

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

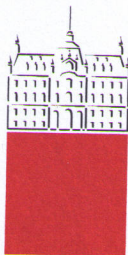
Jasna Škrbec

**ANALIZA MOŽNOSTI POVEZOVANJA RAČUNALNIŠKIH
OMREŽIJ S PROSTOZRAČNIMI OPTIČNIMI POVEZAVAMI**

DIPLOMSKO DELO NA UNIVERZITETNEM ŠTUDIJU

Mentor:izr. prof. dr. Miha Mraz
Somentor:izr. prof. dr. Uroš Lotrič

Ljubljana, marec 2010



Št. naloge: 01609/2009

Datum: 15.10.2009

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko izdaja naslednjo nalogo:

Kandidat: **JASNA ŠKRBEČ**

Naslov: **ANALIZA MOŽNOSTI POVEZOVANJA RAČUNALNIŠKIH OMREŽIJ S
PROSTOZRAČNIMI OPTIČNIMI POVEZAVAMI
ANALYSIS OF FREE SPACE OPTICAL COMPUTER NETWORKS**

Vrsta naloge: Diplomsko delo univerzitetnega študija

Tematika naloge:

Kandidatka naj v svojem delu opravi analizo možnosti povezovanja računalniških omrežij s prostozačnimi optičnimi povezavami. Pri tem naj predstavi osnove prostozačnih optičnih povezav in zmožljivostne ter zanesljivostne značilnosti tovrstne opreme, ki je danes na tržišču. V nadaljevanju naj kandidatka izvede študijo uporabe tovrstnega povezovanja glede na vremenske razmere v Ljubljani in glede na potrebe povezovanja posameznih članic UL.

Mentor:

prof. dr. Miha Mraz

Dekan:

prof. dr. Franc Solina

Somentor:

prof. dr. Uroš Lotrič



Original izdane teme

IZJAVA O AVTORSTVU

diplomskega dela

Spodaj podpisana **Jasna Škrbec**,

z vpisno številko **63030058**,

sem avtorica diplomskega dela z naslovom:

Analiza možnosti povezovanja računalniških omrežij s prostozačnimi optičnimi povezavami

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem diplomsko delo izdelala samostojno pod mentorstvom

izr. prof. dr. Miha Mraza

in somentorstvom

izr. prof. dr. Uroša Lotriča

- so elektronska oblika diplomskega dela, naslov (slov., angl.), povzetek (slov., angl.) ter ključne besede (slov., angl.) identični s tiskano obliko diplomskega dela
- soglašam z javno objavo elektronske oblike diplomskega dela v zbirki »Dela FRI«.

V Ljubljani, dne _____ Podpis avtorice: _____

Zahvala

Zahvaljujem se mentorju izr. prof. dr. Mihi Mrazu za vodenje, strokovno pomoč, nasvete pri izdelavi diplomske naloge in pomoč pri navezovanju povezav z ljudmi, ki so s svojimi viri razširili in oblikovali znanja, ki sem jih potrebovala za pisanje naloge. Zahvaljujem se tudi somentorju izr. prof. dr. Urošu Lotriču za strokovno pomoč in nasvete pri izdelavi in oblikovanju diplomske naloge.

Zahvaljujem se prof. Erichu Leitgebu za izkazano gostoljubnost med mojim obiskom na TU Graz. Prof. Leitgebu in njegovi skupini gre posebna zahvala za deljenje njihovega znanja in raziskav ter pomoč pri spoznavanju celotne tehnologije. Ogled njihovih postavitvev je bil zame izrednega pomena.

Zahvaljujem se g. Juretu Jermanu in g. Zorku Vičarju iz Agencije Republike Slovenije za okolje za posredovane podatke.

Kazalo

Povzetek	2
Abstract.....	3
1. Uvod	4
2. Tehnične osnove prostoziračne optike.....	7
2.1. Optična komunikacija.....	7
2.1.1. Sevalni kot	8
2.1.2 Oslabitev svetlobnega žarka	9
2.1.2.1. Sipanje svetlobe.....	11
2.1.2.2. Vidljivost	13
2.1.2.3. Tubulence	13
2.1.3. Valovna dolžina svetlobe in moč oddajnikov.....	14
2.1.3.1. Svetlobni spekter	14
2.1.3.2. Varnost	14
2.1.3.3. Komericalni faktor.....	15
2.1.3.4. Izbira valovne dolžine	16
2.1.4. Zanesljivost.....	16
2.2. Oddajnik	17
2.2.1. Diode LED.....	17
2.2.2. Laserji	18
2.2.2.1. Plinski laserji	18
2.2.2.2. Trdninski laserji.....	18
2.2.2.3. Polprevodniški laserji	19
2.2.3. Drugi oddajniki.....	20

2.3. Sprejemnik.....	20
2.3.1. Fotodiode PIN	21
2.3.2. Plazovna fotodioda	21
2.3.3. Detektorji za daljše valovne dolžine.....	21
2.4. Sprejemno – oddajne enote.....	21
2.5. Izbor sistema.....	24
3. Testne postavitve optičnih povezav na TU Graz.....	25
3.1. TU Graz	25
3.2. Opis lokacije	25
3.2.1. Postavitev 1	25
3.2.2. Postavitev 2	27
3.2.3. Postavitev 3	28
3.3. Testiranje	30
4. Študija izvedljivosti prostoziračne optične povezave med izbranimi lokacijami Univerze v Ljubljani	34
4.1. Prostorska umestitev stavb	35
4.2. Tehnične karakteristike.....	37
4.3. Vreme v Ljubljani.....	38
5. Sklepne ugotovitve	46
Seznam slik.....	48
Literatura	50

Seznam uporabljenih kratic in simbolov

APD – plazovna fotodioda (angl. *avalanche photo diode*)

ARNES – Akademska in raziskovalna mreža Slovenije

BER – enota, ki pove koliko odstotkov bitov se okvari po neki povezavi (angl. *bit error rate*)

COST – European Cooperation in Science and Tehnology

dB/m – decibel na meter, enota uporabljena za izražanje oslabitve povezave glede na razdaljo

dBm – decibel meter, enota za merjenje moči

FSO – prostozračna optična povezava (angl. *free space optics*)

HPLD bar – polprevodniška laserska palica (angl. *high power laser diode bar*)

IR – infrardeča

LED – svetleča dioda (angl. *light emitting diode*)

N-tip polprevodnika – polprevodnik s primesmi, ki povečajo koncentracijo prostih elektronov

P-tip polprevodnika – polprevodnik s primesmi, ki imajo povečano koncentracijo vrzeli

PIN dioda – polprevodniška dioda, ki ima med P in N tipom polprevodnika vrinjeno plast izolatorja

SatNex – Satellite Communications Network of Excellence

TU Graz – Tehniška univerza v Gradcu (nemš. *Technische Universität Graz*)

VCSEL – polprevodniški laser z vertikalno resonančno votlino (angl. *vertical cavity surface emitting diode*)

Povzetek

Diplomsko delo predstavlja tehnologijo prostozračne optične povezave. Hitra in zanesljiva komunikacija je v današnjem svetu zelo pomembna. Prostozračna optična povezava je le ena izmed možnosti komunikacije med dvema točkama. V sklopu prostozračne optike obstaja še veliko področij, kjer bi se dalo raziskovati in nadgraditi tehnologijo. V pričujočem delu so opisani osnovni gradniki, ki so potrebni, da se vzpostavi neka povezava. Opisane so sprejemno – oddajne enote in njihova vsebina od sprejemnikov do oddajnikov. Podan je tudi pregled dejavnikov, ki vplivajo neposredno na prenos. Pri tem so še posebno izpostavljeni vremenski vplivi, od katerih je zelo odvisna kakovost prenosa.

Večino predstavljene teorije so sami preizkusili člani skupine za optične komunikacije na TU Graz pod vodstvom prof. Ericha Leitgeba. Njihova najbolj pomembna testiranja so zajeta v treh sklopih, ki jih predstavljajo tri različne inštalacije. Inštalacije se med sabo razlikujejo v sprejemno – oddajnih enotah, dolžinah povezav, okolju postavitve in dodani opremi. Najpomembnejša med njimi je 2,7 km dolga povezava med univerzo in observatorijem. Na njej so bila opravljena vsa pomembnejša testiranja in se uporablja še sedaj za nadaljnje raziskave.

Vsa pridobljena znanja so uporabljena v študiji izvedljivosti postavitve prostozračne optične povezave med fakultetami v Ljubljani. Podane so fizične lastnosti posameznih stavb, ovire med njimi in vremenski vplivi na območju, kjer se stavbe nahajajo. Glede na trenutne trende so predlagane tudi tehnične karakteristike same postavitve in enot.

Ključne besede: prostozračna optična povezava, FSO, TU Graz, komunikacija.

Abstract

This thesis is presenting a technology of the free space optics. A fast and reliable communication is very important in today's world. The free space optical communication is just one among many possibilities of point to point communication; however it still has a lot of choices to research and upgrade in the future. Basic widgets, that are needed for establish a connection are described in this thesis. FSO units are shown with their transmitters and receivers. There is also a list of factors, which have a direct influence on a data transfer. Weather influences are in particular emphasized, because they mostly impact the quality of the data transfer.

Members of the Optical communications group of TU Graz tested the majority of the introduced theories. Their most important tests are captured in three groups, presented with three different installations. Differences between installations are in FSO units, length of connections, environment and added equipments. The most important among them is the 2.7 km long connection between the university and the observatory. On this connection they carried out the most important tests and it is still used for further research.

All gained knowledge is used in feasibility study of setting up free space optical connections between some faculties in Ljubljana. Physical characteristics of buildings, barriers between them and local weather conditions are gathered. Some technical features of the set up and FSO units considering current trends are also suggested.

Keywords: free space optics, FSO, TU Graz, communication.

1. Uvod

Sporazumevanje je temelj vseh človeških odnosov. Ljudje se sporazumevamo na več načinov; s kretnjami, z mimiko obraza, z govorom, s pisanjem, itd. V današnjem času so najpomembnejše moderne oblike sporazumevanj. Podatki se tako prenašajo elektronsko. Za elektronske komunikacije potrebujemo ustrezne sisteme, ki nam to omogočajo. Komunikacijski kanal se lahko ustvari v različnih medijih. Eden izmed prvih in verjetno še vedno najbolj razširjenih je kovinska žica, najpogosteje iz bakra. Vedno večje zahteve po hitrejših prenosih so vodile k odkritju optičnega vlakna. Tej ideji je sledila nova, ideja prostozračne optične komunikacije.

Če vzamemo samo prostozračno optiko brez dejavnikov iz okolja, je komunikacija identična optičnim povezavam po vlaknih. Na enem koncu obstaja oddajnik, ki odda žarek svetlobe, le ta potuje do neke točke na drugem koncu povezave, kjer se nahaja optični sprejemnik. Zaradi okoljskih dejavnikov se postavitve sistema prostozračne optike precej razlikuje od postavitve optične povezave prek vlaken. Te dejavnike je treba imeti v mislih, ko se odločimo analizirati osnovne gradnike sistemov prostozračne optike.

Preden se je prostozračna optika pojavila v komercialnih vodah, se je razvijala za vojaške namene in namene komuniciranja s sateliti. Vojska namreč potrebuje širokopasovne povezave, ki jih postavi začasno. Polaganje kablov torej ne pride v poštev, pri radijskih valovih pa je problem prisluškovanja. Prostozračna optična povezava je usmerjena in če bi kdo prisluškoval bi vedeli, ker sprejemnik ne bi dobival signala ali pa bi bil ta prešibek. Pri komunikacijah s sateliti so začeli raziskovati optične povezave, ker so želeli hitrejšo prenose. Začetki vseh teh raziskav segajo že dolgo nazaj v začetek 60-ih let prejšnjega stoletja. Kljub temu se za komercialne namene prostozračna optika pojavlja šele v zadnjih desetih letih. V teh letih so se na trgu pojavili tudi proizvajalci sprejemno – oddajnih enot, ki le te opremljajo z različnimi dodatki glede na potrebe trga.

Delovanje nekega sistema najlažje spoznamo, če poznamo njegove gradnike. V drugem poglavju tega dela so zato opisane tehnične osnove prostozračnih optičnih povezav. Podpoglavja so razdeljena glede na glavne osnovne gradnike, ki jih tak sistem zahteva. Prvo podpoglavje se loti nosilca prenosa, ki je v tem primeru svetloba oziroma bolj natančno svetlobni žarek. Svetlobni žarek je pravzaprav curek fotonov, ki jih optični oddajnik generira s pomočjo električne energije. V tem razdelku so opisane osnovne lastnosti svetlobnih žarkov, ki so primerni za nosilce podatkov. Podane so tudi nekatere prednosti in slabosti takih nosilcev. Poseben del je namenjen vplivu vremena na prenos. Ko žarek svetlobe, nosilec podatkov, potuje skozi medij zrak, mora pri tem premagovati večje in manjše delce v zraku. Najtežje se prebije čez gosto nabrane delce vode v primeru megle in zato je treba temu pojavu nameniti nekoliko več pozornosti.

V drugem podpoglavju je opisan prvi gradnik, ki se ga lahko fizično dotaknemo, to je oddajnik. Oddajnik je tisti, ki mora biti dovolj zmogljiv in hiter, da pošlje prave in nespremenjene podatke po komunikacijskem kanalu. Pravilna izbira oddajnika nam omogoča, da se fotoni od njega prebijejo do sprejemnika. Če bo oddajnik oddajal premalo fotonov, se bodo ti izgubili na poti, ko bodo zadevali v drobne ovire v zraku. Karakteristike oddajnika se izberejo, ko se ve, koliko bo dolga povezava in kakšno je okolje, v katerem bo nameščena. V toplejših krajih, kjer se megla ne pojavlja ali pa je zelo redka, se lahko uporabijo manj zmogljivi in cenejši oddajniki, kot v hladnejših mestih, kjer je močno onesnaženje zraka in megla del vsakdanjika. V tem podpoglavju so opisane osnovne lastnosti in najpogosteje uporabljeni oddajniki. Da se ustvari komunikacijski kanal, vsak oddajnik potrebuje sprejemnik, ki bo sprejemal poslane podatke. Več oddajnikov ima lahko skupni sprejemnik. Zmogljivost in lastnosti sprejemnika so ravno tako pomembne za kakovostno povezavo. Sprejemnik je v veliki meri odvisen od oddajnika. Če oddajnik oddaja svetlobo z neko valovno dolžino, mora sprejemnik biti najbolj občutljiv ravno v tistem območju. Tretje podpoglavje podaja pregled sprejemnikov, ki se najbolj pogosto uporabljajo v prostozačnih optičnih komunikacijah, in njihove lastnosti.

Sprejemnik in oddajnik sta zelo majhna osnovna gradnika, ki ju je treba umestiti v priročno ohišje, kjer ju ne bo moč poškodovati. Kot vse ostale elektronske naprave sama po sebi nista namenjena zunanji uporabi, kot tudi temu ni namenjeno vmesno vezje, ki ju povezuje z izhodi in vhodi ter nadzoruje. Zato je četrto podpoglavje namenjeno celotni sprejemno – oddajni enoti. Opisane so osnovne lastnosti enote kot zaokrožene celote. Poleg tega so poudarjeni nekateri problemi njene namestitve. Nič ne koristita izredno dober oddajnik in sprejemnik, če je enota postavljena neprimerno. V zadnjem, petem podpoglavju so načrtane nekatere možne smeri za načrtovanje celotnega sistema. Sistem je lahko povsem drugačen, če v ospredje damo tehnologijo ali če v ospredje postavimo strošek izdelave.

Tretje poglavje je namenjeno praktičnemu primeru postavitve, saj sama teorija nikoli ne pove toliko kot lep primer njene realne postavitve. Na TU Graz (Tehniška univerza v Gradcu, nemšč. *Technische Universität Graz*) se že slabih deset let ukvarjajo s to tehnologijo. Stestirali so že veliko različnih variacij postavitve in enot. Raziskovali so vplive različnih vremenskih pojavov in se spustili v tej smeri do take globine, da bi jih znali simulirati in tako lažje določili njihov vpliv. V podpoglavjih so zajete njihove tri najpomembnejše postavitve. Zadnje podpoglavje je namenjeno samemu testiranju in ugotovitvam, ki so jih izmerili sami. Predvsem se želim skoncentrirati na njihova zgodnejša testiranja, kjer so ugotavljali vplive megle, dežja, snega in turbulenc na njihovo najdaljšo in najzmogljivejšo povezavo. Vse opisane povezave so še sedaj žive in se uporabljajo za različna testiranja in nadaljnje raziskave.

Prostozačna optična komunikacija je torej že v komercialnih vodah in tudi na TU Graz imajo nekaj komercialnih enot. Bi se potemtakem dalo med določenimi stavbami fakultet v Ljubljani nadomestiti zastarelo in drago žično povezavo z novo tehnologijo? Študija

izvedljivosti take postavitve je predstavljena v četrtem poglavju. Po zgledu teorije in prakse iz prejšnjih dveh poglavij sem pregledala prostorske umestitve stavb, tehnične karakteristike in vremenske razmere. V podpoglavju o prostorskih umestitvah stavb sem poizkušala podati fizične lastnosti posameznih stavb in neodstranljive ovire med njimi. Naslednje podpoglavje govori o tehničnih karakteristikah, ki se kažejo kot najboljše v trenutni ponudbi na trgu in glede na preference, ki jih imajo različni uporabniki in raziskovalci, tudi raziskovalci na TU Graz. Zadnje podpoglavje raziskuje, kakšne težave bi znalo povzročati vreme, glede na podatke preteklih obdobj. Predvsem so važni podatki o megli in vidljivosti.

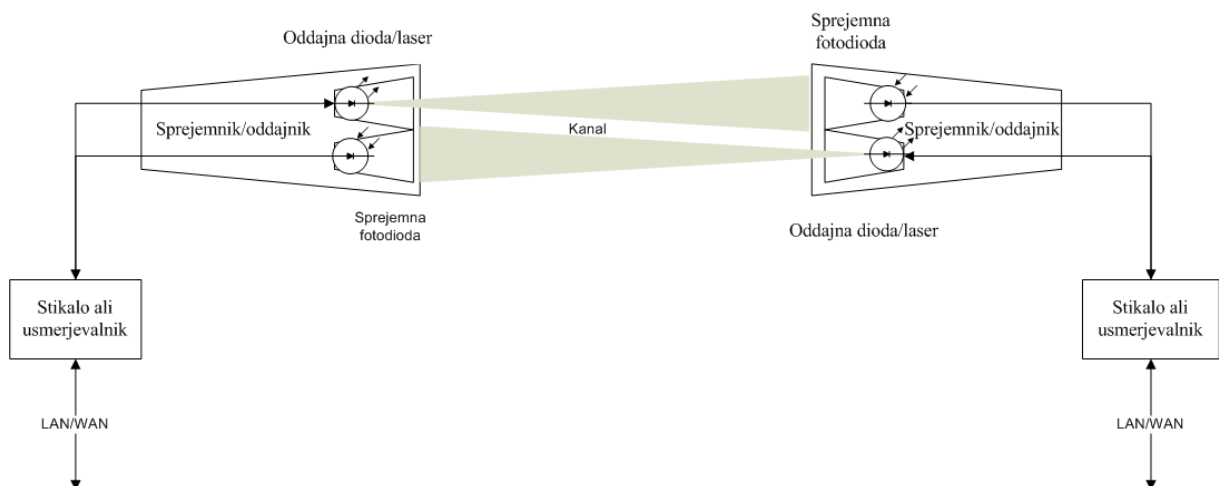
2. Tehnične osnove prostozračne optike

2.1. Optična komunikacija

Komunikacija med dvema točkama pomeni prenos podatkov med njima. Podatek sam po sebi nima fizične oblike, kar pomeni, da ga moramo za prenos preoblikovati v primerno obliko. Kakšno fizično obliko bo zavzel, je večinoma odvisno od tipa prenosa, le ta pa je odvisen od nosilca podatka, ki si ga izberemo za način komunikacije. Komunikacijski kanal je lahko enosmeren ali dvosmeren. Večinoma so bolj uporabni dvosmerni. Načeloma bi za vsako smer lahko bil svoj tip nosilca, vendar je zaradi optimizacije ponavadi bolje, da je v obe smeri enak. Za vzpostavitev komunikacijskega kanala torej potrebujemo nek nosilec, ki bo podatke prenesel od vira podatkov do prejemnika.

Nosilec podatkov pri komunikaciji FSO (angl. *Free Space Optics*) je svetloba oziroma žarek svetlobe, ki se prekinja in s tem ustvari zaporedje logičnih ničel in enic, ki tvorijo podatke. Če smo bolj natančni, so nosilci posamezni fotoni, ki nosijo energijo svetlobe in potujejo po kanalu od oddajnika oziroma generatorja fotonov do sprejemnika, ki jih sprejme in njihovo energijo spremeni v električno energijo.

Komunikacija FSO pri nas še nima ustaljenega prevoda. V nadaljevanju jo bom imenovala prostozračna optična komunikacija. Prevod prostozračna je najprimernejši, ker pri večini povezav svetloba potuje po zraku. Izjema so povezave v vesolju, kjer se svetloba širi po vakuumu. Splošna shema prostozračne optične komunikacije je prikazana na sliki 1.



Slika 1: Skica prostozračne optične povezave.

Komunikacija po omrežju FSO je teoretično zelo podobna prenosu podatkov po optičnih vlaknih, le da je medij drugačen; namesto optičnih vlaken je prenosni medij zrak ali vakuum. Prenosni medij je odvisen od tega ali sta oba konca povezave na Zemlji ali je kakšen v vesolju. V tem delu se bom nekoliko bolj osredotočila na povezave, kjer sta obe točki na Zemlji in je prenosni medij zrak oziroma nižje plasti atmosfere

Za vzpostavitev komunikacijskega kanala pri optičnih komunikacijah potrebujemo generator svetlobe oziroma fotonov. Med njegovimi karakteristikami so najpomembnejše sevalni kot, oslabitev svetlobnega žarka zaradi atmosferskih vplivov, valovna dolžina svetlobe in moč oddajnikov ter zanesljivost, ki bo podrobneje predstavljena v nadaljevanju.

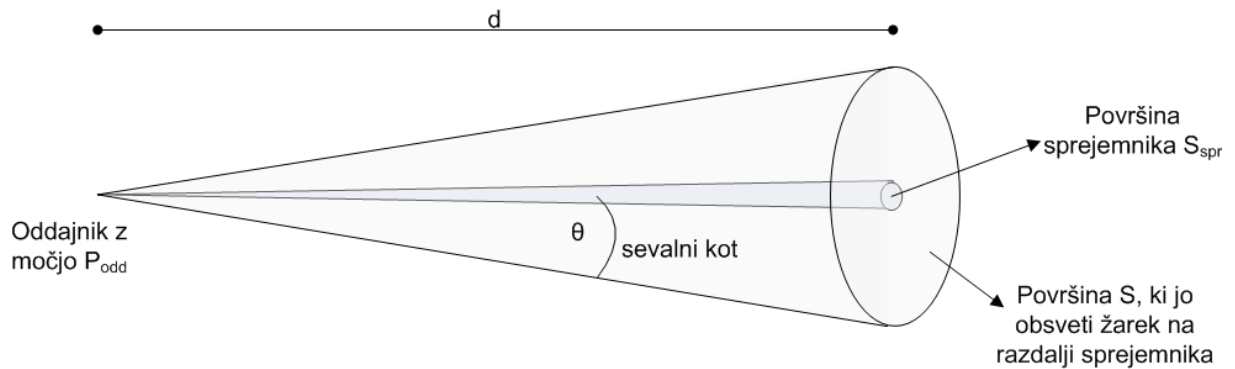
2.1.1. Sevalni kot

V teoriji se žarek vedno označi kot premico ali daljico, ki gre od oddajnika svetlobe in se nato odbija ali lomi ob določenih ovirah, torej je žarek teoretično vedno neskočno tanek in popolnoma raven. V praksi se nikoli ne da doseči popolnoma ozkega ravnega žarka. Pri karakteristikah oddajnikov je zato vedno podan še sevalni kot, ki nam pove, koliko je žarek širok na neki oddaljenosti od oddajnika svetlobe. Če bi želeli na neki oddaljenosti sprejeti vso energijo, ki jo odda oddajnik, bi morala biti sprejemna ploskev sprejemnika enako velika, kot osnovna ploskev navideznega stožca, ki si ga lahko zamislimo z vrhom v oddajniku in ki se v velikosti sevalnega kota širi proti sprejemniku. Ker tak sprejemnik v večini primerov ni realno izvedljiv, le-ta na drugem koncu komunikacijskega kanala pokriva majhno površino, ki jo obsveti žarek, kot je prikazano na sliki 2.

Če ne upoštevamo ovir, ki slabijo svetlobni žarek na njegovi poti, se gostota z razdaljo ohranja, vendar se porazdeli po površini, ki jo žarek obsveti na tej oddaljenosti. Manjši delež pokrite površine posledično pomeni sprejem manjšega dela svetlobnega toka, ki ga je oddal oddajnik. V tem primeru nastanejo velike izgube, ker se porabi veliko energije, da oddajnik proizvede dovolj energije, da oddaljeni sprejemnik sploh zazna poslani signal. Svetlobni tok P_{spr} , ki ga sprejemnik prejme v idealnih razmerah, na primer v vakumu, se ob predpostavki, da je sevalni kot θ majhnen, izračuna po enačbi

$$P_{spr} = \frac{S_{spr}}{(d \cdot \theta)^2} P_{odd} \quad , \quad (1)$$

v kateri spremenljivka d označuje razdaljo med oddajnikom in sprejemnikom, spremenljivka S_{spr} površino sprejemnika, spremenljivka θ sevalni kot oddajnika in P_{odd} moč oddajnika.



Slika 2: Ker je S_{spr} manjša od celotne S , je izkoristek oddajnikove moči slabši, kot če bi bil sevalni kot manjši.

2.1.2 Oslabitev svetlobnega žarka

Do oslabitve svetlobnega žarka na poti skozi atmosfero pride zaradi aerosolov, mešanih plinov, kot sta ogljikov dioksid in kisik, onesnaženja zraka z dušikovim dioksidom, vodne pare, ozona, na katerih se fotoni sipajo [1] in zaradi nekaterih drugih dejavnikov. Oslabitev oziroma absorpcijo svetlobe skozi neprozorno snov podaja absorpcijski ali Beer-Lambert-Bouguerjev zakon, po katerem svetlobni tok na poti skozi neprozorno snov eksponentno pojenja z dolžino poti. Ko v enačbo (1) dodamo vpliv absorpcije, dobimo osnovno enačbo prostozačne optične povezave [2]

$$P_{spr} = \frac{S_{spr}}{(\theta \cdot d)^2} P_{odd} e^{-\alpha \cdot d} \quad , \quad (2)$$

v kateri je slabitev svetlobnega toka zaradi atmosferskih vplivov določena z absorpcijskim koeficientom α . Enačba (2) nam pove, koliko oddanega svetlobnega toka pride od oddajnika do sprejemnika.

Oslabitev svetlobnega toka se pri prostozačni optiki podaja v decibelih (dB), kot relativno razmerje med sprejetim in oddanim svetlobnim tokom v logaritmskem merilu,

$$R_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_{spr}}{P_{odd}} \quad . \quad (3)$$

Analogno se v dB/m podajajo tudi absorpcijski koeficienti. Če enačbo (2), v kateri privzamemo, da ima ulomek vrednost ena, primerjamo z enačbo (3), v kateri oslabitev R_{db} nadomestimo z $-a \cdot d$, dobimo zvezo

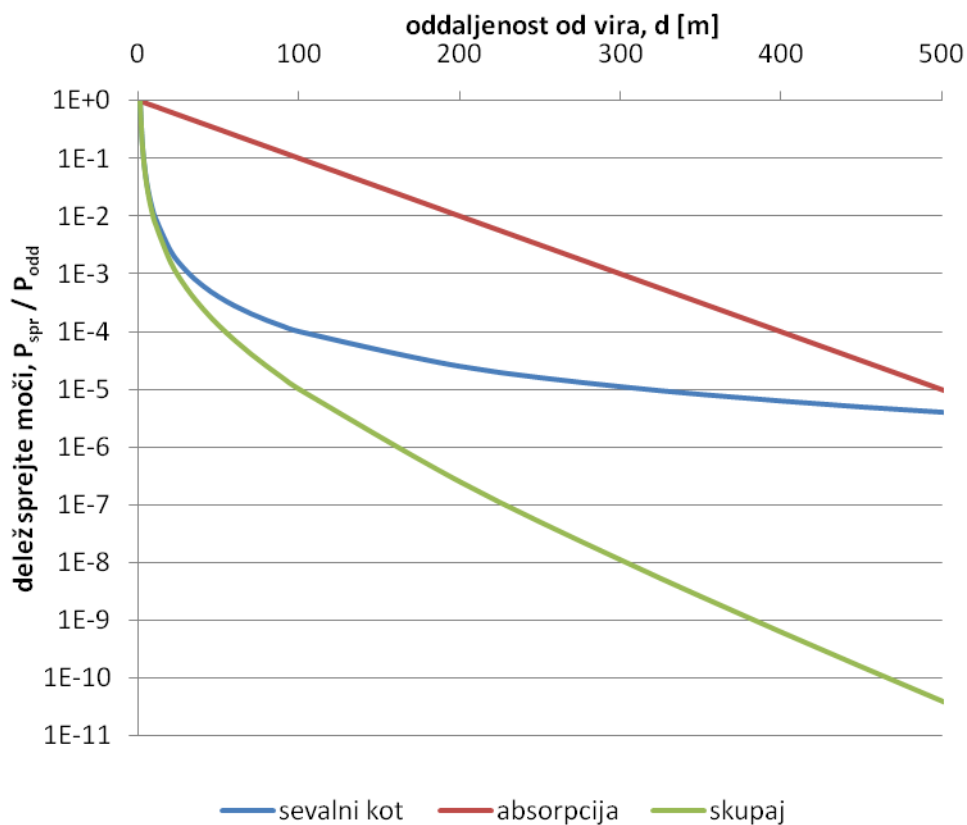
$$e^{-\alpha \cdot d} = 10^{-a \cdot d / 10} \quad , \quad (4)$$

iz katere sledi povezava med absorpcijskim koeficientom α podanim v m^{-1} in absorpcijskim koeficientom a , podanim v dB/m ,

$$\alpha = \frac{a}{10} \ln(10) \quad . \quad (5)$$

Primer kako oslabitev vpliva na svetlobni tok, ki ga prejme sprejemnik, je grafično predstavljen na sliki 3. Najvišja ravna črta prikazuje oslabitev žarka z razdaljo, zaradi absorpcije. Sredinska črta je oslabitev žarka, zaradi sevalnega kota, najnižja črta pa prikazuje vsoto obeh tipov oslabitve skupaj. Za izračun smo privzeli, da je

$$\frac{A}{(\theta \cdot d)^2} = 1, a = 0,1 \text{ dB/m} \quad . \quad (7)$$



Slika 3: Primer oslabitve prejete svetlobe zaradi sevalnega kota in absorpcije.

Za merjenje moči radijskih valov in mikrovalov ter svetlobnega toka pri optičnih komunikacijah se velikokrat uporablja enota dBm [3]. Za razliko od enote dB, ki podaja relativno spremembo moči, enota dBm podaja njeno absolutno vrednost in je definirana kot

$$P_{dBm} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_W}{10^{-3} W} \right) . \quad (6)$$

V enačbi (6), na primer hitro vidimo, da moči 1 mW ustreza moč 0 dBm.

Za optična vlakna, ki se uporabljajo v večini današnjih kablov, ki so na voljo na trgu, obstajajo predhodno izmerjeni podatki in meritve prenosa, zanesljivosti in oslabitev. Oslabitev v posameznem optičnem vlaknu, kjer je samo žarek z eno valovno dolžino, je od 0,5 do 0,2 dB/km. V vlaknih, kjer se nahaja več valovnih dolžin, je oslabitev od 2 do 3 dB/km [4]. Zrak v atmosferi se nenehno spreminja, delci se premikajo in ustvarjajo različne pojave, torej so pojavi v zraku nenapovedljivi in nepredvidljivi. Tako je lahko oslabitev optične povezave v zraku samo 0,2 dB/km, če je izjemno čisto, lepo vreme, okrog 4,3 dB/km v megličastem vremenu in tudi do 310 dB/km, v primeru zelo goste megle.

Če bi želeli vzpostaviti optično povezavo, ki prenese oslabitev signala do 30 dB, potem bi v primeru zelo goste megle, ki oslabi povezavo s 300 dB/km, povezava bila lahko dolga samo 100 m ali manj, da bi bila vzpostavljena ves čas oziroma da bi bila zanesljiva.

V nadaljevanju so podrobneje predstavljeni najpomembnejši dejavniki, ki vplivajo na oslabitev svetlobnega žarka na poti po komunikacijskem kanalu od oddajnika do sprejemnika.

2.1.2.1. Sipanje svetlobe

Če želimo razumeti, zakaj ne pride celotna moč žarka skozi medij, nas seveda zanima, kam gre ostala energija. Fizikalni zakoni govorijo, da se energija ne izgubi, lahko se le pretvori v drugo energijo. Kaj se zgodi z žarkom pri prehodu skozi atmosfero in kaj vse vpliva nanj ter kateri so najpomembnejši faktorji, ki ga slabijo, so vprašanja, ki vodijo do izboljšanja celotne infrastrukture, kar je seveda ključnega pomena pri celotni postavitvi.

Mnogi fotoni se absorbirajo v delcih, se odbijejo od njih v smeri izven smeri glavnega toka svetlobe, ali se sipljejo na različne konce. Ponavadi so največje izgube pri absorpciji. Do tega pojava pride, če so gradniki snovi sposobni sprejeti kvantizirano energijo vpadlih fotonov. Fotone absorbira plast atomov, ki to energijo porabijo za dušenje nihanja lastnih nabojev (dielektriki) ali se spremeni v kinetično energijo delcev in s tem se snov segreje. Snov vedno najmočneje absorbira elektromagnetno valovanje, katerega frekvenca se ujema z eno izmed lastnih frekvenc snovi.

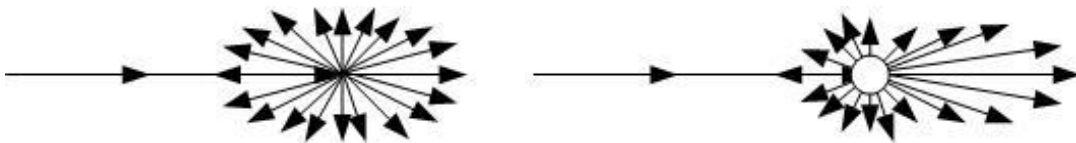
Svetloba se na poti skozi atmosfero odbija od raznih delcev. Glede na majhnost in površino delcev se svetloba ne odbije vedno v isto smer, ampak v različne smeri, se razprši. Temu

pojavo, da valovanje pade na delce v ozračju in se pri tem njegova energija razprši v več manjših valovanj z različnimi smermi sevanja, rečemo sipanje. Veliko dejavnikov vpliva na jakost sipanja svetlobe. Najpomembnejši med njimi so valovna dolžina vpadlega žarka, gostota delcev in molekul v zraku, dolžina poti, ki jo valovanje napravi v atmosferi ter skozi katero plast atmosfere gre žarek. Sipanje velja za cel spekter elektro magnetnega valovanja.

Sipanje se deli na tri vrste in sicer na Rayleighovo, Miejevo in neselektivno. Prvi dve vrsti sta shematično prikazani na sliki 4. Rayleighovo sipanje prevladuje v zgornjih plasteh atmosfere in je razlog, zakaj je nebo modro. Sipanje je namreč bolj izrazito pri krajših valovnih dolžinah in ko sončna svetloba prodira skozi atmosfero, se krajše valovne dolžine modre svetlobe sipajo močneje, kot svetloba z daljšimi valovnimi dolžinami. V tem primeru so delci, v katere se zadeva valovanje, precej manjši od valovne dolžine. Za Rayleighovo sipanje štejemo, če je velikost delcev manjša od 0,1 velikosti valovne dolžine vpadle svetlobe [5]. Primer takih delcev so prah ali molekule kisika in dušika.

Pri Miejevim sipanju se valovanje zadeva v delce, ki so približno enako veliki, kot je valovna dolžina vpadlega žarka. Za razliko od Rayleighovega sipanja bistveno bolj vpliva na daljše valovne dolžine. Delci, ki so najpogostejši vzrok za tako sipanje, so vodna para, prah, cvetni prah in dim. Miejevo sipanje je usmerjeno. Najbolj se sipa v smeri vpadlega valovanja. Torej večina svetlobnega toka gre v isto smer kot pred sipanjem, vendar ima širši sevalni kot, kar pomeni, da osnovnemu žarku pobere veliko energije. Večji kot so delci, bolj je izrazita usmerjenost sipanja, manjša je širina glavnega toka sipanja. Ker se zelena, modra in rdeča svetloba sipajo približno enako, so oblaki in megla videti beli. Miejevo sipanje zmanjša ostrino slike.

Kadar se svetloba sipa na delcih, ki so mnogo večji od valovne dolžine valovanja svetlobe, se vrsta sipanja imenuje neselektivno sipanje, saj na vse valovne dolžine vpliva približno enako. Tako veliki delci so vodne kapljice in veliki prašni delci, ki so najpogosteje v najnižjih delih atmosfere. Tako so na primer meglice, ki nastanejo zaradi smoga, videti sive.



Slika 4: Rayleighovo in Miejevo sipanje.

Če vrste sipanja prezrcalimo na problem vremena pri vzpostavitvi prostozačne optične povezave, se prvo pojavlja pri lepem vremenu, Miejevo se pojavlja pri vseh oblikah megle, od

rahlih meglic do goste megle, neselektivno sipanje pa je najpogosteje pri padanju snega in dežja, predvsem pri obilnejših padavinah. Vrste sipanj in teorije, ki stojijo za njimi so pomembne pri izdelavi simulacij vremenskih pojavov in s tem teoretičnih simulacij, kako naj bi se prostozračna optična povezava vedla pri določenih vremenskih pojavih. Simulacije imajo izreden pomen predvsem pri raziskovanju vpliva vremenskih pojavov na višje valovne dolžine. Osnovne optične komponente za velike valovne dolžine še ne obstajajo ali so izredno drage in jih tako ni možno preizkusiti eksperimentalno.

2.1.2.2. Vidljivost

Pri povezavah FSO je nosilec svetloba, ki potuje skozi medij zrak. Bolje rečeno pri povezavah, kjer sta obe končni točki komunikacijskega kanala na Zemlji, potuje žarek svetlobe skozi najnižji sloj atmosfere, kjer je atmosfera najgostejša in kjer se nahaja območje vremenskih pojavov kot so dež, megla, sneg, turbulence, kar pomeni veliko ovir za potujoče fotone. Poleg vremenskih pojavov se predvsem na urbanih področjih pojavljajo še druge ovire v zraku, kot so smog in delci, ki onesnažujejo zrak. Pri prostozračnih optičnih povezavah je zelo pomembna razdelitev vremena glede na vidljivost. Vidljivost pove, kako daleč se bo prebil svetlobni žarek v prvotni pričakovani liniji preko vseh ovir. Za rahlo megleno ali megličasto vreme se šteje, če je vidljivost slabša od 2 km, megleno vreme je, kadar je vidljivost manjša od 500 m [4]. V primeru meglenega vremena, torej pri vidljivosti manj kot 500 m, velja, da moč svetlobnega žarka pojema enako ali brez večje opazne razlike, ne glede na valovno dolžino. Ta enakost pri povezavah krajših od 500 m velja tudi pri izgubljanju energije v primeru dežja in snega. Pri povezavah med stavbami so povezave krajše od 500 m zelo pogoste, zato je pomembno vedeti, kakšne so v tem primeru oslabitve valovnih dolžin. Predvsem je pri teh povezavah dobro poznati obnašanje žarka v primeru megle, obilnega dežja in močnega sneženja, saj so to edini vremenski pojavi, ki lahko povzročijo popolno prekinitvev prostozračne optične povezave, ki je krajša od 500 m.

2.1.2.3. Tubulence

Poleg klasičnih vremenskih pojavov na prostozračno optično povezavo v lepem vremenu vplivajo tudi turbulence v zraku. To so zračni žepki, ki imajo drugačno gostoto kot okolica. Najlepši in najbolj viden primer turbulenc je poleti nad vročo asfaltno cesto, kjer zgleda, kot da bi zrak valovil. Turbulenca je pojav, ki se odvija v vseh tekočinah. Ustvarijo se različni tokovi, ki se vrtinčijo. Plasti zraka z različno gostoto se tako mešajo. Ko žarek svetlobe potuje skozi zrak, se skozi različne zračne tokove lomi drugače, saj imajo taki tokovi med seboj različne lomne količnike.

2.1.3. Valovna dolžina svetlobe in moč oddajnikov

2.1.3.1. Svetlobni spekter

Svetlobni spekter daje na izbiro veliko možnosti. Človeško oko zazna samo del spektra, ki ga imenujemo vidni del svetlobe, a le ta predstavlja zelo majhen del celotnega spektra. Za komunikacijo so teoretično primerne vse valovne dolžine, vendar na odločitev, kateri del spektra je najprimernejši za komunikacijo FSO, vpliva veliko dejavnikov. Najpogosteje se za krajše razdalje uporablja bližnja infrardeča svetloba (angl. *near infrared*). Za namene krajših komunikacijskih povezav se najpogosteje uporabljajo infrardeče diode LED. Infrardeča svetloba zasede del spektra z valovnimi dolžinami od 750 nm do 1 mm. Infrardeča svetloba se znotraj deli na bližnje infrardeče območje (angl. *near-infrared*), ki sega od 750 nm do 2500 nm, srednjevalovno infrardeče območje (angl. *mid-infrared*), ki obsega valovne dolžine od 2,5 μm do 10 μm , in daljno infrardeče območje (angl. *far-infrared*), ki vključuje valovne dolžine od 10 μm do 1 mm [6]. Izbira valovnih dolžin je velika, če za primerjavo vzamemo vidno svetlobo, ki zavzema le del spektra od 380 nm do 760 nm. Pravzaprav je ravno vidna svetloba slaba izbira, ker imajo sprejemniki težko delo pri prepoznavanju pravega žarka, sploh v urbanih predelih, kjer je veliko drugih žarkov.

2.1.3.2. Varnost

Med najpomembnejše dejavnike vsake sodobne tehnologije, ki se uporablja vsakodnevno in izven laboratorijev ter ostalih varovanih prostorov, gotovo spada varnost ljudi. V najrazličnejših državah imajo med seboj zelo različne varnostne standarde, vendar so v razvitem svetu postavljeni neki minimalni standardi, ki so si približno podobni, ko je govora o varnosti ljudi. Ta varnost se lahko navezuje na varnost posameznika pri delu z določeno napravo ali na varnost množice ljudi, ki bodo izpostavljeni bližjim in širšim vplivom neke naprave, ko bo postavljena v določeno okolje.

V primeru svetlobe gre vedno največ pozornosti za varnost oči, čeprav pri laserjih obstaja tudi nevarnost poškodbe tkiva, če so le ti premočni. Svetlobni žarek, ki ima valovno dolžino med 400 nm in 1400 nm, vstopi v človeško oko skozi roženico in lečo ter se preslika na zadnjo stran mrežnice. Če je žarek te svetlobe premočan, poškoduje oko. Svetlobni žarek, ki ima valovno dolžino večjo od 1400 nm, se večinoma odbije od leče očesa, vendar tudi zelo močen žarek take svetlobe lahko poškoduje oko. Pomembno je torej razmerje med različnimi valovnimi dolžinami in različnimi velikostmi moči teh žarkov. Žarek svetlobe iste valovne dolžine je lahko oslavljen ali okrepljen, torej ima različno veliko moč.

Na trgu se v večjem številu pojavljajo predvsem oddajniki, ki oddajajo eno od naslednjih dveh valovnih dolžin, 850 nm ali 1550 nm. Če gledamo z vidika varnosti oči, nam boljše alternativo predstavljajo laserski oddajniki z valovno dolžino okrog 1550 nm, kjer je njihova moč žarka lahko do 50 krat večja v primerjavi z laserskimi oddajniki z valovno dolžino 850

nm, pri tem pa še vedno ne poškodujejo oči oziroma vplivajo na oči znotraj pravil o laserjih in varnosti oči [7]. Laser lahko poškoduje tkivo tako, da ga pregreje oziroma zažge ali povzroči foto-kemično poškodbo, zato je na tem področju uveljavljena vsem dobro znana lestvica razredov, ki kategorizirajo laserje, glede na valovno dolžino in moč v razmerju z varnostjo za ljudi [8]. Ti razredi opredeljujejo tudi varnostne ukrepe v tem smislu, da se laserske naprave ne da fizično odpreti, ne da bi pri tem prenehala delovati. Pri tem je razred 1 popolnoma varen za človeka, v laserje razreda 1M pa se ne sme gledati neposredno. Najmočnejši laserji, ki poškodujejo ne samo oči ampak tudi kožo, spadajo v razred 4. Močnejši laserji se lažje prebijajo čez ovire in so za potrebe optičnih povezav bolj zaželeni. Ker je žarek z valovno dolžino 1550 nm lahko do 50 krat močnejši, je veliko bolj odporen na vremenske razmere in bolj primeren za daljše razdalje.

2.1.3.3. Komercialni faktor

Cilji komunikacij FSO, kjer sta obe končni točki komunikacijskega kanala na Zemlji, je dostopnost povprečnemu uporabniku, ki za svoje delo potrebuje hitrejše omrežje. Večina uporabnikov nima ali ne želi nameniti kapitala za vzpostavitev celotne infrastrukture, kot je npr. polaganje optičnih vlaken. Poleg kapitala je za postavitev določenih komunikacijskih kanalov veliko dodatnih komplikacij; potrebno je pridobiti posebna dovoljenja, npr. za polaganje optičnega kabla je potrebno dobiti vsa potrebna gradbena dovoljenja in dovoljenja za prisotnost komunikacijskega voda v neki državi ali občini, itd. Vsa ta dovoljenja poleg splošnih ovir predstavljajo tudi višji končni znesek, ki ga je potrebno nameniti za vzpostavitev komunikacijske infrastrukture. K temu znesku veliko doda tudi sama končna cena sprejemno – oddajnih enot. Poleg tega je splošno pravilo, cenejši kot je izdelek, ko pride na trg, hitreje se razširi njegova prodaja. Vse to nakazuje, kako zelo pomemben je komercialni faktor.

Ko so se začele razvijati sprejemno – oddajne enote za prostozračne optične povezave, na trgu še niso obstajali podobni končni produkti. Izdelovalci so potrebovali določene komponente, ki niso standardne za večino naprav. Večinoma so to bile optične komponente. Razvoj optičnih oddajnikov in sprejemnikov, ki bi bili najbolj primerni za prostozračno optiko, bi trajal predolgo in preveč bi stal, zato je bilo proizvajalcem najbolj ugodno pregledati trg in ugotoviti, kaj primernega njihovim potrebam na trgu že obstaja. Komponente, ki so dalj časa na trgu in se uporabljajo v večji meri, so cenejše kot tiste, ki se razvijejo za določeno stvar in se pojavljajo redkeje ter se izdelujejo v manjših količinah. Treba je namreč pokriti stroške raziskav in testiranj. Na trgu so zelo razširjene laserske diode z valovno dolžino okrog 780 nm. Uporabljajo se v snemalnikih kompaktnih plošč, ki so že dolgo časa na trgu in v širokem spektru uporabe. To je tudi razlog, da so imele prve naprave za prostozračno optiko oddajnike, ki so oddajali valovne dolžine nižje od 1550 nm.

2.1.3.4. Izbira valovne dolžine

Če se povzame gornje kriterije, lahko sklepamo, da je višja valovna dolžina nosilcev boljša. V napravah za vzpostavitev optičnega komunikacijskega kanala FSO, ki so trenutno na trgu, se danes kot nosilec večinoma uporablja svetloba z valovno dolžino 1550 nm, v napravah v preteklosti pa se je uporabljala valovna dolžina okrog 850 nm. Pri valovnih dolžinah višjih od 1550 nm je problem, ker še ne obstaja dovolj razvitih komponent, da bi se lahko začel širši razvoj enot za prostozračne optične povezave. Za še višje valovne dolžine okrog 10 μm je problem v razvoju posameznih komponent, saj imajo znanstveniki problem z materiali za izdelavo osnovnih komponent, kot so npr. sprejemne diode. Za svetlobo z valovno dolžino 1550 nm velja, da je v okviru istega razreda varnostnih pravil za laserje lahko kar do 50 krat močnejša od tiste z valovno dolžino 850 nm. Možnost močnejšega laserja, ki je še vedno dovolj varen, je najpomembnejša prednost višjih valovnih dolžin, zato novejše enote delujejo z višjimi valovnimi dolžinami.

2.1.4. Zanesljivost

Poleg varnosti za oči, cene komponent, možnosti za nadgradnjo, prodajnosti komponent in razmerja cene proti kakovosti ima velik vpliv pri izbiri valovne dolžine nosilca podatkov predvsem zanesljivost oziroma stopnja napak, ki se pojavi pri prenosu. Če je stopnja napak previsoka, to pomeni, da sama povezava ni zanesljiva. Pri prenosu podatkov je bistvenega pomena, da se prenesejo pravi podatki in da se na poti od oddajnika do sprejemnika ne popačijo ali izgubijo. Pri povezavi FSO se število napak ocenjuje z enoto BER (angl. *Bit Error Rate*), ki nam pove, kolikšen je delež napak pri prenešenih bitih. Pri komunikacijskih kanalih se upošteva, da je BER sprejemljiva, če je enaka 10^{-9} ali manjša, kar pomeni, da ima od vseh prejetih bitov lahko le 10^{-9} odstotkov napačno vrednost oziroma se izgubijo pri prenosu [9].

Če gledamo s stališča BER, je sevalni kot do neke mere v pomoč, saj omogoča širše polje, kamor se lahko namesti sprejemno enoto. V primeru postavitve na visoki stavbi je to pomembno, saj se stavba ziba in bi v primeru teoretičnega ravnega žarka to zelo vplivalo na BER oziroma zanesljivost celotne povezave. Že sama postavitve dveh nasprotnih enot bi bila prava umetnost, saj bi jih bilo potrebno popolnoma uskladiti, da bi oddajni žarek direktno vpadal na sprejemno enoto. Če pomislimo, da je sprejemna enota velikosti diode, potem nam je hitro jasno, zakaj bi nastal problem.

Ob postavitvi linije za komercialne potrebe je potrebno imeti vse podatke o tem, kako se bo v določenem vremenu linija obnašala. Podati je treba podatke o tem, kako zanesljiva je linija v primeru slabega vremena, do podatkov o hitrosti linije pri povprečnem vremenu v okolju, kjer se linija postavlja.

2.2. Oddajnik

Oddajnikov je na trgu bistveno več vrst kot sprejemnikov. Za oddajnik se odločimo glede na tip informacije, ki jo želimo prenesti in glede na dolžino komunikacijskega kanala, ki ga želimo vzpostaviti. Za krajše razdalje so primerne diode LED, za daljše pa laserji. Laserji imajo koherenten žarek in ponavadi zelo majhen sevalni kot v primerjavi z diodami LED. Za razliko od laserskih diod pa so diode LED precej cenejše. Za srednje dolge razdalje se lahko dodajo leče in se še vedno lahko uporabijo diode LED namesto laserskih. Neodvisno od razdalje prenosa je pri oddajnikih pomembno, kako hitro jim lahko spreminjamo stanje. Hitrost prižiganja in ugašanja generatorja je hitrost, s katero lahko tvorimo podatke.

Večina optičnih oddajnikov seva svetlobo iz bližnjega infrardečega območja. Razlog je v materialih, iz katerih so narejeni oddajniki. Za oddajnike, ki bi sevali višje valovne dolžine, se težko pridobi osnovne elemente. Večinoma so ideje za zgradbo takih oddajnikov še v testnih ali celo raziskovalnih fazah. Pri nekaterih valovnih dolžinah, kjer bi se dalo narediti oddajnike, je problem le v tem, da se elementi ne uporabljajo za druge namene in bi bila njihova proizvodnja, ki bi bila tako namenjena le trgu prostozračnih optičnih povezav, bistveno predraga, da bi se proizvajalci sprejemno – oddajnih enot odločali za to.

2.2.1. Diode LED

Izmed infrardečih diod LED so najpogostejše na trgu tiste, ki imajo kombinacijo elementov galij, aluminij in arzen. Le te so novejšje in boljše od diod GaAsP, ki so bile ene izmed prvih uporabnih diod LED in so oddajale valovne dolžine okrog 655nm [10]. V primerjavi z njimi tehnologija GaAlAs omogoča 10 krat učinkovitejše in svetlejšje diode LED. Za delovanje potrebuje nižjo napetost in lažje jih je upravljati (utripanje, ki je zelo pomembno pri optičnih komunikacijah). Obstajajo še diode GaAs, ki so 10 krat hitrejšje od diod GaAlAs, vendar je njihova moč precej manjša (dosegajo samo šestino moči tehnologije GaAlAs) in so nekoliko dražje. Pri tehnologiji FSO se uporabljajo za krajše razdalje, kadar se potrebuje srednjo hitrost.

Infrardeče diode LED imajo kot sevanja v razponu od 15 do 40 stopinj. So srednje hitri oddajniki, kar pomeni, da lahko oddajajo do milijon pulzov na sekundo. Njihova prednost je v ceni, v velikem številu proizvajalcev, v dolgi življenski dobi, tipično več kot 100000 ur in v odpornosti na tresljaje [10]. Uporabne so za kratke in srednje razdalje, za kontrolne povezave in komunikacijske aplikacije. Z velikimi lečami ali če jih sestavimo več skupaj, so lahko uporabne tudi za daljše razdalje. Več diod povezanih med seboj se uporablja tudi za oddajanje v več smeri. Če bi se jih razporedilo na površino krogle, bi v teoriji lahko pokrivalo vse smeri do določene razdalje.

2.2.2. Laserji

Laser izhaja iz inicialk angleških besed *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, kar bi dobesedno prevedli kot ojačanje svetlobe s spodbujeno emisijo sevanja. Laserjev je več vrst, razlikujejo pa se po načinu delovanja, aktivnem sredstvu in namenu uporabe. Največkrat se jih deli glede na aktivno sredstvo, in sicer na plinske, trdninske, polprevodniške in laserje na tekoči medij. Laserji na tekoči medij imajo lastnost, da je mogoče nastaviti izhodno valovno dolžino. Na področju komunikacij se ta vrsta laserjev ne uporablja.

2.2.2.1. Plinski laserji

V plinskih laserjih je aktivna snov mešanica plinov. Vzbujanje poteka največkrat z razelektritvijo, redkeje kemično ali s kompresijo. S plinskimi laserji lahko dobimo ozek spekter valovnih dolžin v območju IR, vidne in ultravijolične svetlobe. Snop svetlobe je lahko zelo ozek. Fizično so ponavadi precej veliki in s tem nekoliko nepraktični za splošno uporabo. Najpogostejši plinski laserji so iz plinske mešanice helija in neona, iz ogljikovega dioksida in iz ioniziranega žlahtnega plina argon [10].

Ameriška vojska je dolgo časa uporabljala vrsto laserjev z aktivno snovjo ogljikov dioksid. Laserje z izredno dolgimi valovnimi dolžinami okrog 10000 nm, so uporabljali za komuniciranje, saj se dolge frekvence boljše prebijejo čez meglo, dim in smog kot vidna svetloba in bližnja IR svetloba. Laserji He-Ne imajo valovne dolžine v vidnem in IR delu spektra, imajo slab izkoristek in majhne moči. Testno so s tem laserjem uspeli prenašati zvok, vendar samo nekaj kilometrov. Vojska je testirala tudi zelene in modre laserje pod vodo, vendar je končni rezultat vseh testov, da plinski laserji niso primerni za uporabo v komunikacijske namene. Predvsem niso uporabni za širše komercialne namene, ker so fizično veliki in s tem nepraktični za transport in postavitve ter vzdrževanje [10].

2.2.2.2. Trdninski laserji

Druga skupina laserjev so trdninski laserji. Eni izmed prvih, ki so se pojavili v tej skupini so rubinovi laserji. Sem spadajo še laser Nd-YAGr, laser Nd-YLF, laser z neodimijevim steklom in holmijevi laserji. Aktivna snov v vseh je prozoren kristal s primesmi atomov. Navadno je valjaste oblike s poliranimi konci, ki služijo kot zrcala. Zaradi različnih interakcij ima snov lahko več stanj, nekatera od teh pa so metastabilna. Sevalni prehodi med nekaterimi stanji omogočajo lasersko delovanje. Okrog aktivne snovi je ponavadi ovita palica, razelektritvena luč, ki z zvezno ali bliskajočo svetlobo optično vzbuja aktivno snov. Razelektritvena luč je ponavadi ksenonska ali živosrebrna. Druge možnosti optičnega vzbujanja so še z volframovimi halogenskimi žarnicami, polprevodnimi laserji, itd. Vzbujanje s polprevodniškimi laserji ima zelo dober izkoristek.

Rubin absorbira modro in zeleno svetlobo iz ksenonskih palic in emitira svetlobo v rdečem delu spektra z valovnimi dolžinami okrog 695 nm. Problem rubinovitih laserjev je, da imajo slab izkoristek, saj je potrebno intenzivno hlajenje. Laserji YAG potrebujejo velike napajalnike, kar celotno napravo naredi fizično veliko. Če se vzbuja s polprevodniškim laserjem, je izkoristek boljši za okrog 30 odstotkov, kar pomeni tudi manjše dimenzije naprave za isti končni rezultat. Polprevodniški laser namreč seva večinoma le tiste valovne dolžine, ki jih aktivna snov dobro absorbira. Za razliko od polprevodnikov bliskavica seva svetlobo z več različnimi valovnimi dolžinami, tudi tistimi, ki jih aktivna snov ne absorbira ali pa slabo absorbira, kar pomeni slabši izkoristek črpanja pri bliskavici, saj gre energija za svetlobo, ki se ne izkorišča. Trdninski laserji so zelo močni, precej zapleteni, vendar predragi in preveliki za povezave na Zemlji. Ti laserji so bolj namenjeni za povezave med Zemljo in vesoljem, predvsem za povezave globlje v vesolje [10].

2.2.2.3. Polprevodniški laserji

Pri izdelavi polprevodniških laserjev se uporabljajo predvsem spojine elementov iz tretje in pete skupine v periodnem sistemu. Pri teh se energija pri rekombinaciji elektronov in vrzeli pretvori v svetlobo. S primesmi elementov iz nekaterih drugih skupin se lahko dobi P in N dopiran tip polprevodnika, s čimer dobimo spoj PN, ki oddaja svetlobo. Polprevodniški laserji so torej diode, skozi katere teče tok v prevodni smeri in če je ta tok dovolj velik, se koncentracija elektronov in vrzeli toliko poveča, da pride do rekombinacije, pri čemer se emitirajo fotoni. Glede na različne sestave in kombinacije polprevodnikov lahko ti laserji sevajo z valovnimi dolžinami od 450 nm do 1,5 μm . Delimo jih glede na izhod emitirane svetlobe, ki je lahko iz zgornje stranice ali iz strani. Slednji se naprej delijo še glede na tip spoja polprevodnika.

Prvi primer polprevodniškega laserja je laser z enojnim spojem PN, ki je narejen iz spojine galijevega arzenida. Ima nizko gostoto nosilcev toka, nizek izkoristek in pulzno delovanje. Ta laser je tako močan, da lahko pošilja pulz svetlobe z močjo 20 V, kar je 200 krat več kot premore tipična dioda GaAlAs [10]. Delovni cikel laserja izgleda tako, da deluje manj kot 0,1% časa celotnega cikla, kar pomeni, da mora biti precej hiter, če želimo kratek cikel in s tem hitro povezavo. Njegov maksimalen pulz ne sme biti predolg. Trajati mora manj kot 200 ns. Laserska dioda ima zelo ozek žarek. Uporablja se za dolge razdalje in počasnejše prenose, npr. pri prenosu zvoka. Slabosti v primerjavi z diodo LED so cena (laserske diode so veliko dražje od navadnih diod LED), krajše delovanje in občutljivost na temperaturo.

Naslednji primer je laser GaAlAs, ki se uporablja za predvajalnike CD, nekatere laserske tiskalnike, v napravah za branje črtnih kod, v fax napravah, itd. Oddaja zelo ozek pas spektra valovnih dolžin. Je zelo močan in se upravlja s frekvencami okrog GHz, kar je precej več kot pri ostalih laserjih. Na trgu so te rešitve še relativno nove, zato je njihova cena precej visoka. Pri optični komunikaciji so zelo uporabne, vendar veliko cenejše infrardeče diode LED skoraj

vedno zadostijo pogojem, ki so potrebni za vzpostavitev normalnih povezav, ki jih večina strank potrebuje. Ti laserji so uporabni pri širokopasovnih povezavah.

Polprevodniške laserje lahko povezujemo med seboj in dobimo močnejše enote. Če se jih poveže v ravno vrsto se to imenuje polprevodniška laserska palica ali po angleško HPLD bar (angl. *High Power Laser Diode bar*) [11]. Na področju optike se pojavljajo predvsem polprevodniški laserji z vertikalno resonančno votlino ali laserji VCSEL (angl. *Vertical Cavity Surface Emitting Diode*). Ker so laserske oddajne diode zelo majhne, bi jih teoretično na prostor velik 1 cm x 1 cm lahko umestili okrog 100 milijonov. Pri takih velikih postavitvah bi bil problem hlajenje in jih je zato nemogoče narediti. Manjša pakiranja, ki jih je mogoče narediti, so zelo uporabna za širokopasovne povezave. Če bi bilo pakiranje narejeno tako, da bi pokrivalo 360 stopinj, bi bilo z njim teoretično mogoče pokriti površino veliko več tisoč kvadratnih kilometrov [10]. Vendar je pri tej rešitvi treba omeniti, da je povezava še vedno možna le, če obstaja vidna linija. Torej na drugi strani bi moral odjemalec pravilno usmeriti svojo enoto, npr. za razliko od brezžičnih povezav, kjer to ni potrebno.

Prednosti laserjev VCSEL pred ostalimi komunikacijskimi laserji so majhnost dimenzij, majhna vhodna moč, velik izkoristek (do 47%), velike izhodne moči do 50 mW, daljša življenjska doba, nižji stroški izdelave, itd. Če imajo valovne dolžine od 650 do 1300 nm, so ponavadi osnovane na galijevem arzenidu. Za valovne dolžine od 1300 do 2000 nm se večinoma uporablja indijev fosfid. Laserji VCSEL z višjimi valovnimi dolžinami so še v fazah eksperimentiranja in so ponavadi vzbujani optično.

2.2.3. Drugi oddajniki

Poleg diod LED in laserskih diod se za krajše razdalje pri optični komunikaciji kot oddajnik lahko uporabljajo še fluorescentna luč, katodna cev, ksenonska elektronska bliskavica, zunanji svetlobni modulatorji in podobno.

2.3. Sprejemnik

Glavna naloga optičnega sprejemnika je, da sprejme optični signal in ga pretvori v električnega. Zaželenosti vsakega dobrega optičnega sprejemnika so visoka občutljivost, širok frekvenčni pas detektiranega signala, nizka raven lastnega šuma, kratek odzivni čas in linearnost detekcije. Sodobni sprejemniki so sposobni pretvoriti okrog 80% vpadle svetlobne moči v izhodno električno energijo [12].

Optičnih detektorjev je na trgu bistveno manj vrst, kot optičnih oddajnikov. Delijo se na fotodiode PIN in plazovne fotodiode. Za sprejemnike valovnih dolžin od 1300 nm do 1550 nm niso več uporabne silicijeve fotodiode. Za te namene se uporabljajo le germanijeve fotodiode in fotodiode iz polprevodnikov.

2.3.1. Fotodiode PIN

Fotodiode PIN so sestavljene iz P in N dopiranega polprevodnika, med katerima je plast izolatorja. Najbolj občutljiva je v območju valovnih dolžin okrog 900 nm, kar je dobro, saj s temi valovnimi dolžinami sevajo najbolj razširjene infrardeče diode LED in laserji na trgu. Za namene krajših optičnih komunikacijskih povezav je ta fotodiode dovolj hitra in občutljiva ter cenejša od alternativ. Za zaznavanje valovnih dolžin okrog 1550 nm se uporabljajo InGaAs fotodiode. Te se uporabljajo tudi za komunikacijske prenose po optičnih vlaknih. Od silicijevih so precej dražje.

2.3.2. Plazovna fotodiode

Plazovna fotodiode ali fotodiode APD (angl. *Avalanche Photo Diode*) je polprevodniški detektor z notranjim ojačanjem, ki je v svoji sestavi zelo podobna fotiodi PIN. Tokovno ojačanje v plazovni fotiodi poteka tako, da se ustvarjene nosilce naboja pospeši in ko se le ti zadevajo v nevtralne atome, se pri tem ustvarjajo novi pari elektronov in vrzeli. Ta proces se nato ponavlja in ga imenujemo plazovni pojav. Fotodiode APD ima boljšo odzivnost kot fotiodi PN in PIN, celo do 50 ps [13]. Ojačanje ima brez šuma, ki ga sicer dodajo elektronski ojačevalniki. Ker ima bistveno nižji nivo šuma od fotiod PIN, se jo uporablja tam, kjer so bolj šibki optični signali. Njena prednost je v majhnih fizičnih dimenzijah. Potrebna je stabilizacija polarizacijske napetosti in temperature. Slabost je tudi v tem, da so za upravljanje potrebne visoke napetosti.

2.3.3. Detektorji za daljše valovne dolžine

Pri daljših valovnih dolžinah nastane problem pri detektiranju, saj posamezni fotoni prenašajo manj energije, kar pomeni, da je potrebno izbrati polprevodniški material, ki je bolj občutljiv. Pri tem zaradi šuma dobimo problem s hlajenjem materiala. Detektorji za daljše valovne dolžine so namreč velikokrat hlajeni s tekočim dušikom. Osnovni problem je tudi v tem, da je malo takih polprevodnikov, ki zadoščajo omejitvam in le te je težko pridobiti. Postopki še niso stestirani in uveljavljeni ter so zato dragi.

2.4. Sprejemno – oddajne enote

Če želimo vzpostaviti delujočo dvostransko, komunikacijsko povezavo, potem potrebujemo na obeh straneh enote, ki bodo vsebovale sprejemni in oddajni del. Sprejemni del, poleg že prej opisanih sprejemnikov, vsebuje sprejemne leče, ki fokusirajo vpadlo svetlobo na sprejemnik, povezavo z napravo, ki bo sprejete podatke obdelovala ali pošiljala naprej po drugih vrstah povezav, in vezje, ki bo vse to nadzorovalo in omogočalo. Podobno ima oddajni del povezavo z zunanjo napravo, ki priskrbi podatke in je povezana z oddajnikom, leče, ki skrbijo, da bi bil izhodni žarek svetlobe kar se da ozek in s tem močnejši, in vezje, ki ima nadzor nad oddajanjem podatkov. Vezje je pri sprejemo – oddajnih enotah enotno za oddajni

in sprejemni del. Ponavadi ni pretirano kompleksno, saj sama prostozračna optična povezava nima sama po sebi nikakršnega protokola, za katerega bi bilo treba skrbeti. Za pravilnost podatkov skrbijo zunanje enote. Seveda je lahko taka zunanja enota tudi vgrajena v sprejemno – oddajno enoto. Pri komercialnih verzijah obstaja zelo pester izbor enot. Lahko se dobi od zelo preprostih verzij, ki samo pošiljajo in oddajajo signal, do enot, ki imajo možnost upravljanja prek mreže in dodane grelce, da se na njih ne nabira sneg in led.

Pri postavitvi sprejemno – oddajne enote je treba upoštevati ogromno faktorjev. Eden izmed njih je gotovo prostor, kjer bo naprava stala. Če bo naprava postavljena na okno znotraj stavbe, potem je treba zagotoviti, da bo postavljena tako, da ne bo vsak mimoidoči imel dostopa do nje in jo lahko premaknil, saj je optimalno delovanje bistvenega pomena za dobro povezavo. Poleg mimoidočih je lahko znotraj stavbe problem še pregrevanje naprave. Če naj bi naprava stala na strehi stavbe, je ravno tako treba zagotoviti, da se ne premika. Poleg tega bodo nanjo vplivale vse mogoče vremenske spremembe. Vezje znotraj nje mora biti zaščiteno pred vlago, dežjem, snegom in zmrzaljo. Treba je zagotoviti, da se sneg in led ne bosta nabirala na lečah naprave. Prostor postavitve mora biti izbran tako, da bo čimmanj možnih fizičnih prekinitev; če je postavitve na strehi stavbe, je pametno enoto postaviti na rob stavbe, da ne bodo ljudje, ki pridejo na streho, prečkali povezave. Delavci, ki pridejo popraviti klimatsko napravo na strehi, gotovo ne bodo pazili, kje lahko in kje ne smejo hoditi. Naprava mora stati tako, da je sončna svetloba ne bo pretirano motila. Sprejemni del je optimalno postavljen tako, da nanj nikoli ne vpada direktna sončna svetloba. Pred sončno svetlobo lahko enoto zaščitimo tudi s senčniki, ki so nameščeni na zgornjo in stranski sprednji rob. Na spodnjem robu senčnik ne sme biti, ker bi se na njem pozimi nabiral sneg.

Pri postavitvi se je potrebno zavedati, da potrebujemo prosto zračno linijo med obema enotama. Če je vmes nepremostljiva fizična ovira, se lahko nanjo (npr. če je med dvema stavbama, ki ju želimo povezati, tretja stavba) postavijo ponavljalniki, ki samo sprejmejo in oddajo signal naprej. Pri postavitvi je treba poznati tudi okolico. Če je blizu kakšen izvor, kjer se dviguje toplota in s tem povzroča interference v zraku, je treba to upoštevati in premisliti, če se je možno tej oviri izogniti. Takšen izvor bi lahko bila zelo prometna cesta, če bi bila povezava med nižjih stavbami. Preveriti je dobro tudi posebnosti okolice, ki so večinoma redke. Tak neobičajen primer bi bil povezava čez mokrišče, kjer biva veliko ptic. Ptice bi tako lahko prekinjale povezavo večkrat na dan, kar že bistveno vpliva na zanesljivost povezave.

Poleg ohišja enote, ki mora preстати in vzdržati vremenske razmere, so pomemben del enote leče. Leče morajo biti izdelane natančno in brez napak. Ni sicer potrebna taka natančnost kot npr. na fotoaparatih, a če se sprejeta energija svetlobe ne preusmeri točno na sprejemnik, leča ne opravlja svojega dela. Če pogledamo napravo s sprednjega dela, so nekatere leče ponavadi večje od drugih. Večje leče so namenjene sprejemnemu delu. Tak primer je desna naprava na sliki 5. Sprejemna leča je lahko ena ali jih je več. Velikost površine sprejemne leče določa, kakšno površino snopa oziroma energije lahko zavzame. Načeloma torej velja, da večja kot je leča, boljši je sprejem. Manjše leče so namenjene zožanju kota oddajanja svetlobnega žarka iz

oddajnika. Če zmanjšamo sevalni kot, bo na razdalji druge enote žarek zavzel manjšo površino, kar pomeni, da bo sprejemnik druge enote z enako veliko sprejemno lečo sprejel več energije. Močnejši kot je signal pri drugi enoti, bolj zanesljiva je povezava in dalj bo vzdržala, če se vreme slabša. S pravilnim usmerjanjem žarka z lečami se lahko nekoliko zmanjšajo ostali moteči vplivi, ki predstavljajo šum (npr. svetloba ozadja). Vendar prinesejo zelo natančno usmerjene in zmogljive leče tudi to slabost, da je sistem s takimi lečami potrebno bistveno bolj natančno usmeriti. Enoti morata biti tako natančno usmerjeni ena proti drugi, za razliko od sistemov z manj natančnimi lečami.



Slika 5: Primera sprejemno - oddajnih enot. Prva ima tri oddajnike in en sprejemnik. Vsi imajo enake leče. Desna enota ima 8 oddajnikov in en sprejemnik. Sredinska leča je sprejemna, manjše stranske so oddajne. Enote so izdelali na TU Graz [14].

Sprejemno – oddajne enote imajo lahko več sprejemnikov in oddajnikov. Obstajata dve vrsti naprav glede na število povezav, ki sta jih dve enoti sposobni ustvariti. Prva vrsta so eno-povezovalni sistemi, ki ustvarijo eno povezavo. V to vrsto spadajo tudi tisti sistemi, ki imajo več oddajnikov in samo en sprejemnik, ki sprejema povezave od vseh oddajnikov (oba primera enot sta prikazana na sliki 5). Druga vrsta enot so več-povezovalni sistemi (angl. *multilink*), ki imajo več oddajnikov in več sprejemnikov. Ponavadi so povezani tako, da en sprejemnik sprejema žarek enega oddajnika, torej da je število oddajnikov in sprejemnikov enako. Ni nujno, da imajo več-povezovalne enote več moči kot eno-povezovalne.

Povezava naprave z ostalimi napravami je ponavadi realizirana z optičnimi vlakni. Eno vlakno je namenjeno povezavi iz zunanje enote do oddajnika, drugo je namenjeno povezavi od sprejemnika do zunanje enote. Valovna dolžina svetlobe v vlaknih je okrog 1300 nm. Vlakna se morajo končati s standardiziranim vhomom, da ni problemov pri priključitvi zunanjih naprav. Sprejemno – oddajne enote delujejo na nivoju fizične plasti referenčnega modela OSI. Fizična plast je najnižji nivo v modelu. Cilj fizičnega sloja je učinkovito prenašanje bitov brez napak prek komunikacijskega kanala skladno z omejitvami medija. Obvladuje prenos bitov preko komunikacijskega kanala tako, da se vsak bit pravilno prenese in interpretira. Naloge tega nivoja so skrb za karakteristike signala (nivoji napetosti, modulacija), način komunikacije (duplex ali full-duplex), priklop na medij (fizične karakteristike konektorjev), upoštevanje lastnosti medija (frekvenčne karakteristike - impedanca, zakasnitve, atenuacija) [15]. Tako se lahko enote brez problema priključijo na stikala, usmerjevalnike, multiplekserje ali drugo strojno opremo.

2.5. Izbor sistema

Ko se odloča o izdelavi nove sprejemno – oddajne enote, je potreben razmislek, zakaj se bo potrebovala in kako zmožljiva mora biti, da pri tem ne bo predraga. Snovanje sistemov lahko delimo na tri različne tipe. Prvi tip snovanja poizkuša narediti sistem iz kombinacije že obstoječih standardnih komponent, da bi bil sestavljeni sistem čim bolj cenovno ugoden in za to ceno čim bolj učinkovit. V tem primeru sama izdelava ne zahteva zelo natančno izdelanih in natančno postavljenih komponent, ravno tako pri montaži ne zahteva zelo natančne postavitve, saj je ponavadi sevalni kot nekoliko večji. Ta kombinacija tudi ne zahteva teleskopskih leč. Doseg takih naprav je ponavadi tja do 300 m. Za boljši izkoristek naprave se ponavadi doda več moči, kolikor se pač da, da je lasersko sevanje še vedno v merilu pravil o varnosti laserjev in varnostnih merilih za oči.

Drugi tip zasnove izkorišča kolinearnost žarka svetlobe. Torej se pri zasnovi uporabi oddajnike, ki imajo manjše sevalne kote. Če imata dva enako močna oddajnika različne sevalne kote, bo tisti z bolj ozkim žarkom dosegel dlje od tistega s širšim žarkom. Ta tip izkorišča elemente, ki so na trgu zaradi optične komunikacije po vlaknih. Tu se uporabljajo dražje leče, ki zožajo oddani žarek. Ponavadi imajo funkcijo teleskopa. Ko se postavlja take enote, je potrebno že precej pozornosti posvetiti natančni postavitvi ogrodja. Stabilno mora biti tako ogrodje, kot površina, na katero se ogrodje namesti. Za postavitve se potrebuje tudi dodatne naprave, da je naprava postavljena dovolj natančno, da je povezava optimalna.

Tretji tip bi lahko predstavili kot najbolj sofisticirano rešitev izmed vseh. Le ta vključuje tudi ideje za razširitev in podaljšanje povezave, če bi v bodoče to želeli. Pri teh enotah je žarek najbolj ozek in ima najdaljši doseg. Zaradi zelo natančne postavitve morajo enote imeti vgrajeno avtomatsko iskanje žarka. Torej pri temu tipu gre bolj za zmožljivost tehnologije, kot za samo ceno končnega produkta.

3. Testne postavitve optičnih povezav na TU Graz

3.1. TU Graz

Na TU Graz se z raziskovanjem prostozračne optične povezave ukvarja predvsem inštitut za širokopasovne komunikacije. Ta se znotraj deli na tri raziskovalne skupine, skupino za optične komunikacije (OptiKom), skupino za radarske valove/mikro valove in skupino za audio tehnike/akustiko. Skupino za optične komunikacije vodi profesor Erich Leitgeb. Z raziskavami na področju prostozračnih optičnih povezav se na TU Graz ukvarjajo že od leta 2000. Sodelujejo na več mednarodnih projektih kot so COST projekti, SatNex, itd. Sodelujejo tudi z državnimi telefonskimi operaterji, s katerimi so postavili nekaj delujočih povezav po mestu.

Sama sem kot absolventka gostovala pri skupini za optične komunikacije od 30. novembra do 4. decembra 2009. Namen obiska je bil spoznati opremo in njeno delovanje ter se seznaniti s prednostmi in slabostmi prostozračne optične povezave. Peljali so me tudi na ogled vseh trenutno postavljenih naprav na strehah dveh stavb njihove univerze (Inffeldgasse 12 in 10). V enem izmed laboratorijev so mi razkazali tudi same sprejemno – oddajne enote in kako je zgrajena njihova notranjost ter katere izmed njih so sestavili sami. Pokazali so mi tudi sobo, kjer je nameščen računalnik in ostala oprema, ki je namenjena za testiranje povezav. Tu so naprave, ki generirajo podatke in naprave, ki sprejemajo in primerjajo podatke, ter računalnik, ki si vse beleži in hrani. Poleg ogledov sem dobila pomembne informacije in veliko uporabne literature.

3.2. Opis lokacije

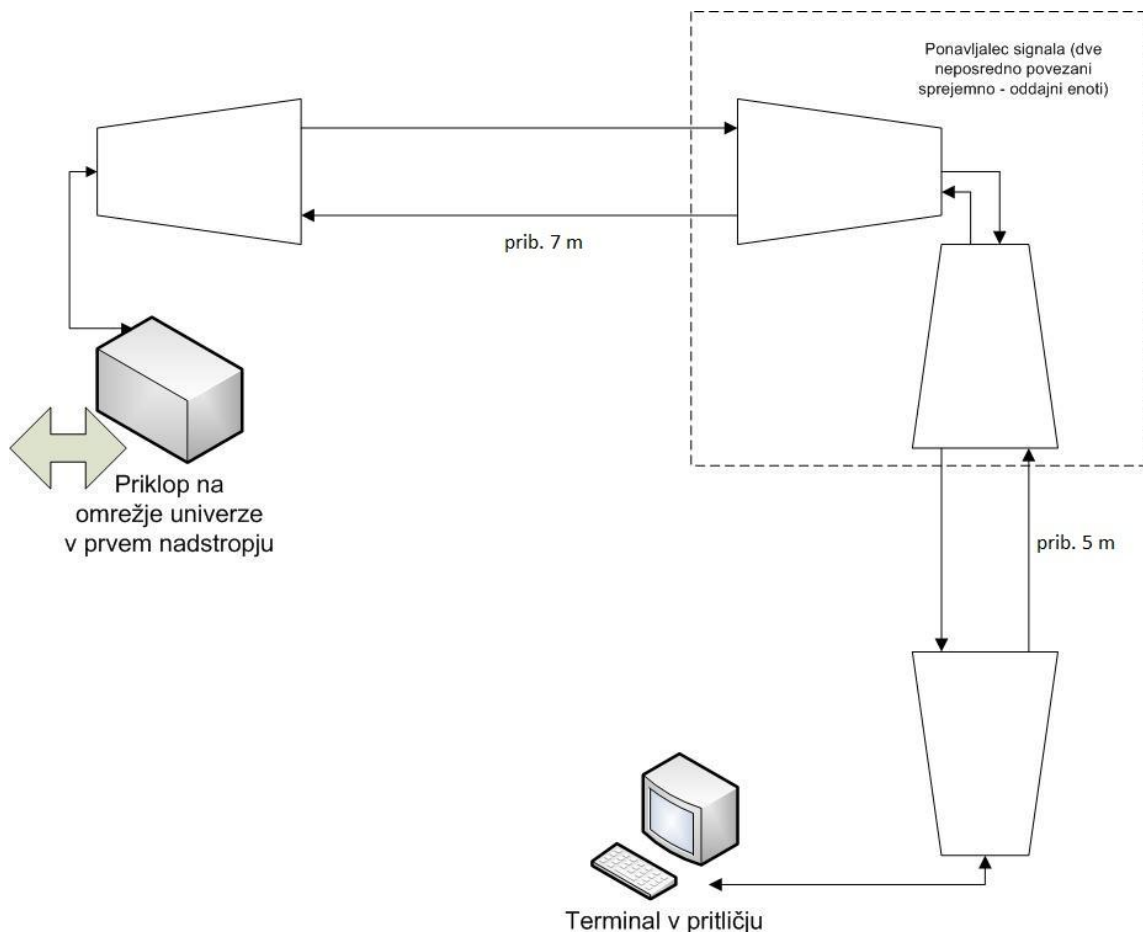
V pričujočem razdelku opišem tri postavitve komunikacijskih kanalov FSO na TU Graz. Njihov primarni namen je testiranje kakovosti delovanja tovrstnih sistemov v realnih razmerah.

3.2.1. Postavitev 1

Na sami TU Graz imajo postavljenih več optičnih povezav. Najkrajša med njimi je postavljena znotraj stavbe na naslovu Inffeldgasse 12, kjer so nastanjeni laboratoriji za komunikacijo. Predstavlja rešitev za primere, ko med dvema točkama v zaprtem prostoru ne obstaja direktna vidna linija. Testna povezava na TU Graz poteka od priključka na splošno omrežje stavbe, ki je pritrjen na steno v prvi medetaži, do ponavljalca signala, ki je pritrjen v pritličju na steni stopnišča. Ponavljalec signala predstavljata dve neposredno povezani sprejemno – oddajni enoti. Kar ena enota sprejme, druga odda in obratno. Druga enota ponavljalca je postavljena pravokotno na prvo in je usmerjena naprej proti terminalu, ki sproti prikazuje sprejeti signal. Omenjeno povezavo sestavljajo štiri preproste sprejemno – oddajne enote, ki imajo kratek doseg, saj znotraj stavbe nanje ne vplivajo vremenski pojavi, sama

razdalja med enotami pa je zelo kratka. Problem pri teh enotah je edino ob izpadu napajanja ali če se katera od enot premakne. Za tako kratke razdalje, okrog 5 m zračne linije, morajo biti enote zelo natančno postavljene, saj je žarek svetlobe, ki pride iz prve enote do druge še relativno ozek. Shema postavitve je prikazana na sliki 6.

Za povezavo torej skrbijo manjše in manj zmogljive sprejemno – oddajne enote, ki imajo doseg do 100 m. Te enote imajo oddajni del, ki ga sestavljajo tri diode LED. Slednje oddajajo infrardečo svetlobo z valovno dolžino 850 nm. Sprejemni del je sestavljen iz ene silicijeve foto diode in pasovno prepustnega filtra. Žarki treh oddajnih diod se torej lovijo na eno sprejemno diodo, kar ni isto kot večpovezovalni sistemi, pri katerih bi se trije oddani žarki lovili posamično na tri sprejemne diode. Pri 100 m razdalje in idealnih vremenskih pogojih prenos doseže hitrosti okrog 10 Mbitov na sekundo.

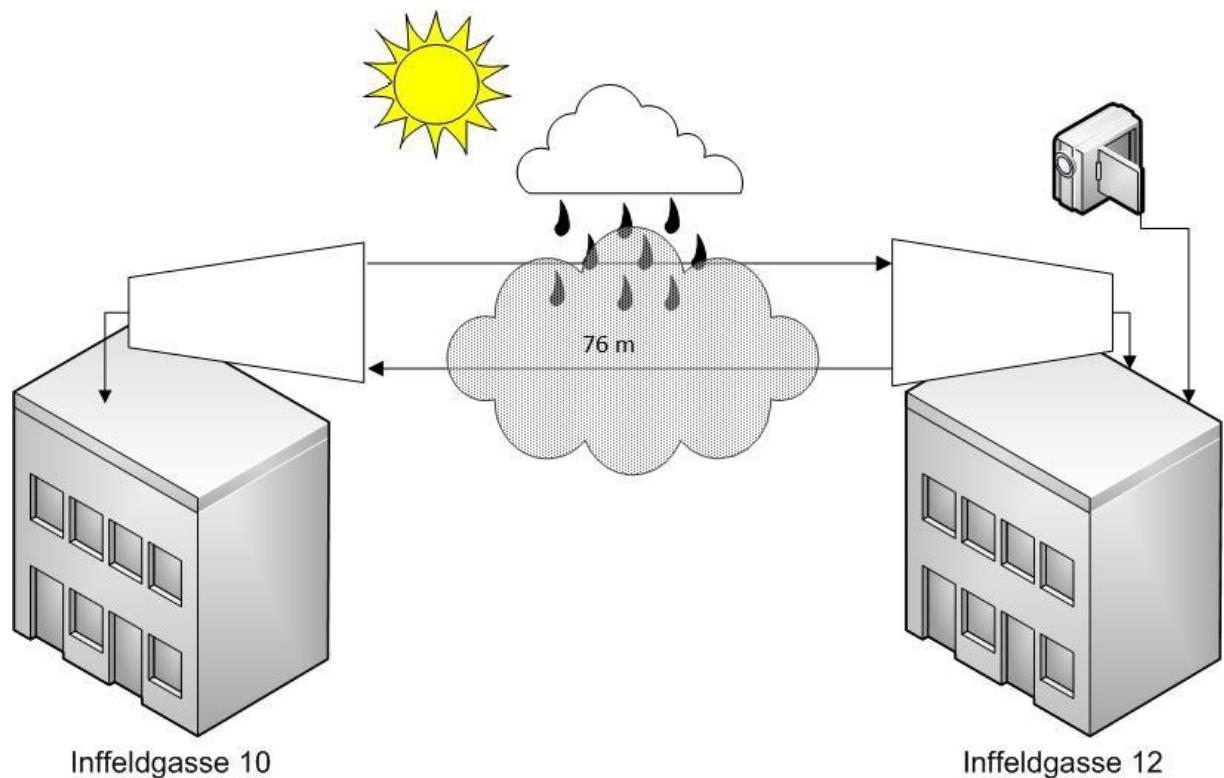


Slika 6: Shema najkrajše povezave.

3.2.2. Postavitev 2

Na strehi iste stavbe se nahaja sprejemno – oddajna enota, ki ima vzpostavljeno povezavo s sosednjo stavbo na naslovu Inffeldgasse 10. Poleg sprejemno – oddajne enote je nameščena še digitalna video kamera. Kamera je namenjena spremljanju vremenskih pojavov. Shema postavitve je prikazana na sliki 7.

Ta povezava je namenjena za testiranje, kako se optična povezava obnaša ob različnih vremenskih razmerah pri krajših razdaljah. Sprejemno – oddajni enoti so pri različnih testiranjih skozi čas menjali. S tem se je testiralo tudi, kakšen in kako močan mora biti žarek svetlobe, da ga pri tako kratki povezavi ne prekine še tako zelo megleno vreme, ki se velikokrat pojavi v Gradcu. Ta povezava je služila za precej meritev pri raziskavah, kjer je bil končen cilj simulacija belega šuma v primeru različnih vremenskih pojavov.



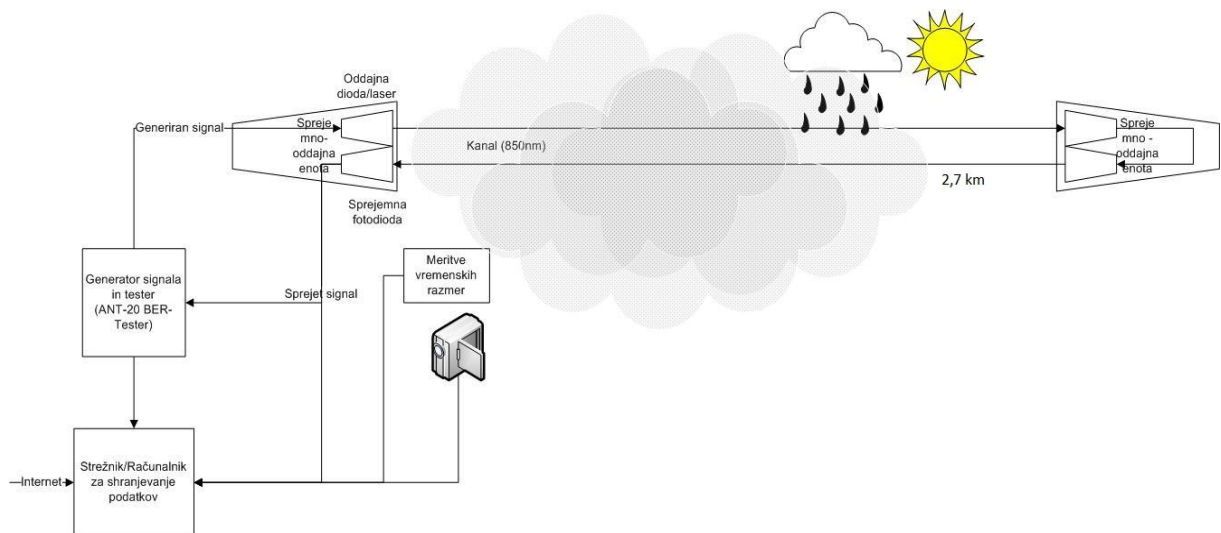
Slika 7: Skica postavitve povezave med stavbama univerze.

Med stavbama je povezava vzpostavljena z nekoliko večjima enotama, ki so jih sestavili sami v laboratoriju na TU Graz. Le te imajo osem oddajnih diod LED in en sprejemni del. Sestavili

so tudi enoto, ki ima namesto diod LED laserske diode in s tem se poveča doseg na okrog 800 metrov. Sprejemna dioda in njena sprejemna leča je nameščena na sredini, saj je leča največja od vseh. Na levi in desni strani sprejemne leče so nameščene oddajne leče, po štiri na vsaki strani. V tem primeru se torej vsota vseh osmih oddanih žarkov iz prve enote lovi v veliko sprejemno lečo na drugi enoti. Vse enote imajo na zadnji strani nameščen voltmeter, s katerim je lažje vzpostaviti kanal. Ko sta enoti postavljeni v ravni liniji ena proti drugi, je tudi sprejem signala najmočnejši in voltmeter pokaže največjo napetost. Voltmeter ima vlogo indikatorja najbolj idealne postavitve, kar je zelo pomembno, ko se enoti postavljata, ali ko se jima popravlja položaje.

3.2.3. Postavitev 3

Na stavbi na naslovu Inffeldgasse 10 je postavljena tudi nekoliko večja in bolj zmogljiva sprejemno-oddajna enota, ki je usmerjena proti observatoriju Lustbuehel. Ta povezava predstavlja najdaljšo prostozačno optično povezavo, ki so jo vzpostavili na TU Graz z namenom testirati samo tehnologijo in njeno zmogljivost. Vsa glavna testiranja so potekala ravno na tej povezavi. Tudi ta povezava ima poleg sprejemno-oddajne enote nameščeno digitalno kamero za spremljanje vremena. Poleg kamere se vreme spremlja še z različnimi drugimi napravami, ki priskrbijo natančne podatke v konkretnih številkah. Postavitev je skicirana na sliki 8.



Slika 8: Skica postavitve 2,7 km dolge povezave iz TU Graz do observatorija.

Razdalja med enotama meri 2,7 km zračne razdalje. Enoti se imenujeta Multilink 155F in jih je izdelal nemški proizvajalec GoC AG (polno ime podjetja je Gesellschaft für optische Communication GmbH). Oddajni del enote je sestavljen iz štirih oddajnikov, sprejemni del iz štirih sprejemnikov. Oddajniki so štirje polprevodniški laserji z vertikalno resonančno votlino (VCSEL) v obliki laserskih diod in sevajo svetlobo z valovno dolžino 850 nm. Sevalni kot posamezne diode je 2,5 mrad. Vsaka dioda seva z močjo 2 mW [16]. Pred vsako od teh štirih oddajnih diod je nameščena optična konveksna leča premera 25 mm. Enota sprejema svetlobo z valovno dolžino od 780 do 900 nm. Sprejemajo jo štiri Si-APD plazovne fotodiode z občutljivostjo -41 dBm. Občutljivost nam pove minimalno velikost svetlobnega toka, ki ga fotodiode še zazna. Posamezna dioda ima sprejemni kot svetlobe 2 mrad, pred njo pa je nameščena optična konveksna leča premera 80 mm. Opisani Multilink enoti med seboj ustvarita kanal, ki lahko prenaša podatke s hitrostmi do 155 Mbit/s pri idealnih pogojih. Posamezna enota ima ohišje z merami 290 x 290 x 470 mm in težo okrog 12 kg. Na sprednji strani so nameščene oddajne in sprejemne leče, na zadnji strani pa so nameščeni indikatorji posameznih stanj. Poleg indikatorja vklopljenosti naprave, obstaja še indikator Test in indikator delovanja optičnih naprav. Pomembna sta indikatorja TX in RX. Indikator TX je namenjen optičnemu vlaknu, ki vodi do oddajnika (Transmitter fiber), indikator RX pa optičnemu vlaknu, ki vodi iz sprejemnika (Receiver fiber). Za sprejem podatkov iz omrežja je dodan sprejemnik za optična vlakna. To je silicijeva dioda PIN, ki sprejema valovne dolžine svetlobe od 1270 do 1350 nm, njena občutljivost pa je v polju od -27 do -15 dBm. V omrežje se podatke oddaja po optičnih vlaknih z oddajnikom, ki ga predstavlja dioda LED, ki oddaja svetlobo z valovno dolžino 1300 nm in močjo -20 dBm.

Enota na observatoriju med obdobji meritev ni bila priključena v nikakršno zunanje omrežje, ampak je imela vlogo povratne zanke, kar pomeni, da je bil sprejet signal iz sprejemnega dela enote neposredno povezan z oddajnim delom enote. Pri tem je bila seveda zaželeno čim manjša zakasnitev. Torej na sprejemno – oddajni enoti na observatoriju se ni zajemalo nikakršnih meritev, niti se ni kakorkoli spreminjalo ali popravljajo signala, ki je bil sprejet in poslan nazaj enoti na stavbi TU Graz. Enota na observatoriju je bila tehnično enaka enoti na Inffeldgasse 10. Vse meritve so potekale na strani enote na TU Graz.

Signal, ki je bil predmet večine dalj trajajočih meritev, je bil generiran z napravo za analiziranje optičnih omrežij ANT-20 BER-Tester. Naprava ima zmožnost opravljanja analize formata sinhronega prenosa podatkov SDH SONET in analize asinhronih omrežij s prenosno tehnologijo ATM. Namenjena je za pomoč pri vzdrževalnih delih, odpravljanju težav, servisnih delih in delom z omrežji na splošno. Uporablja se pri končnih testiranjih, preverjanjih in ostalih operacijah na glavnih vodih. Vključuje vse standardizirane vmesnike. Lahko se ji doda poseben modul za širokopasovne povezave. Z njim lahko merimo od preprostih testov bitne napake (BERT) do kompleksnih sinhronizacijskih testov.

Med testnimi obdobji so se vsi podatki in meritve iz testerja zapisovali v posebej za to namenjen računalnik, ki je bil povezan s celotno infrastrukturo. Računalnik se nahaja v

laboratoriju v stavbi pod sprejemno – oddajno enoto, kjer imajo svoje dislocirane prostore člani skupine za optične povezave. Naprava ANT-20 BER-Tester je pri tej povezavi testirala bitne napake (BER). Na računalniku, ki je hranil in sprejemal podatke, so se prejeti podatki beležili z aplikacijo Futurelink vsaki dve minuti. Poleg podatkov, ki so se pošiljali po vzpostavljenem kanalu, so se shranjevali tudi podatki o vremenu. Vsako minuto se je shranila slika zajeta z mrežno kamero, ki je nameščena poleg FSO enote in usmerjena proti drugi enoti. S temi slikami se je kasneje lahko določilo, če je res vreme krivo za prekinjen kanal. Poleg tega so se zajemali tudi podatki o vremenu. Merilo se je temperaturo, hitrost in smer vetra, vlažnost in količino dežja. Vse te podatke se potrebuje, da se lahko rangira vreme. Namreč zanesljivost povezave ni enaka pri rahlo deževnem vremenu in pri močnih nevihtah. Poleg tega so tudi strukture deževnih kapljic različno velike.

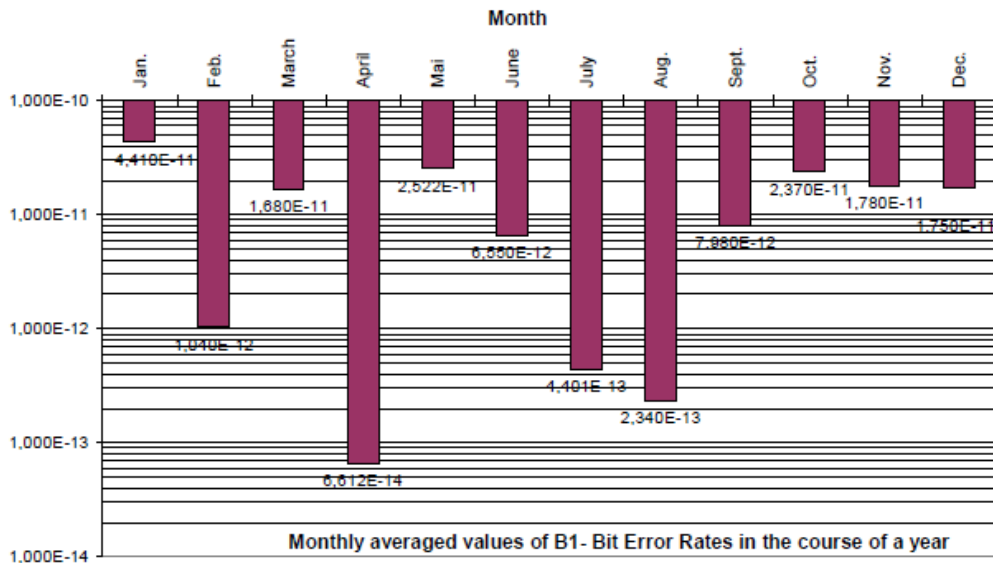
3.3. Testiranje

Vremenske razmere v Gradcu so zelo različne. Megla je del vsakdana od zgodnje jeseni do pozne pomladi. Včasih se meglice pojavijo tudi med poletnimi nevihtami. Ker so teoretične raziskave kazale, da megla najbolj oslabi optično povezavo in ker Gradcu ne primanjkuje le te, je bilo to mesto tudi izbrano za merjenja in raziskave. Vremenski pojavi, ki vplivajo na kanal, so lahko zelo različni, od dežja, snega, neviht, megle do vpadnega kota sonca in vetra. Pri točno določeni postavitvi je pot sonca in njegov vpliv na meritve vedno enak. Ostale spremembe vremena se da ugotoviti iz meritev, ki so se opravljale. Zanesljivost in dostopnost se je pridobila s testiranjem bitov, ki so opravili krožno pot in prispeli nazaj po kanalu.

Meritve, ki so potekale od oktobra 2000 do oktobra 2001, so dokazale, da za optični kanal največjo oviro predstavlja megla. Kanal poleg megle prekine tudi sneg, vendar se pri meritvah ni dalo pokazati, koliko vpliva na dosegljivost, saj v Gradcu sneg skoraj vedno spremlja tudi megla. Dež ima pri vplivu na dosegljivost precej manjši vpliv kot megla, kar je ravno obratno kot pri mikrovalovih. Za meritev je bila izbrana zelo dolga povezava, da so se bolje videli vremenski vplivi. Pri 2,7 km dolgi povezavi se je videlo tudi, kako lepo vreme oziroma čista atmosfera zavira žarek na poti in kako je vse to povezano z letnimi časi, dnevnimi spremembami med dnevom in nočjo ter predelom postavitve, v tem primeru z mestom Gradec.

Rezultati raziskave na najdaljši povezavi, ki so se shranjevali na računalniku v laboratoriju skupine OptiKom, so bili nato obdelani in ovrednoteni, da so se lahko primerjali v časovni odvisnosti. Prva in zelo pomembna ugotovitev je bila, da povprečna napaka skozi celotno merjenje ni bila velika, če bi jo primerjali z ostalimi prostozračnimi komunikacijskimi tehnologijami. Poleg tega se je treba zavedati, da v tem primeru ni bil implementiran noben mehanizem za kodiranje komunikacijskega kanala, kar bi še zmanjšalo število napak. V zelo slabem vremenu je bila izmerjena napaka BER okrog 10^{-8} . Časovna obdobja, kjer je bila napaka tako velika so bila kratka. Ob lepem vremenu je bila izmerjena napaka 10^{-12} . Slednje pomeni, da je bilo pri hitrosti pošiljanja podatkov okrog 155 Mb na sekundo, poslanih manj

kot 8 napačnih bitov čez cel dan. V povprečni napaki je bil najboljši mesec april, ki je imel samo $6,6 \cdot 10^{-14}$ delež bitnih napak, najslabši pa je bil mesec januar, ki je imel $4,4 \cdot 10^{-11}$ delež bitnih napak [17]. Napake BER za ostale mesece so prikazane v grafu na sliki 9.

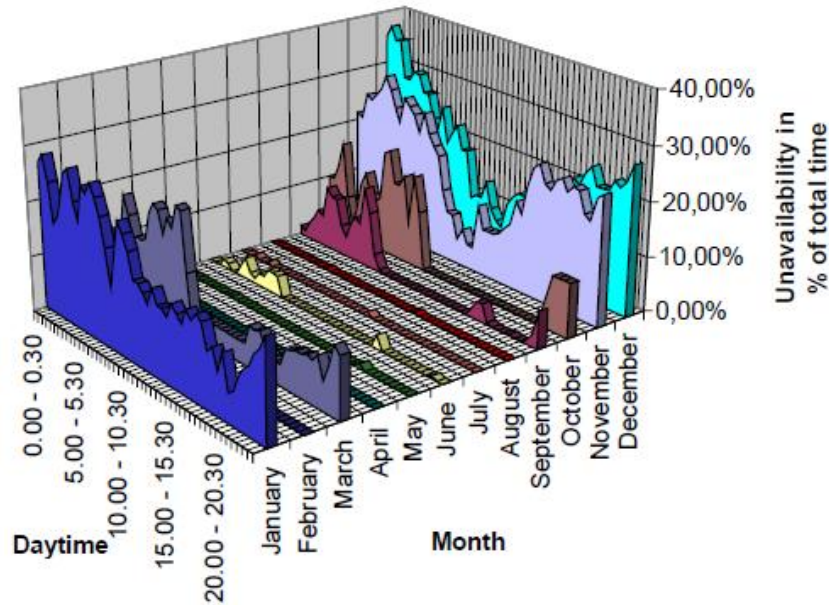


Slika 9: Meritve napake BER skozi obdobje enega leta [17].

Iz meritev raziskave so preračunali tudi razpoložljivost povezave skozi leto. V povprečju skozi celo leto merjenja, je bila 2,7 km dolga povezava razpoložljiva 94 odstotkov celotnega časa. Iz rezultatov je bilo razvidno, kako zelo vremenski pojavi vplivajo na optične povezave. Razvidna je tudi povezava med letnimi časi in vremenskimi pojavi. Jeseni in pozimi je bila zaradi megle povezava večkrat prekinjena kot pomladi in poleti. V jesenskem in zimskem času je bila lepo razvidna tudi odvisnost od dela dneva. Megla se začne pojavljati v popoldanskem času in se gosti ter traja čez noč in jutro. Šele okrog poldneva, ko posveti sonce, se umakne. Torej največ možnosti za prekinjeno povezavo je bilo od poznega večera do zgodnjega jutra, ko je megla najgostejša. Graf nedosegljivosti po mesecih in urah je podan na sliki 10.

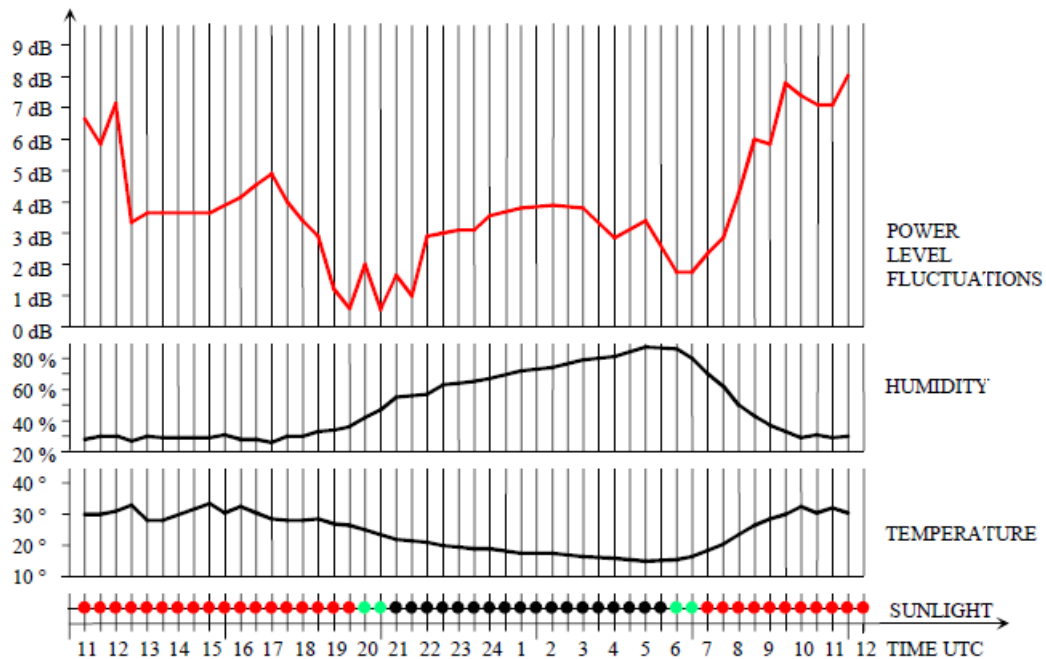
Meritve so se začele julija 2000. Pri teh meritvah je bila ideja prostozačnih optičnih povezav sicer že precej poznana, vendar slabo raziskana. Vpliv vremena na optično povezavo še ni bil praktično raziskan in testiran na opremi, ampak so se rezultati zgolj predvidevali glede na znanje iz teorije. Raziskovalci s TU Graz niso imeli nobenih zanesljivih dejstev, kaj je boljše in kaj slabše. Predvsem se ni vedelo, kako se žarek obnaša ob različnih vremenskih pojavih,

zato so se njihove prvotne raziskave usmerjale na zanesljivost in dostopnost svetlobne povezave, na vpliv različnih vremenskih pojavov na kanal, na vpliv pojavov v zraku na kanal, itd.



Slika 10: Nedosegljivost optične povezave v odstotkih skozi celo leto meritev razdeljeno po urah [17].

V poletnem času ob odsotnosti megle so se zbirale posebne meritve za merjenje turbulenc v zraku. Turbulence se na taki višini v atmosferi večinoma pojavljajo zaradi vročine, kar je še dodaten razlog, da je meritev potekala v poletnem času, točneje avgusta 2001. Meritev je potekala dva dneva. Rezultati meritev so prikazani na sliki 11. Vreme je bilo brez oblačnosti, veter je pihal pod 2 m/s, vlažnost je bila precej visoka. V tem primeru so testni signal predstavljali preprosti pulzi, ki so se pošiljali po zanki s frekvenco oddajanja 6 MHz. Moč sprejete svetlobe se je prikazovala na osciloskopu, da se je nazorno videlo, kdaj moč pojenja in kdaj se krepi. Lepo so vidne oslabitve zaradi izgube moči žarka med zračnimi žepki z vročim zrakom, ki predstavljajo pojav zračnih turbulenc in svetlobo lomijo v druge smeri ter tako glavna linija zgublja fotone. Izkazalo se je, da sta dve periodi, ena sredi dneva in ena sredi noči, ko je največ sprememb v zraku in da sta dve periodi mirnega zraka ob sončnem vzhodu in ob sončnem zahodu.

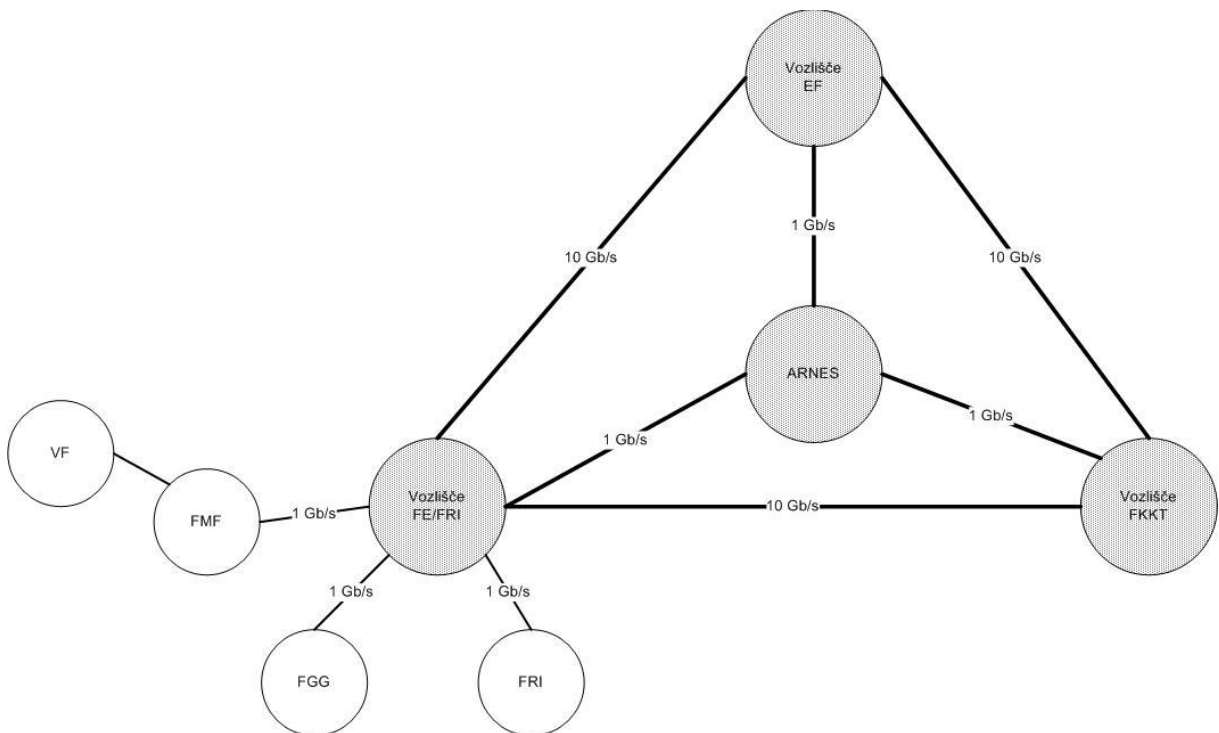


Slika 11: Rezultati meritve vpliva turbulenc na optično povezavo. Prvi graf predstavlja prejeto energijo. Drugi in tretji graf predstavljata meritve vlažnosti in temperature, zadnji pa sončno svetlobo skozi dan [17].

V težnji po izboljšanju dosegljivosti in zanesljivosti kanala, je treba vedeti, kaj vse vpliva in kako se odražajo posamezni vplivi, zato je veliko raziskav in meritev šlo v smeri modeliranja kanala in s tem vremenskih pojavov oziroma v tem primeru ovir svetlobnega snopa od ene enote do druge. Med mojim obiskom se je nekaj podiplomskih študentov ukvarjalo z raziskavami modeliranja kanala, kar je zadnje čase najboljše raziskava, kar se tiče FSO na TU Graz. Ukvarjajo se tudi z modeliranjem in kodiranjem samega signala. Veliko pozornosti pa zadnje čase namenjajo tudi možnosti kombinacije prostozačne optične povezave s povezavo z radijskimi valovi. Namreč radijski valovi so manj občutljivi pri megli in bolj pri dežju, kar je ravno obratno kot optična povezava. Torej iščejo načine, da bi vzpostavili povezavo, ki bi ob izpadu optične povezave preklopila na alternativno. Pri tem je seveda potrebno dobro poznati lastnosti obeh načinov povezovanja, njihove slabosti in prednosti.

4. Študija izvedljivosti prostozačne optične povezave med izbranimi lokacijami Univerze v Ljubljani

Med fakultetami Univerze v Ljubljani obstaja omrežje, ki se imenuje Metulj. Omrežje Metulj je namenjeno povezovanju in izmenjevanju podatkov med fakultetami ter povezovanju fakultet z internetom. Omrežje ima tri glavna vozlišča, ki so med seboj povezana z optično povezavo s hitrostjo 10 Gb/s. Hrbtenico omrežja torej tvorijo vozlišče FE/FRI (Fakulteta za elektrotehniko/Fakulteta za računalništvo in informatiko), vozlišče FKKT (Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo) in vozlišče EF (Ekonomska fakulteta). Ta tri vozlišča so priključena na omrežje ARNES, vsaka s svojo povezavo s hitrostjo 1 Gb/s, kot je prikazano na sliki 12. Na vsako od teh treh vozlišč so priključene posamezne fakultete, večinoma s povezavo s hitrostjo 1Gb/s [18].



Slika 12: Skica dosedanjega omrežja med glavnimi vozlišči, ARNES-om in izbranimi fakultetami.

V tem diplomskem delu sem vzela vozlišče FE/FRI in tri fakultete, ki so povezane nanj: Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo (v nadaljevanju FGG), Fakulteto za matematiko in fiziko (v nadaljevanju FMF) in Veterinarsko fakulteto (v nadaljevanju VF). Shema trenutne postavitve povezav med njimi in glavnimi vozlišči je prikazana na sliki 12. Preučila bom, če

obstaja možnost, da se obstoječe povezave med njimi nadomestijo s prostozračnimi optičnimi povezavami. Za začetek potrebujemo osnovne podatke o višini in legi stavb, o razdalji med njimi, o ovirah med njimi. Nato nas bo zanimalo vreme na tem delu Ljubljane, predvsem koliko je sončnih in koliko meglenih dni. Potem pa sledijo še ostali dejavniki, ki lahko vplivajo na povezavo.

4.1. Prostorska umestitev stavb

Zračne razdalje med posameznimi stavbami sem izmerila kar na zemljevidu, saj me ne zanimajo zelo natančno, ampak bolj grobe ocene, da vem, kako zmožljive morajo biti sprejemno – oddajne naprave. Izmerila sem najkrajše možne razdalje, ki pa verjetno ne bodo vedno najprimernejše za postavitve enote, zaradi drugih dejavnikov (ovire, slabo mesto pritrditve stojala enote, itd.). Med FGG, ki stoji na naslovu Jamova cesta 2, in Fakulteto za računalništvo in informatiko (v nadaljevanju FRI), ki se nahaja na Tržaški cesti 25 je najkrajša direktna zračna razdalja dolga okrog 360 m, med FRI in prvo stavbo (stavba fizike) fakultete FMF, ki je locirana na Jadranski cesti 19, je 170 m (razdalja bi lahko bila krajša, od kraka na južni strani je samo 150 metrov, vendar je ta del stavbe prenizek), med obema stavbama FMF je okrog 64 m, med drugo stavbo (stavba matematike se nahaja na Jadranski cesti 21) FMF in VF (njen naslov je Gerbičeva ulica 60) pa je dobrih 246 m. S tega vidika največ pozornosti zahteva povezava med FRI in FGG, saj zaradi svoje dolžine zahteva nekoliko boljše sprejemno – oddajne enote ali pa namestitev vmesnih enot, ki imajo samo vlogo ponavljalca signala.

Na sliki 13 je opaziti, da sta povezavi FRI – FMF in med obema stavbama FMF usmerjeni pretežno sever – jug. Postavitve enote, ki gleda proti jugu, mora biti zelo skrbno in premišljeno izbrana, da ima čimmanj vpadle sončne svetlobe. Na njej je pametno imeti tudi malo večje senčnike, ki z več strani zakrivajo sprejemno lečo (potrebno je upoštevati pot sonca od vzhoda proti zahodu in njegovo svetlobo z vseh možnih vpadnih kotov).

Višine posameznih stavb sem poizkušala pridobiti s povpraševanjem raznih delavcev na posameznih fakultetah. Tam, kjer podatkov nisem mogla pridobiti, sem višino stavb ocenila glede na število nadstropij in približno višino posameznega nadstropja. Na FRI sem dobila podatek, da je streha stavbe visoka od 23 metrov na robu strehe do 24 metrov v slemenu. Na FMF nisem dobila podatka o višini, sem pa zato pridobila podatek o višini posameznega nadstropja. Prva stavba, stavba fizike na FMF ima visoka nadstropja, ki merijo približno 3,5 m. Nad pritličjem se nahajajo še štiri nadstropja, kar pomeni, da je stavba visoka okrog 17, 5 metrov. Na sredini stavbe je še eno nadstropje, ki ne sega čez celo stavbo in v primeru teh izračunov je stavba tam visoka 21 metrov. Druga stavba, stavba matematike ima enako število nadstropij, vendar je na pogled nekoliko višja. Stavba VF je najnižja izmed vseh. Del stavbe, ki je najbližje stavbi FMF ima samo tri nadstropja in pritličje, drugi del stavbe ima eno nadstropje več. Če privzamem, da je tu nadstropje visoko 3 metre, znese celotna višina

zemljevidom je označena tudi ta možnost. V tem primeru se 360 metrov dolga povezava razdeli na povezavo med FRI in vmesno stavbo z dolžino približno 125 metrov ter na povezavo med to stavbo in FGG z dolžino približno 240 metrov. Dolžini teh dveh povezav sta odvisni, na kateri del stavbe bi se postavili vmesni enoti. Zaželena je taka postavitev, da sta obe povezavi čim krajši.

4.2. Tehnične karakteristike

Za postavitev takega sistema bi bilo potrebnih kar nekaj predhodnih testiranj. Za natančne tehnične karakteristike bi bilo potrebno pregledati tudi sedanjo opremo. Od sprejemno – oddajne enote do usmerjevalnika ali stikala gredo podatki po optičnem kablu. Usmerjevalna naprava mora imeti torej ustrezne priključke in mora biti dovolj zmogljiva, da lahko dela s hitrejšimi povezavami.

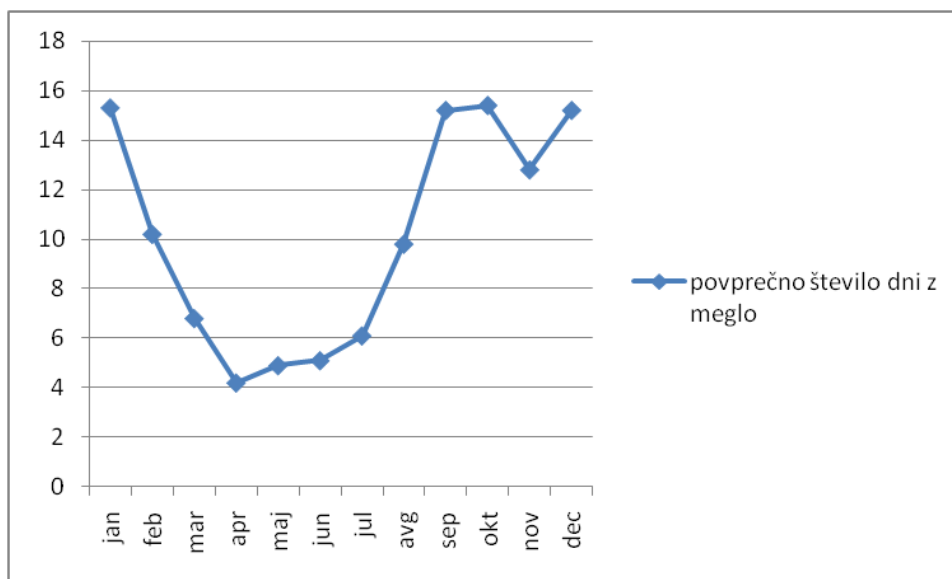
Glede na to, da je večina razdalj daljša od 100 metrov (glej sliko 14) in glede na trende pri proizvajalcih enot, bi priporočala sprejemno – oddajne enote, ki oddajajo in sprejemajo svetlobo z valovno dolžino 1550 nm. Le ta je v okviru varnostnih standardov lahko do 50 krat močnejša od valovnih dolžin okrog 850 nm. Razdalja je tudi tista, ki se nagiba k izbiri enot, ki uporabljajo laserske diode in ne običajnih diod LED. S testiranjem bi bilo potrebno še preveriti in preračunati, če je potrebno imeti več-povezovalne enote ali zadostujejo eno-povezovalne enote.

Večino sprejemno – oddajnih enot bi namestila na strehe stavb. V teh stavbah se dnevno izmenja precej ljudi, ki bi lahko premaknile ali poškodovale enote. V nekaterih primerih pa je streha najprimernejši kraj zaradi višine postavitve. Te enote bi morale biti odporne na vse zunanje vplive. Leče bi morale biti zaščitene pred vplivi snega, dežja in direktne sončne svetlobe. V Ljubljani se velikokrat zgodi, da v snežnem vremenu piha tudi veter, kar pomeni, da podaljšan zgornji del ohišja ne bi zadostoval za zaščito leč pred nabiranjem snega na njih. Komercialne enote imajo možnost odmrzovanja leč, kar bi tu predstavljalo solidno rešitev.

Pred sončno svetlobo bi zadostovali senčniki, ki bi bili povečani pri enotah, ki oddajajo proti jugu. Ker so te enote nekoliko dražje, bi se v nekaterih primerih dalo enote postaviti znotraj stavb. Stavbi FMF sta vzporedni, tako da gotovo obstaja varna soba v vsaki od stavb, kjer bi se dalo enoto namestiti na okno. Varna soba pomeni, da do nje nimajo dostopa vsi, ampak samo ljudje, ki vedo kako ravnati z enoto in ki je ne bodo poškodovali ali je premikali. Stavba matematike je precej visoka in med njo in stavbo VF ni višjih stavb, tako bi bila tudi tu možnost za notranjo postavitev. Možnost notranje postavitve odpade pri povezavi med FRI in vmesno stavbo pri povezavi proti FGG. Visoke stavbe med njima zahtevajo nujno postavitev na strehi FRI. V tem primeru bi bilo pametno postaviti enoto še na kakšen podstavek, ki bi enoto še nekoliko dvignil. Enoto s podstavkom bi namestila na skrajni severovzhodni rob vzhodnega trakta stavbe. S tem se izognemo delavcem, ki bi prekinjali povezavo ob popravilih na strehi in turbulencam, ki nastajajo nad vročo streho poleti.

Večina padavin pade, ker se zračne gmote zadenejo v pregrado, ki jo predstavljajo Kamniško – Savinjske Alpe. Za subalpsko podnebje velja podobno kot za alpsko, da največja količina padavin pade jeseni, nekoliko manj pozno pomladi in začetek poletja, ostalo je porazdeljeno čez leto. Za prikaz povprečnih podnebnih razmer se uporablja 30-letno obdobje, da se izogne napačni interpretaciji razmer zaradi vplivov različnih cikličnih razmer. Večina podatkov, ki sem jih dobila, je bilo izmerjenih na letališču Jožeta Pučnika od leta 1963 [20]. Vzela sem povprečje zadnjih 30 let, torej od leta 1979 do 2009. Podatki o povprečnem številu dni z meglo in o temperaturi so merjeni med leti 1961 in 1990 v Ljubljani.

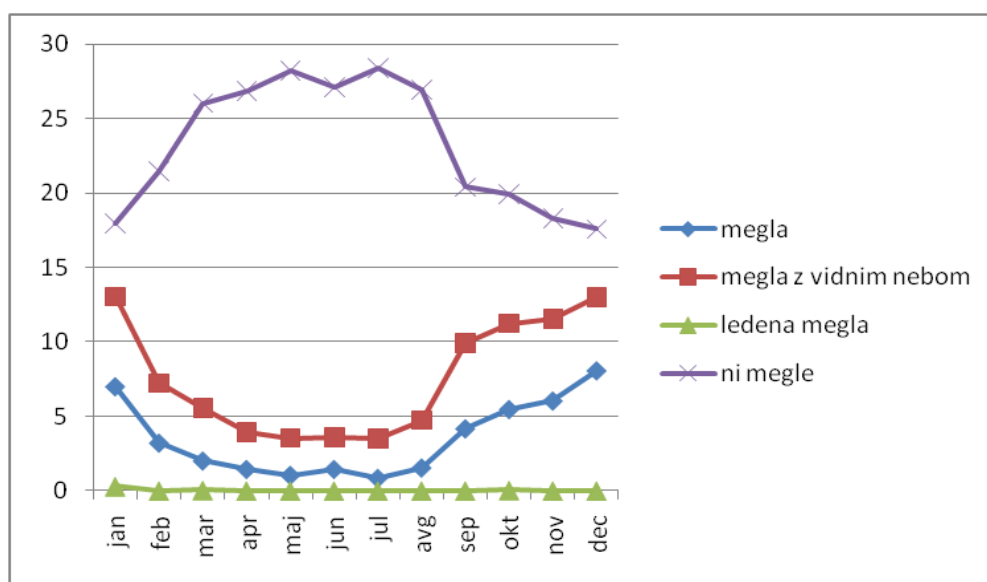
Za prostozačno optično povezavo je najpomembnejši podatek, koliko in kako gosta megla se zadržuje na mestih, kjer bi želeli postaviti povezavo. Ljubljana ima na leto povprečno 120,8 dni z meglo [21]. To je približno tretjina vseh dni v letu. Kako so ti dnevi razporejeni po mesecih, je prikazano v diagramu na sliki 15.



Slika 15: Povprečno število dni z meglo po mesecih za Ljubljano.

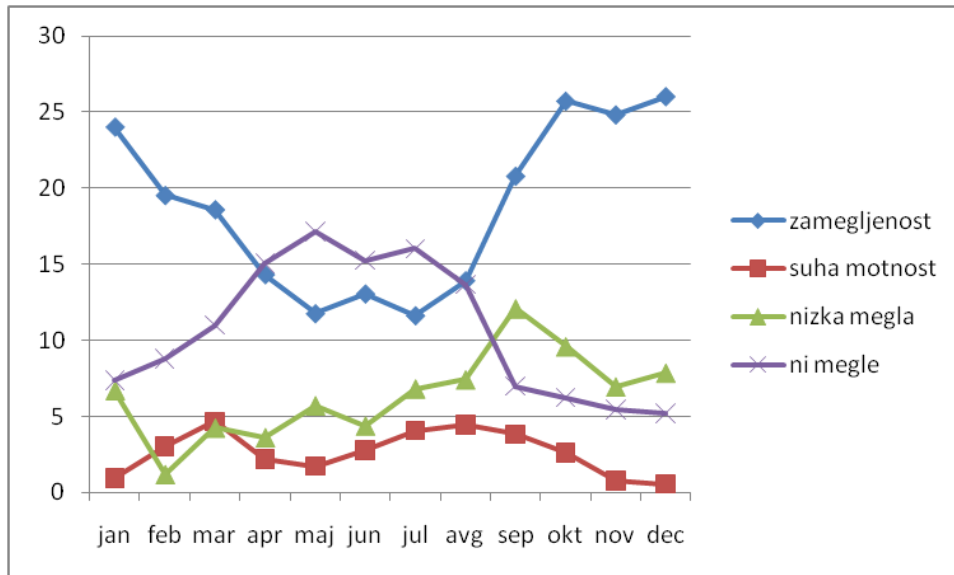
Sami podatki o številu dni so premalo, da bi lahko sklepali, če je gostota megle dovolj velika, da bo predstavljala oviro za prostozačno optično komunikacijo. Več nam povejo podatki, ki so bili izmerjeni na letališču Jožeta Pučnika in podajajo za vsak dan, katere vrste megle je bilo zaznati. Lahko se v enem dnevu pojavlja samo ena vrsta megle ali različne kombinacije med njimi ali pa nobena. S podatki za zadnjih trideset let sem naredila graf, ki za vsak mesec prikazuje povprečno število dni z določeno vrsto megle in povprečno število dni, v katerih cel dan ni bila zaznana nobena vrsta megle. Najvišja krivulja v grafu na sliki 16 nam predstavlja

število dni brez megle. Megla in megla z vidnim nebom sta vrsti megle, ki obe predstavljata drobne vodne kapljice, ki lebdijo v zraku in zmanjšujejo vodoravno vidnost pod 1 km. Razlika med njima je v tem, da se pri prvi vrsti vidijo oblaki ali nebo. Pod ti dve vrsti spada tudi megla, ki jo veter nosi v pramenih. Najmanj pogosta je ledena megla, ki se pojavlja kot množica drobnih ledenih kristalčkov, ki lebdijo v zraku in zmanjšujejo vidnost v najnižji plasti. Ledena megla za postavitev povezav med izbranimi fakultetami ni pomembna, saj se pojavlja preizko. Za ostali dve vrsti lahko iz grafa vidimo, da se najpogosteje pojavita decembra in januarja ter v jesenskih mesecih.



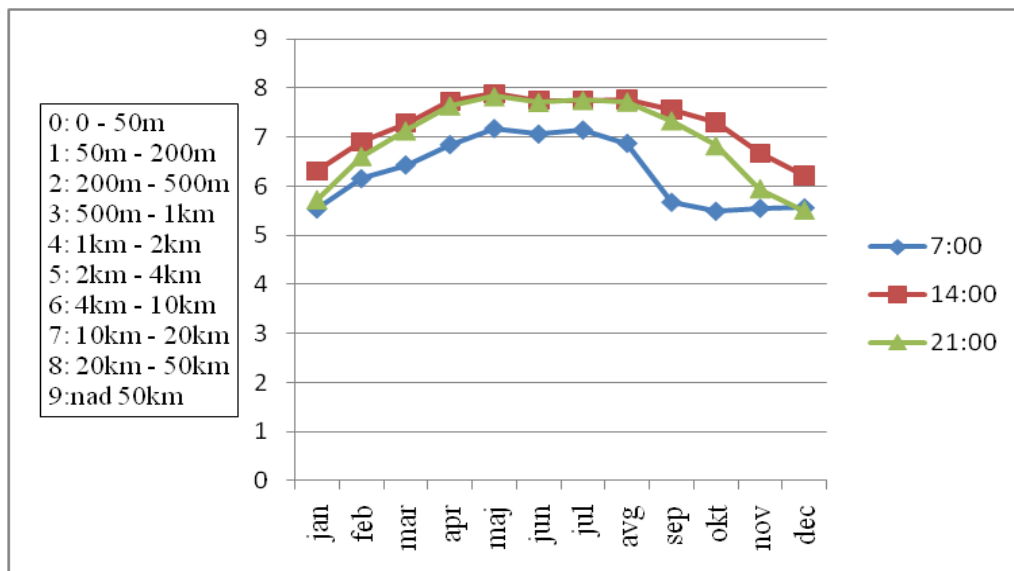
Slika 16: Povprečno število dni z določenim tipom megle ali brez megle v zadnjih 30 letih na letališču.

Poleg megle na letališču merijo tudi meglice. Zamegljenost štejejo, kadar so v zraku vodne kapljice, ki so manjše kot pri megli, ali pa majhni hidroskopski delci, ki zmanjšujejo vodoravno vidnost, ki pa je še vedno večja od 1 km, vendar manjša od 10 km. Kadar je ozračje motno in je vidnost zmanjšana zaradi drobnih delcev prahu ali saj (s prostim očesom so ti delci nevidni), se ta vrsta meglice označi kot suha motnost. Kadar se meglice zadržujejo pri tleh, nižje od človeka, nad njimi pa je vidnost večja od 1 km, ta pojav imenujemo nizka megla. Povprečno število dni v posameznem mesecu za vsako vrsto meglice posebej je označeno v diagramu na sliki 17.



Slika 17: Povprečno število dni z meglicami v zadnjih 30 letih na letališču.

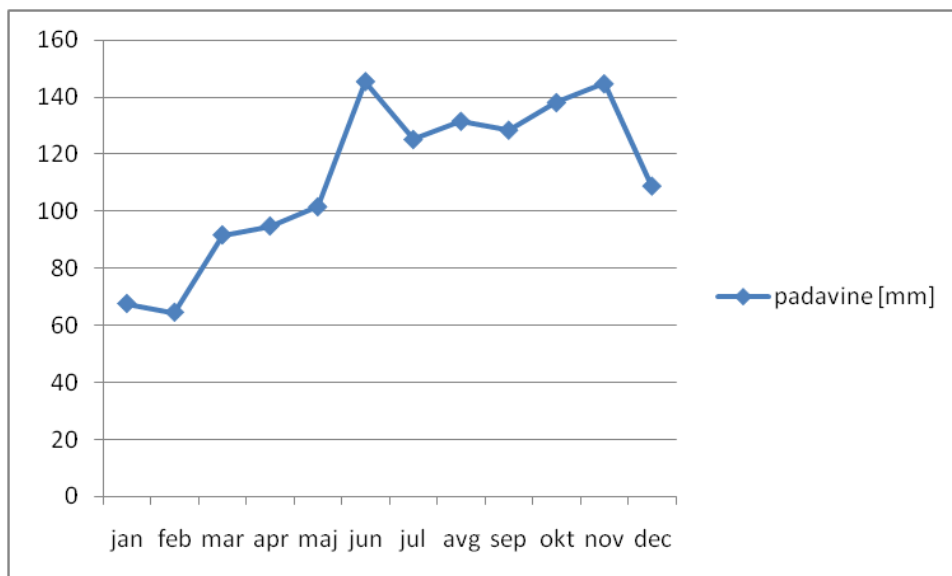
Še bolj natančno karakteristiko megle dobimo s podatki o vidljivosti. Na sliki 18 so prikazana mesečna povprečja zadnjih tridesetih let za tri meritve na dan.



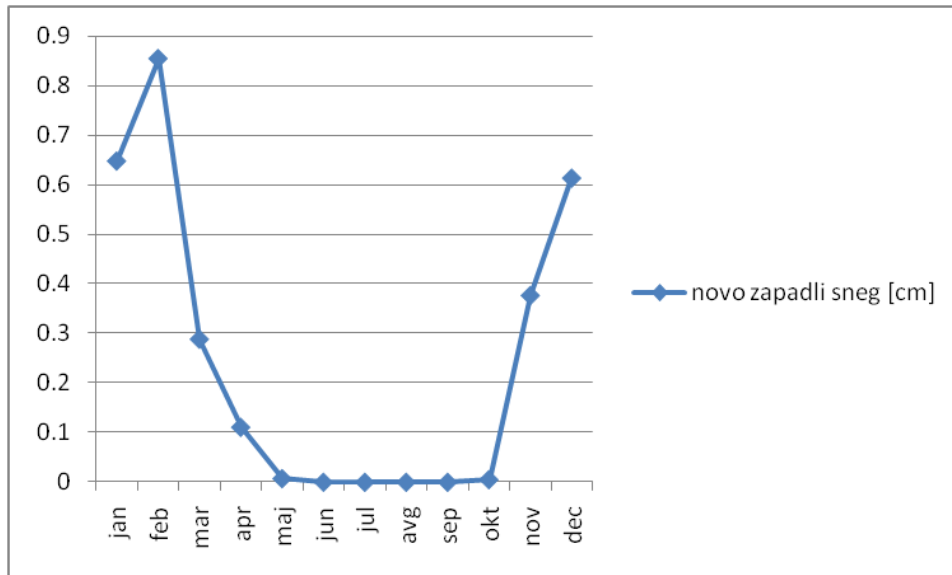
Slika 18: Povprečna vidljivost v zadnjih 30 letih na letališču.

Prva meritev se na letališču meri ob sedmih zjutraj, naslednja ob dveh popoldne in zadnja ob devetih zvečer. Najslabša vidljivost je v zgodnjih jutranjih urah, ko se megla še zadržuje nizko. Do druge meritve se vidljivost že precej izboljša, razen v mesecih januar in december. Najdlje se vidi ob dveh popoldan, ko je povprečna vidljivost vedno nad 4 km. Januarja in decembra je potrebno upoštevati tudi sneg, ki precej zmanjša vidljivost. Septembra, oktobra in novembra so krivec za zmanjšano vidljivost obilne padavine, ki so lahko tako v obliki dežja kot snega. Meglo bi v tem grafu lahko našli kot vzrok za slabšo vidljivost predvsem v razliki med jutranjo meritvijo in drugima dvema.

Dež in sneg vplivata na prostozaračno optično povezavo bolj malo. Pri snegu je edino problem, če se z njim pojavi megla. Vendar je treba za boljši pregled nad vidljivostjo in vplivom posameznih vremenskih pojavov na vidljivost bolj natančno pregledati tudi padavine. V naslednjih dveh grafih so prikazane skupne padavine (slika 19), kamor spada tudi sneg, in novo zapadli sneg (slika 20). Kot se iz prvega grafa lepo razbere, so padavine obilnejše v drugi polovici leta, torej pozno poleti, jeseni in zgodaj pozimi. Sneg najbolj pada februarja, nekoliko manj ga zapade januarja in decembra. Sneg in dež v jesenskem in zimskem času precej oslabita vidljivost. Da bi pridobili točne deleže vpliva vremenskih pojavov na vidljivost, je praktično nemogoče. Sneg in dež pogosto spremlja megla. Včasih pada dež s snegom. V teh primerih bi nam lahko približno aproksimacijo predstavili le teoretični modeli, ki simulirajo posamezne vremenske pojave.



Slika 19: Povprečne dnevne količine padavin v zadnjih 30 letih na letališču.

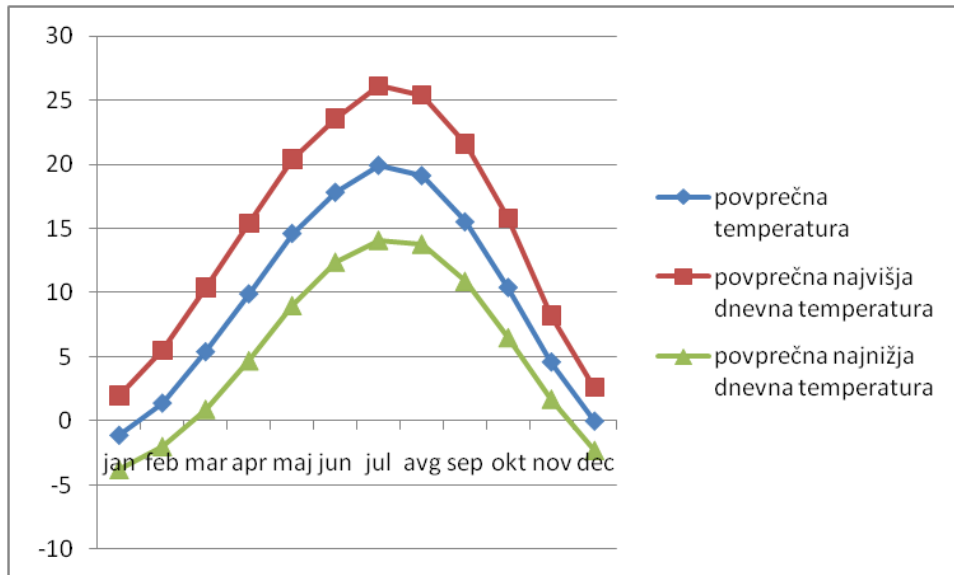


Slika 20: Povprečna dnevna količina novo zapadlega snega v zadnjih 30 letih na letališču.

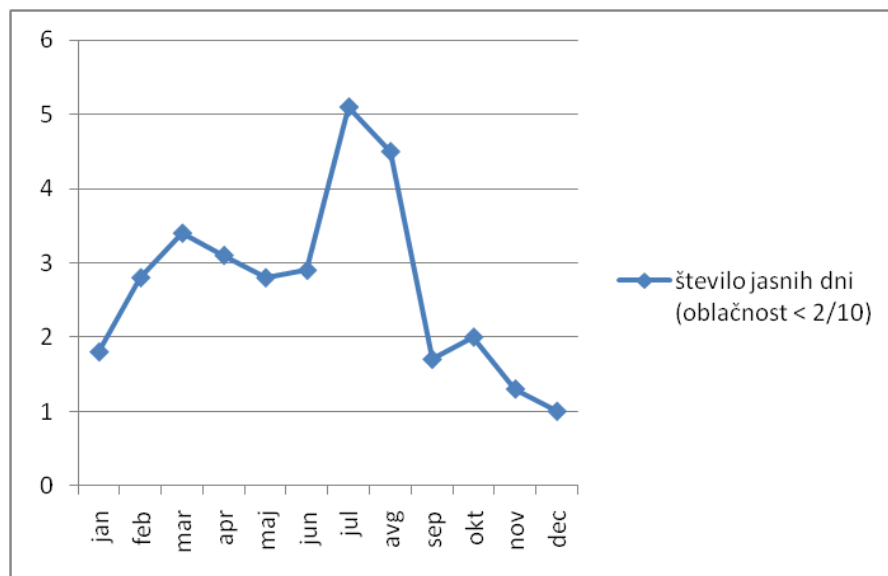
V poletnih mesecih ob sončnih dnevih, ko zgoraj analizirani vremenski pojavi ne vplivajo na prostozačne optične povezave, le te lahko oslabijo turbulence v zraku. Turbulence se pojavljajo zlasti nad segretim površinami, kot so ceste, strehe, pločevinaste okenske police, itd. Pri tem je potrebno paziti, da se povezava čim bolj izogiba prečkanjem takšnih površin.

Pojav lahko predvidevamo v vročih sončnih dnevih, zato sta najboljša pokazatelja število sončnih dni in povprečna oziroma maksimalna temperatura. Če povzamemo grafa na slikah 21 in 22, bomo v Ljubljani največ problemov s turbulencami imeli meseca julija, sledita mu junij in avgust.

Pri dvodnevem merjenju vpliva turbulenc v Gradcu avgusta 2001 povezava nikoli ni bila toliko oslABLJENA, da ne bi bila zanesljiva. Iz tega lahko sklepamo, da če se pri postavitvi izogibamo vročih površin v neposredni bližini in tako postavljamo enote na robove streh, turbulenca ne bo imela vpliva na zanesljivost povezav med fakultetami.



Slika 21: Povprečne dnevne temperature v Ljubljani.



Slika 22: Povprečno število jasnih dni v Ljubljani.

Po lastni presoji in izkušnjah menim, da megla v Ljubljani ni nikoli tako gosta kot v Gradcu. Poleg tega se iz grafov vidljivosti, padavin in megle da videti, da je povprečna vidljivost vedno dovolj visoka. V času, ko je več meglenih dni, je poleg tudi veliko padavin, kar lahko

sklepamo, da sta za slabšo vidljivost odgovorna oba vremenska pojava. Iz vsega tega sklepam, da kljub veliko meglenim dnevom v letu, povezavi med FRI in FMF ter obema stavbama FMF ne bi smeli biti problematični in ne bi smeli imeti izpadov ob meglenih dnevih. Povezavi med FMF in VF ter FRI in FGG sta dolgi okrog 300 metrov, kar je po večjem številu študij že kritična meja pri megli. V tem primeru bi bilo potrebno imeti nekoliko močnejše enote, kot pri krajših povezavah. Povezava med FMF in VF je sicer krajša od 300 metrov, vendar je vmes potok, ki bi lahko pripomogel h gostejši megli. Za povezavo med FGG in FRI sem že v prejšnjem podpoglavju omenila možnost razpolovitve, kar bi tudi zmanjšalo vpliv oslabitev zaradi vremenskih pojavov.

Za bolj natančen vpliv oziroma oslabitve zaradi vremenskih pojavov bi bilo potrebno pridobiti bolj natančne vremenske razmere na konkretnih linijah. Gostejše megle zaradi potoka in turbulenc zaradi pločevinaste police se ne da predvidevati, dokler se ne določijo točna mesta postavitve in dokler se ne stestira kakšen primer prostozračne optične povezave na samem kraju postavitve.

5. Sklepne ugotovitve

V diplomskem delu sem naredila pregled osnovnih znanj, ki so potrebna za nadaljnje delo z prostozračnimi optičnimi povezavami. Poleg tega sem opisala tudi praktična testiranja raziskovalcev na TU Graz. Iz vseh prebranih in videnih izkušenj pa sem oblikovala primer realne postavitve, ki sem ga postavila med izbrane fakultete v Ljubljani. Primer postavitve sem oblikovala v študijo izvedljivosti, kjer sem poizkušala čim bolj izkoristiti vsa pridobljena znanja. V izdelani študiji sem razčlenila problem izvedljivosti na posamezne dejavnike, ki so ključni pri postavitvi sistema prostozračnih optičnih povezav. Pri tem sem se na začetku ukvarjala s pridobitvijo podatkov, saj so ti ključnega pomena za nadaljnje delo. S pridobljenimi meritvami stavb in podatki o vremenu sem se lotila nadaljnjega členjenja, kaj pomenijo pridobljeni podatki za realno postavitev. Pri tem sem ugotovila, da same stavbe izbranih fakultet stojijo dovolj blizu, da se med njimi da postaviti zanesljive povezave. Nekoliko problematična se mi zdi edino povezava med dvema fakultetama (FRI in FGG), ki zaradi svoje dolžine nekoliko izstopa. Rešitev sem našla v razpolovitvi povezave na dve krajši povezavi, ki imata vmesnik, ki samo sprejme in preda signal brez vmesnih obdelav ali popravkov. V tem primeru se signal v teh enotah ojača in pride do cilja močnejši, kot če bi šel direktno brez vmesnikov.

Pri definiranju tehničnih podrobnosti sistema sem ugotovila, da bi zadostovale povprečne sprejemno – oddajne enote, ki se dobijo trenutno na trgu. Pri tem sem se opirala na spletne ponudbe različnih proizvajalcev. V svoji raziskavi nisem pregledala obstoječih sistemov, saj bi se to potrebovalo šele v primeru, da bi se fakultete odločile, da bi realizirale to rešitev. V tem primeru, bi bilo potrebno pregledati obstoječo opremo in trenutne povezave ter ugotoviti, katera oprema, ki že obstaja, je primerna tudi za prostozračno optično omrežje.

V raziskovanju vremenskih razmer na tem področju sem privzela, da so dovolj podobne tistim na območju Brnika. Problem je bil, da se gostota megle in vidljivost na območju Ljubljane ne merita. Če bi želela bolj trdno študijo, bi morala imeti te podatke za točno ta del Ljubljane. V tem primeru mislim, da je najbolj izvedljivo, da bi se postavil testni sistem, ki bi meril samo zanesljivost, zraven pa bi se beležili še trenutni vremenski podatki na nek časovni interval. Tak primer so testirali na TU Graz, kjer so imeli postavljeno povezavo, po kateri so pošiljali podatke iz ene naprave na drugo in iz druge neposredno nazaj na prvo. Poslane in dobljene podatke so nato primerjali, razlog za slabo ali prekinjeno povezavo pa so poiskali v sočasno izmerjenih vremenskih podatkih in sočasno zajeto sliko iz kamere, ki je bila postavljena poleg prve enote.

V svoje nadaljnje raziskovanje bi vključila še podrobnejšo primerjavo med več-povezovalnimi in eno-povezovalnimi sistemi. Poleg tega bi bila zanimiva primerjava nekaj sistemov, ki se dobijo na trgu. Zanimivo bi bilo primerjati tako tehnične lastnosti, kot samo ceno. Študiji realne postavitve bi to doprineslo veliko dodano vrednost. V najdeni in

uporabljeni literaturi sem pogrešala omembe vpliva neviht oziroma svetlobe strel na samo povezavo. Vpliv strel bi bila še ena izmed nadgradenj ne samo študije, ampak celotnega dela.

Seznam slik

Slika 1: Skica prostozračne optične povezave.....	7
Slika 2: Ker je S_{spr} manjša od celotne S , je izkoristek oddajnikove moči slabši, kot če bi bil sevalni kot manjši.	9
Slika 3: Primer oslabitve prejete svetlobe zaradi sevalnega kota in absorpcije.	10
Slika 4: Rayleightovo in Miejevo sipanje.	12
Slika 5: Primera sprejemno - oddajnih enot. Prva ima tri oddajnike in en sprejemnik. Vsi imajo enake leče. Desna enota ima 8 oddajnikov in en sprejemnik. Sredinska leča je sprejemna, manjše stranske so oddajne. Enote so izdelali na TU Graz [14].	23
Slika 6: Shema najkrajše povezave.	26
Slika 7: Skica postavitve povezave med stavbama univerze.....	27
Slika 8: Skica postavitve 2,7 km dolge povezave iz TU Graz do observatorija.....	28
Slika 9: Meritve napake BER skozi obdobje enega leta [17].	31
Slika 10: Nedosegljivost optične povezave v odstotkih skozi celo leto meritev razdeljeno po urah [17].	32
Slika 11: Rezultati meritve vpliva turbulenc na optično povezavo. Prvi graf predstavlja prejeto energijo. Drugi in tretji graf predstavljata meritve vlažnosti in temperature, zadnji pa sončno svetlobo skozi dan [17].	33
Slika 12: Skica dosedanjega omrežja med glavnimi vozlišči, ARNES-om in izbranimi fakultetami.	34
Slika 13: Zemljevid fakultet in načrtane razdalje med njimi (Vir zemljevida in meritve razdalj: [19]).	36
Slika 14: Skica postavitve FSO med izbranimi fakultetami (Zemljevid pod skico: [19]).	38
Slika 15: Povprečno število dni z meglo po mesecih za Ljubljano.	39
Slika 16: Povprečno število dni z določenim tipom megle ali brez megle v zadnjih 30 letih na letališču.	40

Slika 17: Povprečno število dni z meglicami v zadnjih 30 letih na letališču.	41
Slika 18: Povprečna vidljivost v zadnjih 30 letih na letališču.	41
Slika 19: Povprečne dnevne količine padavin v zadnjih 30 letih na letališču.	42
Slika 20: Povprečna dnevna količina novo zapadlega snega v zadnjih 30 letih na letališču. ..	43
Slika 21: Povprečne dnevne temperature v Ljubljani.	44
Slika 22: Povprečno število jasnih dni v Ljubljani.	44

Literatura

- [1] Beer-Lambert law in the atmosphere. Dostopno na:
http://en.wikipedia.org/wiki/Beer-Lambert_law
- [2] S. Bloom, The Physics Of Free-Space Optics. Dostopno na:
<http://www.freespaceoptic.com/WhitePapers/Physics%20of%20Free-space%20Optics.pdf>
- [3] dBm. Dostopno na:
<http://en.wikipedia.org/wiki/DBm>
- [4] I. I. Kim, B. McArthur, E. Korevaar, "Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications". Dostopno na:
<http://www.ece.mcmaster.ca/faculty/hranilovic/woc/resources/local/spie2000b.pdf>
- [5] Blue Sky. Dostopno na:
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/Hbase/atmos/blusky.html#c3>
- [6] Infrared radiation. Dostopno na:
http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_spectrum
- [7] Laser Guide. Dostopno na:
http://www.fsona.com/technology.php?sec=laser_guide
- [8] Laser safety. Dostopno na:
http://en.wikipedia.org/wiki/Laser_safety
- [9] E. Leitgeb, S. S. Muhammad, C. Chlestil, M. Gebhart, U. Birnbacher, "Reliability of FSO Links in Next Generation Optical Networks", ICTON 05 (IEEE-conf.), Barcelona, Španija, julij 2005.
- [10] D. A. Johnson, P. E., "Handbook of Optical Through the Air Communications, Light Emitters". Dostopno na:
<http://www.imagineeringezine.com/ttaoc/emmitter.html>
- [11] Tipi industrijskih laserjev. Dostopno na :
<http://lab.fs.uni-lj.si/kolt/>
- [12] B. Batagelj, "Optične komunikacije". Dostopno na:
<http://www2.arnes.si/~bbatag/ook1.pdf>

[13] Naprave za detekcijo svetlobe. Dostopno na:

[http://lab.fs.uni-lj.si/kolt/datoteke/laserski/Tema%207%20Detektorji%20\(5a\).pdf](http://lab.fs.uni-lj.si/kolt/datoteke/laserski/Tema%207%20Detektorji%20(5a).pdf)

[14] Charade and Delight System families, Operational manual. Datoteka pridobljena s strani OptiKom TU Graz.

[15] [TAS], poglavje 1. Dostopno na:

<http://ucilnica.fri.uni-lj.si/course/view.php?id=79>

[16] M. S. Awan, L. C. Horwath, S. S. Muhammad, E. Leitgeb, F. Nadeem, M. S. Khan, "Characterization of Fog and Snow Attenuations for Free-Space Optical Propagation", Journal of communications, Vol. 4, št. 8, sept. 2009

[17] M. Gebhart, E. Leitgeb, J. Bregenzer, "Atmospheric effects on Optical Wireless links", Proceedings of the 7th International Conference Telecommunications ConTEL 2003, Zagreb, Hrvaška, junij 2003, Vol. 2, str. 395 - 401

[18] Priporočilo članicam Univerze omrežje Metulj. Dostopno na:

http://www.uni-lj.si/files/ULJ/userfiles/ulj/o_univerzi_v_lj/Statut_in_pravilniki/InformacijskoPodrocje/PriporocilaClanicamUL-OmrezjeMetulj.pdf

[19] Zemljevid Slovenije. Dostopno na:

<http://zemljevid.najdi.si/>

[20] Datoteka brnik_klima_1961_feb2010.txt, pridobljena s strani Agencije Republike Slovenije za okolje

[21] Vremenski podatki za Ljubljano. Dostopno na:

<http://www.arso.si/vreme/napovedi%20in%20podatki/ljubljana.html>