, ki hkrati skrbi za sinhronizacijo OTDR meritev in podatkovnega protokola.



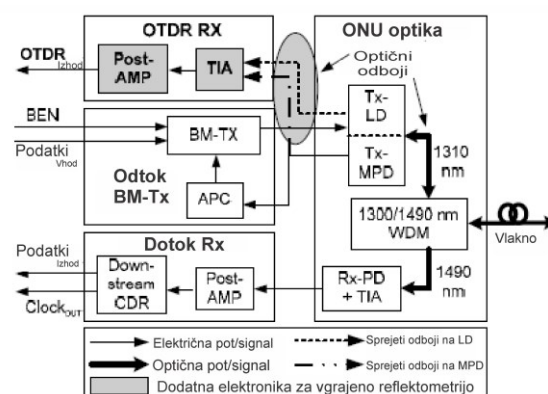
Slika 2: Nadzor z enim OTDR impulzom

Ker je bistvo vgradnega nadzornega sistema v PON stroškovna učinkovitost, in kjer je v zelo razvejanem sistemu P2MP veliko ONU-jev, je zelo pomembno, da tudi na ONU strani porabimo čim večji del komponent, ki so že na voljo. Tako zaradi načina oddajanja v podatkovnih izbruhih v odtočni smeri lahko lasersko diodo ter laserski gonilnik ponovno uporabimo za funkcionalnost časovne reflektometrije. [6] Kljub temu sta potrebna dodaten smerni sklopnik in dodaten fotodetektor.

Na Sliki 3 je predstavljen ONU z vgrajeno OTDR merilno tehniko. Strojna oprema, ki je potrebna za OTDR, je popolnoma elektronska in je integrirana znotraj oddajnika podatkovnih izbruhov (BM-Tx), kar pomeni, da se za to ne potrebuje nobenih dodatnih optičnih elementov, saj se za oddajo in sprejem nadzornega signala koristijo že obstoječi laserji in fotodiode.

Uporabljene optične komponente, kot so laser Fabry-Perot (FP) z vgrajeno nadzorno foto-diodo (angl. monitor photo-diode – MPD), ali laser z pokončno resonančno votlino (angl. Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers – VCSEL), so stroškovno učinkovite komponente v PON ONU, kar pomeni, da se je na ta način mogoče izogniti dragim dodatnim optičnim komponentam z integriranim optičnim izolatorjem.

Med prenosom podatkov LD oddaja svetlobni izbruh in MPD nadzira oddano optično moč, ki služi za avtomatsko krmiljenje moči (angl. Automatic Power Control – APC). V času mirovanja oz. v časovnem oknu med podatkovnimi izbruhi, lahko LD oddaja OTDR testni signal, nakar pa se lahko LD in/ali MPD obnaša kot OTDR sprejemnik, ki sprejme odbit tesni signal. ONU za odtočno smer 1310 nm uporablja oddajnik BM-Tx, za dotočno 1490 nm pa sprejemnik (Rx) ter 1310 nm OTDR Rx. Iz Slike 3 je razvidno, da za takšno izvedbo OTDR-ja ni potrebna dodatna optična strojna oprema. Potrebni je le nekaj dodatnih elektronskih komponent.



Slika 3: PON ONU oddajnik z vgrajenim OTDR [5]

Če slučajno nimamo primernih časovnih oken za izvedbo OTDR impulzne metode, lahko z opisano opremo opravimo OTDR meritve v ozadju z obdelavo optičnih odbojev, ki jih povzročajo podatkovni izbruhi. V tem primeru LD-MPD sprejme optični odboj takoj po končanem oddajanju podatkovnega izbruha. Matematična analiza in simulacije so pokazale, da je mogoče odziv na impulz z arbitrarno širino pretvoriti v standardni časovni odziv, če je končna stopnja OTDR-ja zadostno linearna. [7] Na ta način je mogoče izvesti OTDR meritve brez vsiljevanja merilnega impulza. Tako imenovani OTDR brez dodatnega oddajnega signala nikakor ne vpliva na odtočni promet in s tem tudi ne prizadene učinkovitosti omrežja. [6]

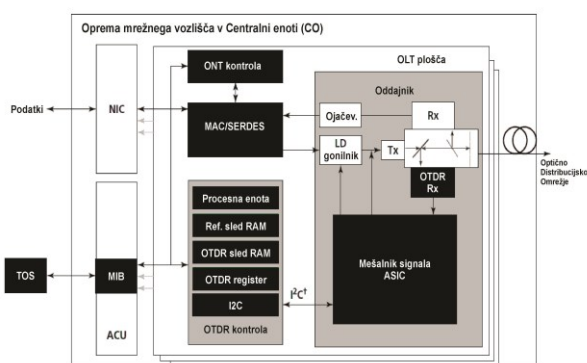
Ne glede na izbiro metode pa je potrebno vgrajen ONU OTDR vključiti v prenosni sistem, če se ga želi nadzorovati iz OLT strani, kar je povezano z sistemom upravljanja.

V primeru, da je v odtočni smeri uporabljena klasična impulzna OTDR metoda, kjer je impulzni signal umeščen med t.i. podatkovna izbruha upoštevajoč časovne zahteve podatkovnega prometa, je potreben čas čakanja pred pošiljanjem OTDR impulza, z namenom da se izognemo interferenci med povratnim sipanim signalom od zadnjega poslanega podatkovnega paketa in OTDR impulzom. Čakalna doba je odvisna od dolžine vlakna in je določena glede na najdlje oddaljen ONT v PON-u. Enak čas je potrebno upoštevati pred pošiljanjem naslednjega podatkovnega izbruha. Povratno sipana svetloba od OTDR impulza mora biti v

celoti sprejeta, preden se pošlje nov podatkovni paket v OLT.

2.2 Vgrajen reflektometer v centrali

Za namene celovitega nadzora PON je potrebno integrirati reflektometriško meritveno proceduro tudi v centralo oziroma OLT. Slika 4 prikazuje bistvene sestavine dele mrežnega vozlišča ter nove komponente, ki so potrebne za vgradnjo optičnega nadzornega sistema. Nove komponente in komponente, ki jih je potrebno modificirati, so obarvane črno. Optični modul v oddajniku mora biti razširjen z dodatnim reflektometriškim sprejemnikom in optično spojko. Poleg tega je v oddajni modul potrebno dodati nekatere analogne in digitalne elektronske funkcije. Mešalnik signala ASIC vključuje vse funkcije, ki so potrebne za ustvarjanje merilnega signala za pridobivanje povratnega sipanega signala iz ODN, ter je sposoben izvesti manjšo predobdelavo merilnih podatkov. Na OLT plošči se bodo izvajale še dodatne analize podatkov za odkrivanje degradacij na optičnih vlaknih. Dodatne programske prilagoditve so potrebne tudi v programskem modulu ter v nadzornem sistemu.



Slika 4. Integracija vgradnega nadzornega sistema v centralo postajo [8]

OLT je v osnovi zadolžen za dotočni promet, ki se prenaša k uporabnikom neprekinjeno [1], pri čemer ni dovoljena nobena prekinitev prometa. V primeru vgradnje reлектometriškega nadzornega sistema v OLT se uporabi tehnika s preletom frekvenčno spremenljivega sinusnega signala (angl. swept sine wave technique). Amplituda sinusnega signala znaša približno 5% nivoja amplitude podatkovnega signala. Sinusni signal modulira podatkovni signal in se s tem doda na vrhu podatkovnega signala, kot je to prikazano na Sliki 5. Ker je amplituda merilnega signala le 5% amplitude podatkovnega signala, tovrstna modulacija povzroči minimalne interference s prenosnim signalom. [7]



Slika 5. Nadzor z moduliranim podatkovnim signalom

Informacije, potrebne za nadzor, so pridobljene iz frekvenčne odvisnosti povratnega signala. Tehnika s preletom sinusnega vala temelji na meritvah v frekvenčnem prostoru. Pri tem se uporablja optični reflektometer v frekvenčnem prostoru (angl. Optical Frequency Domain Reflectometer – OFDR). Oddani podatkovni signal se amplitudno modulira s sinusnim signalom spremenljive frekvenca. Za izvor modulatorskega sinusnega signala se uporablja preletni generator, ki daje na svojem izhodu visokofrekvenčni signal, katerega frekvenca linearno narašča. Ker so merjeni odboji zakasneni, njihova modulatorska frekvenca zaostaja za trenutno frekvenco preletnega generatorja. S pomočjo mešalnika, ki opravlja na vhodnih signalih matematično operacijo množenja, se dobi razliko med frekvenco preletnega generatorja in frekvenco odboja. S pomočjo nizkoprepustnega sita se izloči neželene produkte množenja na izhodu mešalnika. Tako obdelan izhodni signal je vsota kosinusnih signalov različnih amplitud in frekvenc. Pri tem amplitude natančno ustrezajo kvadratu velikosti optičnih odbojnosti, frekvenca pa so v linearni zvezi z zakasnitvami posameznih odbojev. Spektralne podatke pridobljene po sinusni metodi je potrebno preoblikovati v časovno domeno, kar se stori z uporabo Fourierjevega transformacijskega algoritma.

S sinusno metodo dobljena merilna sled je zelo podobna tisti, ki je izvedena s pomočjo impulzne metode. Lokacija in slabljenje optičnih elementov je v obeh primerih enaka. Naklon krivulje slabljenja pa je drugačen, ker so meritve opravljene na različnih valovnih dolžinah in sicer na 1310 nm ter 1490 nm, kar pa so valovne dolžine, kjer se prenaša promet v odtočni in dotočni smeri.

Tabela 1 povzema vrednosti parametrov za omenjeni vgrajeni reflektometrični metodi, ki sta prilagojeni za tipične PON sisteme.

OTDR parametr	Tipična vrednost	Opomba
Impulzna metoda		
Dolžina impulza	300 ns	30 m prostorska ločljivost
Čas čakanja pred imp.	200 μ s	20 km dolžina povezave
Čas merjenja	200 μ s	20 km dolžina povezave
Sinusna metoda		
Start in korak frekven.	5 kHz	20 km dolžina povezave
Stop frekvenca	10 MHz	10 m prostorska ločljivost
Indeks modulacije	5%	
Integracijski čas na preletno frekvenco	10 ms	100 Hz

Tabela 1: Običajna konfiguracija parametrov za OTDR meritve [8]

Dolžina impulza 300 ns je dober kompromis med zadostno prostorsko ločljivostjo in sprejemljivimi časom merjenja. Po istih kriterijih so izbrani parametri sinusnega modulatorskega signala za začetno frekvenco, frekvenčni korak in končno frekvenco.

Značilne vrednosti slabljenja vlaken ter izgube na priključkih se po obeh omenjenih metodah odkrijejo. Pridobljeni merilni rezultati so podobni, vendar je točnost rezultatov omejena, saj ima vgrajeni OTDR za delovanje v naprej določene parametre (moč, širina

impulza, frekvenca vzorčenja), ki ga omejujejo, v primerjavi s splošno uveljavljenimi OTDR-ji. Zavedati se je potrebno, da je nadzor z vgrajeno reflektometrijo namenjen predvsem odkrivanju relativnih sprememb v daljšem časovnem obdobju, ne pa merjenju absolutnih vrednosti.

Dodatna analiza rezultatov meritev je pokazala učinkovitosti metode vgrajene reflektometrije, kar lahko vidimo v Tabeli 2.

Parametere uspešnosti	Sinusna metoda	Impulzna metoda
Prostorska ločljivost	10 m	10 m
Amplitudna ločljivost	0,3 dB	0,3 dB
Dinamično območje	15 dB	15 dB
Mrtva cona	30 m	30 m
Čas zaznavanja 3 dB dogodka	10 s	1 min
Čas zaznavanja 0,3 dB dogodka	15 min	90 min

Tabela 3: Specifikacije zmogljivosti sistema z vgrajeno reflektometrijo [8]

Visoko slabljenje na omrežju je mogoče takoj zaznati. Že v nekaj sekundah se lahko zazna 3 dB spremembe v slabljenju. Zaznavanje manjših zdrsov in slabljenja za približno 0,3 dB pa zahteva opravljanje bolj sofisticirane analize. Potrebno manj šumno OTDR sled je mogoče doseči s povprečenjem večjega števila meritev. V tem primeru je čas merjenja v območju nekaj minut, kar še vedno zadostuje za uspešno zaznavo manjšega odstopanja slabljenja v omrežju, saj do njih prihaja v okviru dni, tednov ali celo mesecev. To so sicer tipične vrednosti na podlagi podanih parametrov, ki pa jih je možno še izboljšati s spremembami parametrov merjenja.

Dolžinska ločljivost se lahko poveča z zmanjšanjem širine impulza za impulzni OTDR ali s povečanjem zgornje mejne frekvence za sinusni OFDR, kar pa poveča čas merjenja. Različni časi meritev so posledica omejitev za merjenje z impulznim OTDR merilnikom v operativnem prenosnem sistemu. Predpostavlja se, da je meritev z impulznim OTDR mogoče opraviti le enkrat na sekundo.

3 Zaključek

Prednost vgrajenega optičnega nadzornega sistema je velika stroškovna učinkovitost, saj integracijo optičnih reflektometerskih meritev lahko vgradimo v vsak prenosni modul z zelo majhnimi stroški. V primeru idealnega nadzora, kjer je merjenje narejeno iz obeh strani omrežja, lahko nadzorujemo omrežja, ki imajo skupno izgubo (angl. loss budget) do 28 dB, kar je torej primerno za omrežja, kjer se uporablja podatkovne laserje vsaj razreda B+.

Najpreprostejša izvedba celotnega nadzora je, da se skupno vlakno nadzira iz OLT strani in posamezne veje iz ONT strani. Skupno vlakno je sicer mogoče

nadzorovati iz obeh strani, vendar je to odvisno od delilnega razmerja razcepnika, ki pri večjih delilnih razmerjih zahteva večjo dinamiko vgrajenega merilnika, kar za sabo povleče dražjo merilno opremo.

Prednost vgrajene reflektometrijske metode je tudi v tem, da meritve potekajo pri natančno isti valovni dolžini, kjer poteka tudi podatkovni promet, zaradi česar so meritve bolj uporabne. Poleg tega je prosta rezervirana valovna dolžina, ki je namenjena kasnejšemu testiranju z zunanjo opremo. Prosto valovno dolžino pa se lahko v bodoče uporabi tudi za druge namene, saj povpraševanje po pasovi širini hitro narašča.

Nadzorni sistemi z vgrajeno optično reflektometrijo v optičnih dostopovnih omrežjih ter mestnih omrežjih bodo operaterjem pomagali zmanjšati operativne stroške in izboljšati uporabniško izkušnjo. Izpadi omrežja bodo krajši, ker bodo degradacije omrežnih elementov zaznane prej, kot bi njihove težave vplivale na samo omrežje. Posledično bo uporabnik bolj zadovoljen, ker bodo izpadi zmanjšani na minimum.

Literatura

- [1] Boštjan Batagelj: Pasivno optično dostopovno omrežje s časovnim razvrščanjem, Ljubljana: Založba FE in FRI, 2011
- [2] Patryk J. Urban: Fiber Monitoring in Analog Mobile Fronthaul, ICTON, We.B2.2, 2016
- [3] Aljoša Kalanč: Nadzor pasivnega optičnega dostopovnega omrežja z vgrajeno optično reflektometrijo, diplomsko delo visokošolskega strokovnega študija. Ljubljana, 2016
- [4] Maged Abdullah Esmail, Habib Fathallah: Physical Layer Monitoring Techniques for TDM-Passive Optical Networks: A Survey, IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 15, no. 2, pp. 943-958, Second Quarter 2013
- [5] H. Schmuck, J. Hehmann, M. Straub, and T. Pfeiffer: Embedded OTDR Techniques for Cost-Efficient Fiber Monitoring in Optical Access Networks, ECOC, 2006
- [6] W. Chen, B. De Mulder, J. Vandewege and X.Z. Qiu: Embedded OTDR Monitoring of the Fiber Plant behind the PON Power Splitter, Proceedings Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter, 2006
- [7] B. De Mulder, W. Chen, J. Bauwelinck, J. Vandewege, and X.-Z. Qiu: Nonintrusive Fiber Monitoring of TDM Optical Networks, Journal of Lightwave Technology, vol. 25, no. 1, pp. 305-317, Jan. 2007.
- [8] J. Hehmann and T. Pfeiffer: New Monitoring Concepts for Optical Access Networks, Bell Labs Technical J., vol. 13, no. 1, pp. 183-198, 2008.