

PASYVIOSIOS MAGISTRALĖS PANAUDOJIMAS OPTINĖS PRIEIGOS TINKLUOSE

Rimantas Plėštys¹, Jurgita Dabulytė-Bagdonavičienė^{1, 2}, Gintaras Butkus¹

¹Kauno kolegija, ²Kauno technologijos universitetas

Anotacija. Interneto plėtra neatsiejama nuo informacijos perdavimo spartos didinimo tarp kompiuterių tinklo įrenginių, signalų perdavimui panaudojant optinius kabelius, kuriuose gali būti kelios dešimtys ar keli šimtai optinių skaidulų. Atskira optinė skaidula, tuo pačiu metu, gali būti perduodama skirtingų informacijos šaltinių informacija panaudojant signalus, kurių bangų ilgiai yra skirtingi. Tokias galimybes turinti tinklo infrastruktūra vadinama pasyviuoju optiniu tinklu. Naudojant atskirą optinę skaidulą jau dabar yra galimybė realiu laiku informacijos perdavimo spartas padidinti iki 10⁶ Gb/s lyginant su esamomis informacijos perdavimo spartomis 1 Gb/s. Didelių informacijos perdavimo spartų poreikis iškyla tarpusavyje apjungiant svarbius valstybės vidaus ar tarpvalstybinius tinklus. Atskiram interneto paslaugų vartotojui pakanka daug mažesnės informacijos perdavimo spartos. Naudojami optinės prieigos tinklai, kuriuose atskiro optinės skaidulos prijungiamos prie paslaugų vartotojų įrenginių, o pačios skaidulos tarpusavyje sujungiamos medžio principu: prie kamieno pirmiausia prijungiamos pirminės skaidulos šakos, toliau prie jų nutolusių galų prijungiamos antrinės skaidulos šakos ir taip toliau. Prijungimai atliekami panaudojant optinius daliklius. Tokio tinklo pagrindinė savybė – nuo kamieno pradžios iki skaidulų nutolusių galų atstumai dažniausiai yra palyginti nedideli (iki kelių kilometrų) ir tokiose linijose optinių signalų slopinimai skiriasi nedaug (iki kelių dB). Taip sudaryti tinklai vadinami FTTx (angl. *Fiber To The x*). Darbe iširta tinklo konfigūracija, kurioje vartotojų įrenginiai nuosekliai gali būti prijungti prie tos pačios optinės skaidulos, kuri pavadinta magistrale. Tokios magistralinės skaidulos ilgis gali siekti keliasdešimt kilometrų. Šiuo atveju nuo linijos pradžios iki atskirų vartotojų įrenginių galimi skirtingi optinės linijos ilgiai ir jose signalų slopinimai gali būti skirtingi (iki 30 dB). Optinių signalų slopinimų suvienodinimui, kiekvienoje vartotojo įrenginio prijungimo prie magistralės vietoje, turi būti panaudotas tinkamų parametru optinio signalo daliklis. Pateikiama prie magistralės prijungtų optinių daliklių parametru skaičiavimo metodika. Rasta pasyviojo optinio tinklo aprėpties priklausomybė nuo magistralės daliklių skaičiaus.

Reikšminiai žodžiai: optinės prieigos tinklai, pasyvusis optinis magistralinis tinklas, FTTH, G-PON.

Įvadas

Tyrimo aktualumas. Interneto plėtra neatsiejama nuo informacijos perdavimo spartos didinimo tarp kompiuterių tinklo įrenginių signalų perdavimui panaudojant optines skaidulas. Jomis jau dabar informacija perduodama šimtus gigabitų per sekundę sparta. Panaudojant skirtingų bangų ilgių signalų optinio sutankinimo technologijas informacijos perdavimo spartą galima padidinti dar kelias dešimtis kartų (DeSanti Claudio ir kt., 2020).

Kompiuterių tinklai yra sudaryti iš pasyviųjų ir aktyviųjų tinklo elementų. Pasyvieji tinklo elementai – tai varinių laidų arba optinių skaidulų kabeliai. Aktyvieji tinklo elementai – tai tokie tinklo įrenginiai, kurie siunčia arba priima informaciją naudodami elektrinius signalus arba optinio diapazono signalus.

Pasyvusis optinis tinklas (*Passive Optical Network* – PON) tai toks tinklas, kuriame prie vienos optinės skaidulos prijungti pasyvieji tinklo elementai – optiniai dalikliai – aktyvių tinklo įrenginių siunčiamus signalus paskirsto tarp tinklo galinių vartotojų medžio principu (Kazawa ir kt., 2008). Tinklo elementai yra ilgaamžiai. Tokio tinklo daugumos elementų vidutinis laikas iki gedimo (*Mean Time to Failure* – MTTF) – daugiau negu 100 metų (International Telecommunication Union (toliau – ITU), 2017; Fulldomus, 2021).

Tinklo elementai sugenda tik tada, kada jie yra fiziškai paveikiami.

Pastaruosiu metu pasyviųjų optinių tinklų technologijos dažnai taikomos vieno miesto rajono ar vienos nedidelės gyvenvietės internetinių paslaugų vartotojų prijungimui prie interneto (Hussien, ir kt., 2018). Tokių tinklų optinių kabelių ilgiai neviršija kelių kilometrų, todėl iš centrinio tinklo įrenginio iki vartotojų perduodamų signalų galų skirtumai paprastai nebūna didesni kaip 1 dB. Šiuo atveju skirtingiems vartotojams skirtingais bangų ilgiais ta pačia optine skaidula perduodamų signalų atskyrimas yra nesudėtingas. Tokių tinklų projektavimas ir įgyvendinimas jau yra standartizuoti (ITU, 2014; ITU, 2021).

Problema. Jungiant į bendrą tinklą gyvenviečių, išsidėsčiusių išilgai optinių kabelinių trasų, vartotojus, interneto projektuotojams dažnai iškyla klausimas, kaip efektyviai panaudoti esamas optines linijas, jas pritaikant žymiai didesnio skaičiaus vartotojų įjungimui į tinklą. Problema yra ta, kad informacijos perdavimo atstumai nuo tinklo centrinio įrenginio iki gyvenviečių vartotojų gali labai skirtis ir priimamų signalų stiprumai bus labai skirtingi. Tokiu atveju stipresnieji signalai „užgoš“ silpnesnius ir signalų atskyrimas ir teisingas priėmimas taps sunkiai įgyvendinamas. Pasyviųjų optinių tinklų projektavimo eigoje taikoma įprasta „optika iki objekto x“ (*Fiber To The x* – FTTx) metodika netinka projektuojant pasyviuosius

optinius magistralinius tinklus, nes neužtikrina leistinų optinių signalų galių skirtumų optinėse linijose. Projektuojant pasyviuosius optinius magistralinius tinklus turi būti atliekami kruopštūs pasyviųjų tinklo elementų parametrų matematiniai paskaičiavimai.

Darbo tikslas: ištirti pasyviosios optinės magistralės taikymo optinės prieigos tinkluose ypatybes ir nustatyti pasyviųjų tinklo elementų parametrų įtaką optinio signalo stiprumui prieigos taškuose.

Tyrimo uždaviniai:

1. suformuluoti pasyviojo optinio magistralinio tinklo elementams keliamus reikalavimus;
2. sudaryti optinio tinklo pasyviųjų elementų parametrų skaičiavimo metodiką;
3. nustatyti pasyviojo optinio tinklo aprėpties priklausomybę nuo tinklo optinių linijų ilgio ir optinių daliklių skaičiaus.

Tyrimo objektas. Tiriamas PON tinklas, skirtas skirtingais atstumais išsidėsčiusių vartotojų prijungimui prie tinklo centrinio mazgo.

Tyrimo metodas. Tyrimai atlikti panaudojant matematinis skaičiavimus, įvertinančius signalų galių pokyčius tinklo pasyviuose elementuose ir optinėse linijose.

Pasyviojo optinio tinklo ypatumai

Pasyvaus optinio tinklo technologija yra paremta optinių skaidulų, optinių daliklių bei optinių multiplekserių/demultiplekserių (*Optical Multiplexer/ Demultiplexer* – OM/OD) taikymu interneto vartotojų prijungimui prie centrinio tinklo mazgo (ITU, 2021b).

Optinio diapazono bangų ilgiai

Optinė skaidula yra ypatingai aukšto skaidrumo stiklo gija, įgalinanti perduoti 1÷10 mW galios šviesos signalus bangų ilgių diapazone nuo 850 nm iki 1625 nm. Informacijos perdavimui iki kelių dešimčių kilometrų atstumu dažniausiai panaudojamas siauresnis optinių bangų ilgių diapazonas nuo 1271 nm iki 1611 nm (ITU, 2003). Šiame diapazone yra naudojamos 18 skirtingų ilgių bangos, skirtos taikyti grubaus bangų sutankinimo (*Coarse Wavelength Division Multiplexing* – CWDM) technologiją. CWDM atveju, bangų ilgiai surandami pagal formulę $\lambda_n = 1271nm + n \cdot 20nm$, kai $n = \underline{0,17}$. Visas diapazonas sąlyginai suskirstytas į trumpesnį bangos ilgio diapazoną (1271–1411 nm.) ir ilgesnį bangos ilgio diapazoną (1471–1611 nm). Pirmasis diapazonas dažnai sutrumpintai vadinamas 1310 nm diapazonu, o antrasis – 1550 nm diapazonu. Tarp šių diapazonų

yra 2 bangų ilgiai 1431 nm ir 1451 nm, kurie papildomai naudojami tuomet, kai viena optinė skaidula naudojama perduoti 18 skirtingų bangų ilgių signalus viena kryptimi, o kita optinė skaidula – kita kryptimi. Tuo atveju, kai abipusiam ryšiui naudojama ta pati optinė skaidula, bangos ilgiai 1431 nm ir 1451 nm nenaudojami. CWDM technologija dažniausiai naudojama skirstomuose optiniuose tinkluose arba neilgose optinėse magistralėse, kuriose informacijos perdavimo sparta neviršija keliasdešimt Gb/s.

Labai didelės spartos ir didelio informacijos perdavimo nuotolio, siekiančio kelis šimtus kilometrų, technologija, vadinama tankaus bangų sutankinimo (*Dense Wavelength Division Multiplexing* – DWDM) technologija (ITU, 2020). Naudojamas siauresnis bangų ilgių diapazonas nuo 1530,0413 nm iki 1624,8914 nm, kuriame standartizuoti reikalavimai 96 skirtingų bangų ilgių kanalams. Ši technologija yra gerokai brangesnė ir jos įdiegimui reikia labai aukštos kvalifikacijos specialistų.

PON tinkluose naudojamos dvi optinės prieigos technologijų modifikacijos: G-PON (*Gigabit-Capable Passive Optical Network*) ir NG-PON2 (40-Gigabit-Capable Passive Optical Networks).

G-PON technologijos tinkle naudojami du bangų ilgiai: 1490 nm – informacijos perdavimui iš tinklo vartotojui ir 1310 nm – informacijos perdavimui iš vartotojo į tinklą. Didžiausia informacijos perdavimo sparta iš tinklo yra 2,48832 Gb/s, o į tinklą – 1,24416 Gb/s. Gali būti suvienodintos informacijos perdavimo spartos – 2,48832 Gb/s iš tinklo ir į tinklą (ITU, 2014).

NG-PON2 technologijos tinkle naudojami du bangų ilgių ruožai: nuo 1524 nm iki 1544 nm į tinklo kryptį ir nuo 1596 nm iki 1602 nm iš tinklo. Bendras optinių bangų skaičius yra 8. Informacijos perdavimo spartos abejomis kryptimis vienodos – 9,95328 Gb/s. (ITU, 2021a).

Projektuojant PON tinklą būtina įvertinti tinklo paskirtį (Yeh Chien-Hung ir kt., 2017). Jeigu tinklas naudojamas signalų perdavimui tik viena kryptimi (pvz., televizinių signalų perdavimui), tada pakanka vienos optinės skaidulos. Jeigu tinklas naudojamas internetiniam ryšiui, tada būtina užtikrinti dvikryptį perdavimą. Net ir šiuo atveju galima pasirinkti ar naudoti vieną optinę skaidulą ar dvi.

PON tinkle reikia įvertinti, kad optinėje skaiduloje signalo silpimas priklauso nuo bangos ilgio. 1310 nm bangų diapazone signalo silpimas vieno kilometro ilgio linijoje siekia 0,5 dB/km, kai tuo tarpu 1550 nm diapazone silpimas siekia 0,2 dB/km. Tai reiškia, kad perdavimo nuotolis 1310 nm diapazone yra 2,5 karto mažesnis, negu 1550 nm diapazone.

Optiniai dalikliai

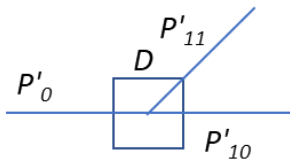
PON tinklo panaudojimo efektyvumui padidinti viena optine skaidula perduodamo signalo paskirstymui į atskiras kryptis paprastai naudojami dalikliai, kurie signalą atšakoja į 2^n krypčių ($n = 1,8$). Gali būti pagaminti optiniai dalikliai, atšakojantys optinį signalą į bet kokį krypčių skaičių. Krypčių skaičius paprastai neviršija 256.

PON tinkle labai dažnai naudojami 1x2 tipo dalikliai, kurie signalą paskirsto tik į dvi kryptis. Tokiame daliklyje atšakotų signalų galių pasiskirstymas gali kisti nuo 50%:50% iki 99%:1%. Daugelio krypčių dalikliuose signalas paprastai paskirstomas visomis kryptimis vienodomis dalimis. Norint signalų galias paskirstyti kitaip, sumontuojami dvikrypčių daliklių rinkiniai.

Naudojant vienos krypties perdavimą naudojami vienkrypčiai dalikliai, paskirstantys iš vienos krypties gaunamą signalą į atskiras išeinančias kryptis. Tuo atveju, kai dvikrypčiame perdavime naudojama viena skaidula, dažnai naudojami dvikrypčiai dalikliai. Tokie dalikliai paprastai turi po dvi kryptis iš vienos pusės ir kitos pusės.

Optinio daliklio parametrai

Optinio daliklio (D) konstrukcija aprašyta pagal Serecunova ir kt., 2022. Paprasčiausio optinio daliklio (1x2), kuris turi vieną įvadą ir du išvadás, schema parodyta 1 pav. Toks daliklis yra dvipusio veikimo ir gali būti panaudotas signalo išskirstymui į dvi kryptis ir tuo pačiu metu dviejų signalų apjungimui į bendrą srautą. Svarbu, kad išskirstomo signalo ir apjungiamų signalų bangų ilgiai būtų skirtingi ir taip pat nesutaptų laike apjungiami signalai.



1 pav. Optinio daliklio ekvivalentinė schema:

P'_0 – magistralinio signalo galia daliklio įėjime; P'_{10} – magistralinio signalo galia daliklio išėjime; P'_{11} – atšakoto signalo galia

Optinio daliklio parametrai aprašomi signalo galių santykiais, išreikštais decibelais (dB) (ITU, 1996; ITU, 2019). Pagrindiniai daliklio parametrai yra:

- a) magistralinio signalo galios nuostoliai:

$$E_0 = EL = -10 \lg \frac{P'_{10} + P'_{11}}{P'_0} \text{ dB}, \quad (1)$$

- b) magistralinio signalo slopinimas (2) ir atšakoto signalo slopinimas (3):

$$C_{10} = CR_{10} = -10 \lg \frac{P'_{10}}{P'_{10} + P'_{11}} \text{ dB}, \quad (2)$$

$$C_{11} = CR_{11} = -10 \lg \frac{P'_{11}}{P'_{10} + P'_{11}} \text{ dB}, \quad (3)$$

- c) signalo atskyrimo nuostoliai vienoje ir kitoje kryptyje:

$$IL_{10} = -10 \lg \frac{P'_{10}}{P'_0} \text{ dB}, \quad (4)$$

$$IL_{11} = -10 \lg \frac{P'_{11}}{P'_0} \text{ dB}. \quad (5)$$

Daliklyje atšakotų signalų galių santykis gali būti išreikštas procentais:

$$C_1[\%] = R[\%]: Q[\%], \quad (6)$$

čia:

$$R[\%] = 100 \cdot 10^{-\frac{C_{10}}{10}}, \quad (7)$$

$$Q[\%] = 100 \cdot 10^{-\frac{C_{11}}{10}}. \quad (8)$$

Tuo atveju, kai daliklis paskirsto signalą į N krypčių (1xN) (2 pav.), tokio daliklio parametrai aprašomi šiomis priklausomybėmis:

- a) signalo galios nuostoliais:

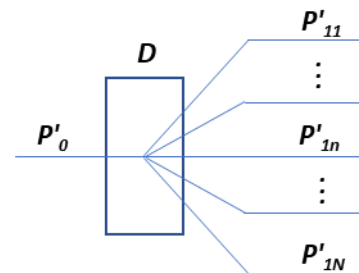
$$E_0 = EL = -10 \lg \frac{\sum_{n=1}^N P'_{1n}}{P'_0} \text{ dB}, \quad (9)$$

- b) atšakojimo slopinimais kiekvienoje kryptyje:

$$C_{1n} = -10 \lg \frac{P'_{1n}}{\sum_{n=1}^N P'_{1n}} \text{ dB}, \quad (10)$$

- c) signalo atskyrimo nuostoliais kiekvienoje kryptyje:

$$IL_{1n} = -10 \lg \frac{P'_{1n}}{P'_0} \text{ dB}. \quad (11)$$



2 pav. Daugiakrypčio daliklio schema

Formulėse (9)-(11) esantys dydžiai išreikšti signalo slopinimo vienetais dB.

Kiekvieno atšakoto n -ojo signalo santykinė galia, gali būti išreikšta procentais:

$$R_{1n}[\%] = 100 \cdot \frac{P'_{1n}}{\sum_{n=1}^N P'_{1n}},$$

$$(12)$$

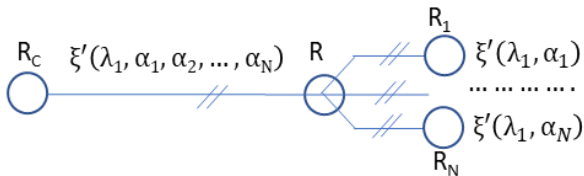
$$n = \underline{1, N}.$$

Signalų galios nuostolius dalikliuose lemia daliklių gamybos technologija. Tinkamos parametrų C_{10} ir C_{11} skaitinės reikšmės paskaičiuojamos magistralės projektavimo metu. Signalų atskyrimo nuostoliai IL_{10} ir IL_{11} nurodomi daliklių tiekėjų dokumentacijoje.

Optinio tinklo struktūros

Aktyviojo optinio tinklo struktūra

Dažniausiai sutinkama aktyviojo optinio tinklo struktūra pavaizduota 3 pav.



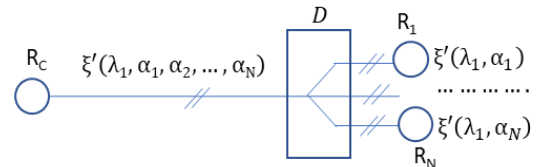
3 pav. Aktyviojo optinio magistralinio tinklo struktūra

Tinklą sudaro centrinis maršrutizatorius R_C , kuris dvilaidė optine magistraline linija sujungtas su nutolusiu magistraliniu maršrutizatoriumi R . Optinėje linijoje tarp šių dviejų maršrutizatorių perduodamas vieno bangos ilgio λ_1 signalas ($\xi'(\lambda_1, \{\alpha_n, n = \underline{1, N}\})$), kuriame yra sutalpinti n vartotojų paketai ($n = \underline{1, N}$), perduodami sparta α_n . Visų vartotojų bendra informacijos perdavimo sparta $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_N$. Linijos gale esantis magistralinis maršrutizatorius R išskirsto bendrą signalą esančių paketų srautus pagal IP adresus ir suformuoja atskirus signalus $\xi'(\lambda_1, \alpha_1), \dots, \xi'(\lambda_1, \alpha_N)$, kurie patenka į atitinkamus galinius maršrutizatorius R_1, \dots, R_N . Paketų perdavimo sparta n -tojoje galinėje linijoje yra α_n . Maršrutizatoriais R_n gali būti ir Wi-Fi prieigos taškai. Tokiu būdu, prie kiekvienos optinės linijos kiekvieno galo yra prijungti aktyvieji tinklo įrenginiai ir toks tinklas vadinamas aktyviuoju optiniu tinklu.

Aktyvusis optinis tinklas turi esminį trūkumą – sugedus maršrutizatoriui arba nutrūkus maršrutizatoriaus elektriniam maitinimui magistralė nustoja funkcionuoti.

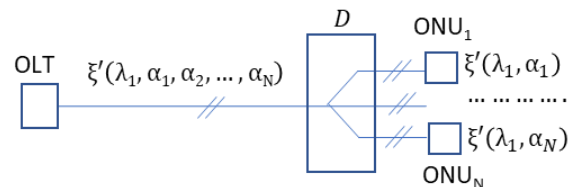
Supaprastinta pasyvioji optinio tinklo struktūra

Pasyviajame optiniame tinkle magistralinį maršrutizatorių R pakeičia daliklis D (4 pav.). Šiuo atveju daliklis D vieno bangos ilgio λ_1 signalą $\xi'(\lambda_1, \{\alpha_n, n = \underline{1, N}\})$ perduoda į visus galinius maršrutizatorius R_1, \dots, R_N . Informacijos perdavimo sparta kiekvienoje galinėje optinėje linijoje yra tokia pati kaip ir linijoje tarp maršrutizatoriaus R_C ir daliklio D . Šiuo atveju bendrą srautą esančius skirtingų vartotojų paketus paskirsto maršrutizatoriai R_1, \dots, R_N .



4 pav. Supaprastintas pasyvusis tinklas

Optinės prieigos tinkluose centrinis maršrutizatorius R_C ir galiniai maršrutizatoriai R_n atlieka daugiau funkcijų negu įprastiniai maršrutizatoriai. Jų veikimo principai detalai aprašyti (ITU, 2021a; ITU, 2014). Įprasta taikyti tokius pakeitimus: R_C keičiamas į OLT (*Optical Line Termination*), o R_n keičiamas į ONU (*Optical Network Unit*). Tinklo grafinis vaizdas keičiamas vaizdu, parodytu 5 pav.

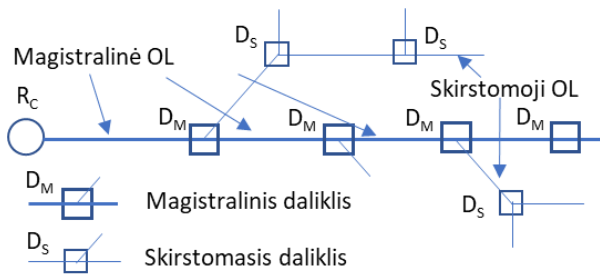


5 pav. Optinės prieigos tinklas

Svarbu pažymėti, kad tarp OLT ir ONU įrenginių yra tik iš pasyvių įrenginių sudarytas tinklas, kurio funkcionavimui nereikia elektros energijos. Net ir prijungus aktyviuosius galinius įrenginius toks veikiantis tinklas gali būti „tuščios eigos“ būsenoje, kurioje energijos poreikis yra labai mažas. Energijos poreikis padidėja tik tuomet, kai yra siunčiami informaciniai signalai tarp galinių įrenginių (Garg Amit Kumar ir kt., 2020).

Apibendrinta pasyvioji optinė magistralė

Pasyviajame magistraliniame tinkle visada yra viena magistralinė optinė linija (OL), prie kurios magistralinių optinių daliklių D_M pagalba yra prijungtos skirstomosios OL. Savo ruožtu, prie skirstomųjų OL skirstomųjų optinių daliklių D_S pagalba gali būti prijungtos papildomos skirstomosios linijos (6 pav.).



6 pav. Pasyviojo optinio magistralinio tinklo struktūra

Bendras galimas magistralinių ir optinių daliklių skaičius (galinių vartotojų skaičius) priklauso nuo:

- numatomų naudoti aktyviųjų tinklo įrenginių dinaminio diapazono (leistino signalo slopinimo linijoje),
- pageidaujamo OL ilgio (leistino signalo vėlavimo),
- reikalingos informacinio signalo spartos kiekviename vartotojo įrenginyje (ONU),
- daliklių techninių parametrų (signalų galios paskirstymo nuostolių kiekviename iš daliklių).

Detaliau įvertinkime tokį atvejį kai optinėje linijoje nėra nei vieno daliklio. Tuo atveju, kada siunčiamo signalo galia lygi 1 mW, o kiekvieno optinio signalo imtuvo jautrumas yra 1 μW, leistiniais optinio signalo slopinimas linijoje yra 30 dB ($10 \lg \frac{1}{0,001}$). Dažniausiai signalo slopinimas 1 km ilgio linijoje yra artimas 0,2 dB/km. Tokiu būdu didžiausias optinės magistralės ilgis lygus $30/0,2=150$ km.

Tarkime, kad optinė linija labai trumpa ir signalo slopinimo joje galime nevertinti, o identiški optiniai dalikliai 1x2 sujungti nuosekliai. Kiekvieno daliklio įnešamas slopinimas $IL_{10} = IL_{11} = 3,3$ dB. Šiuo atveju didžiausias leistinas nuosekliai sujungtų daliklių skaičius optinėje linijoje nuo maršrutizatoriaus R_C iki prieigos taško lygus $30 \text{ dB}/3,3 \text{ dB} = 9,09 \approx 9$.

G-PON technologijoje leistina OL ilgį iki ONU lemia ne tik signalo nuostoliai, bet ir galima signalo delsa tarp OLT ir ONU. G-PON technologijoje numatytos trys leistini OL ilgių intervalai: nuo 0 km iki 20 km, nuo 20 km iki 40 km ir nuo 40 km iki 60 km. NG-PON2 technologijoje numatytas tik vienas OL ilgio intervalas (nuo 0 km iki 20 km), o didžiausia signalo delsa 100 μs.

Reikalinga informacijos perdavimo sparta priklauso nuo paslaugų rūšies. Internetinei televizijai pakanka 10 Mb/s spartos. Kitoms interneto paslaugoms reikia didesnės kaip 20 Mb/s spartos. G-PON technologijos atveju informacija iš tinklo keliauja bendra sparta 2,5 Gb/s. Čia numatytas didžiausias leistinas vartotojų, o tuo pačiu ir ONU įrenginių skaičius yra 128. Vienam vartotojui vidutiniškai tenka 20 Mb/s sparta.

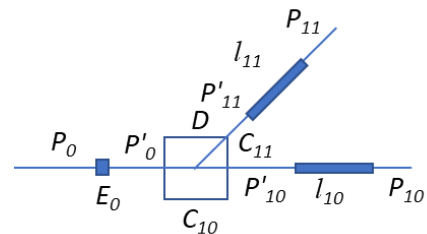
NG-PON2 technologijoje numatyta beveik 40 Gb/s sparta, o vartotojo įrenginių skaičius negali viršyti 1024. Šiuo atveju vienam vartotojui numatyta vidutinė 40 Mb/s sparta.

Magistralės daliklio parametrų aprašymas

Magistralinis daliklis paprastai signalą atšakoja į dvi kryptis, nors gali būti panaudoti ir daugiakrypčiai dalikliai. Viena kiekvieno magistralinio daliklio kryptis visada yra magistralinė, kitos kryptys vadinamos atšakomis.

Magistralės daliklyje signalo galios dalijimo santykis priklauso nuo signalo slopinimo optinėse linijose prijungtose prie daliklio. Tuo atveju, kai signalų slopinimai šiose linijose vienodi, magistralinis signalas daliklyje dalinamas į dvi lygias dalis. Tuo atveju, kai šie slopinimai skirtingi, jie turi būti įvertinti parenkant magistralinio daliklio signalų galių paskirstymo santykį.

Pasyviajame optiniame tinkle prie kiekvieno daliklio išvadų jungiamos reikiamo ilgio optinės skaidulos (7 pav.). Skaidula, kurios ilgis pažymėtas l_{10} jungia šį daliklį su kitu dalikliu. Skaidula, kurios ilgis pažymėtas l_{11} sujungia daliklį su tinklo įrenginiu (pvz. ONU). Į daliklį patenka optinis signalas, kurio galia P_0 . Daliklio nuostoliai E_0 apskaičiuojami pagal (1) formulę.



7 pav. Daliklio įjungimo į magistralę schema

Daliklio magistralinėje kryptyje signalo galia pažymėta P'_{10} , o skirstomoje kryptyje – P'_{11} . Daliklyje turi būti išpildyta sąlyga:

$$P_{10} = P_{11}. \quad (13)$$

Signalų slopinimo optinėse skaidulose reikšmės paprastai išreiškiamos decibelais [dB]:

$$S_{10} = \alpha_{10} \cdot l_{10} \text{ dB}, \quad (14)$$

$$S_{11} = \alpha_{11} \cdot l_{11} \text{ dB}, \quad (15)$$

čia l_{10} ir l_{11} – optinių skaidulų ilgiai [km], α_{10} ir α_{11} optinių skaidulų slopinimo koeficientai [dB/km]. Įvertinus signalų galias linijų tolimuose galuose P_{10} ir P_{11} , galioja priklausomybės:

$$P'_{11} = P_{11} 10^{\frac{S_{11}}{10}}, \quad (16)$$

$$P'_{10} = P_{10} 10^{\frac{S_{10}}{10}}, \quad (17)$$

$$P_0 = P'_0 10^{\frac{E_0}{10}}. \quad (18)$$

Magistralės daliklių parametų skaičiavimas

Žemiau pateiktas magistralinių daliklių parametų apskaičiavimas tinka G-PON ir NG-PON2 technologijoms. Jos numato, kad prie pasyviosios optinės magistralės atšakų jungiamų vartotojų įrenginių (ONU) signalų lygiai gali skirtis ne daugiau kaip 15 dB. Tolimesniuose skaičiavimuose parodysime kaip galima ženkliai sumažinti signalų lygių skirtumus.

Skaičiuojant signalų slopinimus S_{11} ir S_{10} , reikia įvertinti visų tinklo elementų, sudarančių kiekvieną liniją slopinimus. Didžiausią dalį sudaro signalo slopinimas optinėje skaiduloje, kuri galima apskaičiuoti naudojantis (13) ir (14) formulėmis. Parametų α_{10} ir α_{11} skaitinės reikšmės priklauso nuo optinio signalo bangos ilgio ir optinio kabelio tipo ir gali kisti ribose nuo 0,2 dB iki 0,35 dB. Didelę įtaką turi slopinimai optinių skaidulų jungtyse. Praktikoje kiekvienas daliklis į liniją gali būti jungiamas dviem būdais: daliklių optinius išvadus su optinėmis skaidulomis suvirinant elektros lanku arba išardomų optinių jungčių pasitelkimu. Pirmasis optinio daliklio įjungimo į magistralę būdas pasižymi mažais slopinimais sujungimo vietose (iki 0,05 dB). Be to sujungimo vieta yra labai patikima. Išardomose optinėse jungtyse signalų slopinimai gali siekti 0,5 dB ir daugiau. Sujungimai yra mažiau patikimi ir signalo slopinimai jose priklauso nuo aplinkos sąlygų (drėgmės kiekio, temperatūros).

Toliau pateiksime išraiškas, kuriomis galima paskaičiuoti tokias optinių daliklių parametų skaitines reikšmes, prie kurių suvienodinamos

atšakojamų optinių signalų galios kiekviename magistralės, fragmente.

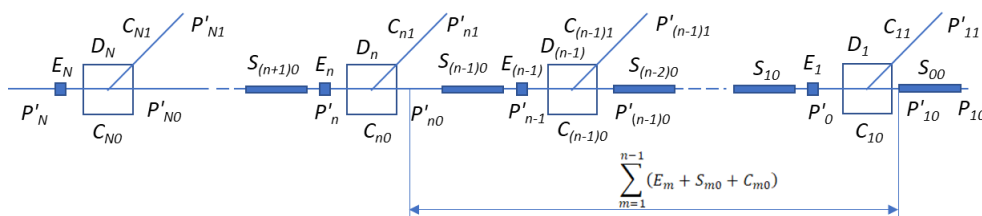
Tegul daliklyje būna išpildyta (13) sąlyga. Tam tikslui būtina įvertinti signalo slopinimus abejose optinėse linijose, prijungtose prie daliklio išvadų:

$$\begin{aligned} C_{10} &= -10 \lg \frac{P'_{10}}{P'_{10} + P'_{11}} = \\ &= -10 \lg \frac{P_{10} 10^{\frac{S_{10}}{10}}}{P_{10} 10^{\frac{S_{10}}{10}} + P_{11} 10^{\frac{S_{11}}{10}}} = \\ &= -10 \lg \frac{1}{1 + 10^{\frac{S_{11}}{10}} 10^{-\frac{S_{10}}{10}}} = \\ &= -10 \lg \frac{1}{1 + 10^{\frac{S_{11} - S_{10}}{10}}} \text{ dB}, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} C_{11} &= -10 \lg \frac{P'_{11}}{P'_{10} + P'_{11}} = \\ &= -10 \lg \frac{P_{11} 10^{\frac{S_{11}}{10}}}{P_{10} 10^{\frac{S_{10}}{10}} + P_{11} 10^{\frac{S_{11}}{10}}} = \\ &= -10 \lg \frac{1}{10^{\frac{S_{10}}{10}} 10^{-\frac{S_{11}}{10}} + 1} = \\ &= -10 \lg \frac{1}{1 + 10^{\frac{S_{10} - S_{11}}{10}}} \text{ dB}. \end{aligned} \quad (20)$$

Panagrinėkime magistralę, sudarytą iš N magistralės fragmentų (8 pav.). Daliklių parametų skaičiavimo patogumui, daliklių numeraciją atlikime mažėjančia tvarka ($N, N-1, \dots, 2, 1$). Tolimesniuose skaičiavimuose priimkime, kad kiekvienoje atšakoje linijos ilgis lygus nuliui ($P_{n1} = P'_{n1}$, $n = \underline{1}, N$), kiekvienos linijos slopinimuose įskaičiuoti ir jungčių slopinimai, o visose magistralės daliklių atšakose slopinimas P'_{n1} turi būti lygus slopinimui magistralės gale:

$$P'_{n1} = P_{10}, \quad n = \underline{1}, N. \quad (21)$$



8 pav. Magistralinio PON tinklo schema

Pirmiausia išreiškime galinio daliklio ($n = 1$) magistralinės krypties slopinimą:

$$C_{10} = -10 \lg \frac{P'_{10}}{P'_{10} + P'_{11}} =$$

$$= -10 \lg \frac{10^{\frac{S_{00}}{10}}}{10^{\frac{S_{00}}{10}} + 1} \text{ dB}, \quad (22)$$

čia S_{00} – magistralės galinės atkarpos slopinimas.

Analogiškai n -ojo tinklo fragmento, kai $n \geq 2$, magistralės krypties slopinimas:

$$C_{n0} = -10 \lg \frac{P'_{n0}}{P'_{n0} + P'_{n1}} = -10 \lg \frac{10^{\frac{S_{00} + \sum_{m=1}^{n-1} (E_m + S_{m0} + C_{m0})}{10}}}{10^{\frac{S_{00} + \sum_{m=1}^{n-1} (E_m + S_{m0} + C_{m0})}{10}} + 1} \text{ dB.} \quad (23)$$

Čia $E_m - m$ -ojo optinio daliklio galios nuostoliai, apskaičiuojami pagal (1) formulę.

Įvedus pažymėjimus:

$$A_m = E_m + S_{m0} + C_{m0}, \quad m = \underline{1, n}, \quad (24)$$

S_{m0} – magistralinės skaidulos kartu su jungtimis tarp n -ojo ir $n-1$ -ojo daliklio bendras slopinimas, išraišką (23), kai $n \geq 2$, gali būti perrašyta:

$$C_{n0} = -10 \lg \frac{P'_{n0}}{P'_{n0} + P'_{n1}} = -10 \lg \frac{10^{\frac{S_{00} + \sum_{m=1}^{n-1} A_m}{10}}}{10^{\frac{S_{00} + \sum_{m=1}^{n-1} A_m}{10}} + 1} \text{ dB.} \quad (25)$$

Atšakos n slopinimas C_{n1} , kai $n \geq 2$:

$$C_{n1} = -10 \lg \frac{P'_{n1}}{P'_{n0} + P'_{n1}} = -10 \lg \frac{1}{10^{\frac{S_{00} + \sum_{m=1}^{n-1} A_m}{10}} + 1} \text{ dB.} \quad (26)$$

Gautos išraiškos gali būti panaudotos projektuojant G-PON ir NG-PON2 optinės prieigos tinklus ir apskaičiuojant kiekvieno magistralinio daliklio optinių signalų galių paskirstymo santykius:

$$R[\%] = 100 \cdot 10^{-\frac{C_{n0}}{10}}, \quad (27)$$

$$Q[\%] = 100 \cdot 10^{-\frac{C_{n1}}{10}}. \quad (28)$$

Būtina pastabėti, kad

$$R[\%] + Q[\%] = 100[\%], \quad (29)$$

nes parametrai C_{n1} ir C_{n0} paskaičiuojami pagal išraiškas (2) ir (3), kurios nevertina signalo nuostolių dalikliuose.

Rezultatai

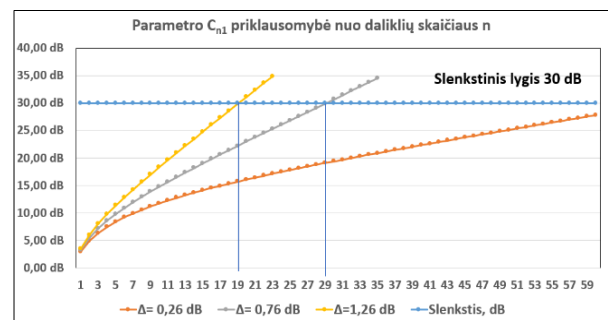
Gautos matematinės išraiškos panaudotos magistralės daliklių parametru C_{n0} ir C_{n1} skaitinių reikšmių priklausomybės nuo daliklių skaičiaus n prie skirtingų parametro $\Delta = E_m + S_{m0}$, $m = \underline{1, n}$ reikšmių nustatymui. Priklausomybės nustatytos trims atvejais.

Pirmas atvejis. Magistralė įrengiama pastate, todėl ji yra labai trumpa. Skaičiavimuose įvertinti tik pačio daliklio nuostoliai ($\Delta = E_m = 0,26 \text{ dB}$).

Antras atvejis. Magistralė įrengiama gyvenvietėje. Dalikliai sujungti vienodo ilgio skaidulomis, kurių slopinimas $0,5 \text{ dB}$ ($\Delta = E_m + S_{m0} = 0,26 + 0,5 = 0,76 \text{ dB}$).

Trečias atvejis. Magistralėje įrengiama užmiestyje. Dalikliai sujungti vienodo ilgio skaidulomis, kurių slopinimas $1,0 \text{ dB}$ ($\Delta = E_m + S_{m0} = 0,26 + 1,0 = 1,26 \text{ dB}$).

Magistralės daliklių atšakojimų slopinimų C_{n1} priklausomybė nuo daliklių skaičiaus prie skirtingų parametro $\Delta = E_m + S_{m0}$ reikšmių pavaizduota 9 pav. Didėjant daliklių skaičiui magistralėje parametro C_{n1} skaitinė reikšmė taip pat didėja.

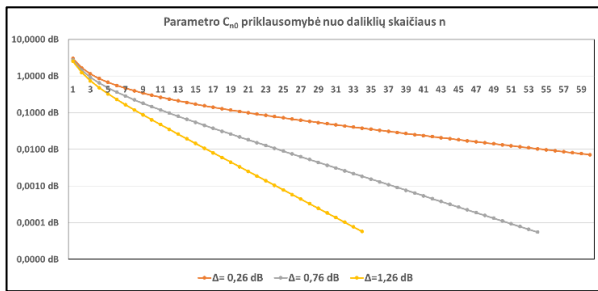


9 pav. Magistralės daliklių atšakojimo slopinimo C_{n1} priklausomybė nuo daliklių skaičiaus prie skirtingų parametro $\Delta = E_m + S_{m0}$ reikšmių

Pirmu atveju, kai $\Delta = 0,26 \text{ dB}$, parametro C_{n1} skaitinė reikšmė slenkstinės reikšmės nesiekia, jeigu $n \leq 60$. Antru atveju ji pasiekia slenkstinį lygį 30 dB prie $n = 29$ ($\Delta = 0,76 \text{ dB}$) ir trečiu atveju prie $n = 19$ ($\Delta = 1,26 \text{ dB}$). Antru atveju galimas linijos atkarpos su optiniais dalikliais slopinimas $(n-1) \times 0,5 = 28 \times 0,5 = 14 \text{ dB}$. Trečiuoju atveju linijos atkarpos su optiniais dalikliais slopinimas $(n-1) \times 1 = 18 \times 1 = 18 \text{ dB}$.

Magistralės daliklių atšakojimo slopinimo C_{n0} priklausomybė nuo daliklių skaičiaus pavaizduota 10 pav. Parametro C_{n0} skaitinė reikšmė yra palyginti maža ir didėjant daliklių skaičiui n ženkliai mažėja.

Tokia priklausomybė paaiškinama įvertinant, kad skaičiavimuose daliklių numeracija atlikta mažėjančia tvarka nuo pradžios į galą. Magistralė gali būti ilginama tik prijungiant naujus elementus magistralės pradžioje. Tam, kad išpildyti (21) sąlygą, atšakojimo slopinimas C_{n1} turi būti lygus visų elementų, esančių magistralės atkarpoje nuo daliklio D_{n1} iki magistralės pabaigos, slopinimų sumai.



10 pav. Magistralės šakotuvo atšakojimo slopinimo C_{n0} priklausomybė nuo daliklių skaičiaus prie skirtingų parametro $\Delta = E_m + S_{m0}$ reikšmių

Kuo ilgesnė magistralė ir daugiau daliklių, tuo didesnis bendras slopinimas atkarpoje nuo D_{n1} iki magistralės pabaigos ir didesnė parametro C_{n1} skaitinė reikšmė ir mažesnė parametro C_{n0} skaitinė reikšmė.

Išvados

1. Pasyviojo optinio tinklo magistralės, skirtos vartotojų įjungimui į internetą, daromos naudojant 1x2 tipo optinius daliklius, kurių panaudojimas įgalina suvienodinti optinių signalų stiprumus visuose magistralės prijungimo taškuose.
2. Į magistralę optiniai dalikliai jungiami taip, kad būtų kuo mažesnis atstumas tarp daliklio ir vartotojo. Įjungtų vartotojų skaičius gali būti didinamas jeigu šalia magistralės išsidėsčiusių vartotojų tankis yra didelis, kokybiškai atlikti optinių skaidulų sujungimai bei panaudoti

Literatūra

1. Kazawa, T., Kokubunji (JP); Ohira, M., Yokohama (JP); Yajima, Y., Fujisawa (JP). (2008). *Passive optical network system and operating method thereof*. Patent. United States Patent. <https://patentimages.storage.googleapis.com/29/75/ce/15ea43df956943/US7680414.pdf>.
2. Hussien, M. D., Mohamed, A. A., Hosni, M. I., Mokhtar, A. M., Youssef, M. M., Hassan, K. M. (2018). Optical Access Networks: a Comparison Study. *The International Conference on Electrical Engineering*, 11(11):1-12. https://www.researchgate.net/publication/333047904_optical_access_networks_a_comparison_study.
3. Yeh Chien-Hung, (Member, IEEE), Wang Bo-Yin, Hsu Wei-Hung, Liu Li-Hung, Ko Han-Shin. A Simple WDM-PON Architecture Together with Private Interconnected ONUs. *Digital Object Identifier*. 10.1109/ACCESS.2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3110729.
4. Serecunova, S., Seyringer, D., Uherek, F., & Seyringer, H. (2022). Design and Optimization of Optical Power Splitters for Optical Access Networks. *Optical and Quantum Electronics*, 54(6),

optiniai dalikliai, kuriuose signalo nuostoliai yra maži.

3. Magistralinių optinių daliklių parametrai paskaičiuojami įvertinant numatomą daliklių skaičių magistralėje, signalo slopinimą optinėse linijose ir signalo galios nuostolius kiekviename iš daliklių.
4. Signalų slopinimai magistralės atkarpose, jungiančiose gretimus daliklius, priklauso nuo vartotojų išsidėstymo šalia magistralės, naudojamo bangos ilgio bei signalo slopinimo daliklių įjungimo vietose. Signalų galios nuostolius dalikliuose lemia daliklių gamybos technologija.
5. Magistralės ilgį riboja du parametrai: signalo delsa linijoje, jungiančioje OLT su kiekvienu ONU ir optinių daliklių skaičius. Standarte numatyta didžiausia leistina signalo delsa kiekvienoje perdavimo kryptyje 100 μ s. Tai atitinka magistralės ilgį 20 km.
6. Magistralėje optinių daliklių skaičių riboja standartais nustatytas leistinas signalo slopinimas optinėje linijoje, jungiančioje OLT su kiekvienu ONU, signalų slopinimas optinėse linijų atkarpose, jungiančiose gretimus daliklius bei signalo galios nuostoliai pačiuose dalikliuose.
7. Esant dideliame vartotojų tankiui į magistralę įjungtų vartotojų skaičius gali būti padidintas 8 kartus G-PON technologiją pakeitus naujesne NG-PON2 technologija, atlikus tinkamą projektavimą bei kokybišką magistralės montavimą.

1-9.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11082-022-03620-z>.

5. DeSanti Claudio, Liang Du, Guarin Jhon, Bone Jason, Lam Cedric F. (2020). Super-PON: an Evolution for Access Networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, Vol. 12, No. 10.
6. <https://opg.optica.org/jocn/fulltext.cfm?uri=jocn-12-10-D66&id=432722>.
7. Garg Amit Kumar, Janyani Vijay, Batagelj Bostjan. (2020). Ring-based Latency-aware and Energy-efficient Hybrid WDM TDM-PON with ODN Interconnection Capability for Smart Cities. *Optical Fiber Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102242>.
8. International Telecommunication Union [ITU]. (2017). *Passive Optical Network Protection Considerations*. <https://www.itu.int>.
9. International Telecommunication Union [ITU]. (2003). *Spectral Grids for WDM Applications: CWDM*. (ITU-T, G694.2). <https://www.itu.int>.
10. International Telecommunication Union [ITU]. (2020). *Spectral Grids for WDM Applications:*

- DWDM Frequency Grid. (ITU-T, G.651,1).*
<https://www.itu.int>.
11. Fulldomus. (2021). *FD-HG8221C G-PON ONU Specifications 1*GE+1*FE+CATV+D/Band Wi-Fi+1*POT.* https://domusntw.com/wp-content/uploads/FD-HG8221C-G-PON-ONU_Datasheet.pdf.
 12. International Telecommunication Union [ITU]. (2014). *Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Transmission Convergence Layer Specification: (ITU-T, G.984.3.* <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.3-201401-I/en>.
 13. International Telecommunication Union [ITU]. (2021a). *40-Gigabit-capable Passive Optical Networks (NG-PON2): Transmission Convergence Layer Specification: (ITU-T, G.989.3).* <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989.3-202105-I/en>.
 14. International Telecommunication Union [ITU]. (2021b). *Characteristics of Optical Systems (ITU-T, G.680-G.699).* <https://www.itu.int/itu-t/recommendations/index.aspx?ser=G>.
 15. International Telecommunication Union [ITU]. (1996). *Transmission Characteristics of Optical Components (ITU-T, G.671).* <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.671-199611-S>.
 16. International Telecommunication Union [ITU]. (2019). *Transmission Characteristics of Optical Components and Subsystems (ITU-T, G.671).* <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=13994&lang=en>.

APPLICATION OF PASSIVE OPTICAL TRUNK IN ACCESS NETWORKS

Summary

The development of the Internet is inseparable from increasing the speed of information transmission between computer network devices using optical cables, which may contain several dozen or hundreds of optical fibres. A separate optical fibre can simultaneously transmit information from different information sources using signals with different wavelengths. A network infrastructure with such capabilities is called a Passive Optical Network. Using a separate optical fibre makes it possible to increase the real-time data transfer rates by millions of times compared to the existing data transfer rates. The need for high information transmission speeds arises when connecting important national or interstate networks. A much lower data transfer speed is sufficient for an individual user of Internet services. Literature sources describe optical access networks in which individual optical fibres are connected to the devices of service users, and the fibres themselves are interconnected according to the tree principle: primary fibre branches are first connected to the trunk, then secondary fibre branches are connected to their remote ends, and so on. Connections are made using optical splitters. The main feature of such a network is that the distances from the beginning of the trunk to the remote ends of the fibres are usually relatively small (up to a few kilometres), and the attenuation of optical signals in such lines differs little (up to a few dB). The networks created in such a way are called FTTx (Fibre To The x). The article investigates a network configuration in which user devices can be serially connected to the same optical fibre called a trunk. The length of such a trunk fibre can reach tens of kilometres. In this case, there can be different lengths of the optical line from the beginning of the line to the individual consumer devices, and the signal attenuations could also be different (up to 30 dB). To equalise optical signal attenuations, an optical signal splitter with appropriate parameters must be used at each point of connection of the user device to the trunk. The methodology for calculating the parameters of optical splitters connected to the trunk is presented. The functional dependence of the coverage of the passive optical network on the number of trunk splitters was found.

Keywords: optical access networks, passive optical backbone networks, FTTH, G-PON.

Informacija apie autorius

dr. Rimantas Plėštys. Kauno kolegijos Technologijų fakulteto Informatikos katedros docentas. Mokslinių tyrimų kryptys: kompiuterių tinklai, kibernetinė sauga.

El. pašto adresas: rimantas.plestys@go.kauko.lt

dr. Jurgita Dabulytė-Bagdonavičienė. Kauno kolegijos Technologijų fakulteto Informatikos katedros docentė, Kauno technologijos universiteto Matematikos ir gamtos mokslų fakulteto Taikomosios matematikos katedros docentė. Mokslinių tyrimų kryptys: taikomoji matematika, matematinis modeliavimas.

El. pašto adresas: jurgita.dabulyte@go.kauko.lt

Gintaras Butkus. Kauno kolegijos Technologijų fakulteto Informatikos katedros lektorius. Mokslinių tyrimų kryptys: kompiuterių tinklai, kibernetinė sauga.

El. pašto adresas: gintaras.butkus@go.kauko.lt