

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO
ODDELEK ZA FIZIKO
NARAVOSLOVNA SMER

Barbara Horvat

Očem varni LIDAR

DIPLOMSKO DELO

Mentor: prof.dr. Marko Zgonik
Somentor: doc.dr. Klemen Bergant

Ljubljana, 2008

Povzetek

LIDAR (*Light Detection And Ranging*) je naprava s pomočjo katere merimo lastnosti sipane svetlobe, da ugotovimo oddaljenost, velikost, obliko, strukturo, dinamiko in nekatere druge lastnosti opazovane tarče. Naprava v osnovi deluje podobno kot RADAR (*RAdio Detection And Ranging*), le da uporablja manjše valovne dolžine (IR, UV ali vidna svetloba), kar nam omogoča detekcijo bistveno manjših delcev - aerosolov. V diplomskem delu je podan opis elastičnega (Mie, Rayleigh) sipanja, katerega lastnosti izkoriščamo pri uporabljenem očem varnem lidarju. Opisu teoretičnih podlag delovanja lidarja sledi opis uporabljenega lidarskega sistema in same lidarske enačbe, ki vsebuje povezavo med koeficientom povratnega sipanja, atenuacijskim koeficientom in detektirano sipano svetlobo. V drugem delu so predstavljene testne meritve, ki so obsegale vse od zelo osnovnih meritev pa do detekcije aerosolov in testiranja dometa. Meritve so bile opravljene v Ljubljani na Fakulteti za matematiko in fiziko, pred stavbo Primorskega inštituta za naravoslovne in tehnične vede v Kopru, na Srednji tehniški šoli Koper, v Luki Koper d.d. in na Aerodromu Portorož v Sečovljah.

Žal zaradi nekaterih tehničnih pomanjkljivosti zaenkrat uporabljeni lidar še ni v operativni rabi. Opravljene meritve tako predstavljajo testiranje očem varnega lidarja z namenom odkrivanja njegovih omejitev in pomanjkljivosti ter njegovih zmogljivosti. To bo v pomoč pri prihodnjih izboljšavah, ki bodo omogočile operativno rabo lidarja za zaznavanje onesnaževalcev v Luki Koper d.d., za kar je bil primarno razvit.

Ključne besede: LIDAR, sipana svetloba, Mie, Rayleigh

Abstract

LIDAR (*Light Detection and Ranging*) is a device used for measurements of properties of scattered light to determine range, size, shape, structure, dynamics and some other properties of investigated target. The device works similarly as RADAR (*RAdio Detection And Ranging*). The main difference is that lidar uses much shorter wavelengths (IR, UV or visible light). This property allows us to detect smaller particles - aerosols. In following chapters are presented description of elastic (Mie, Rayleigh) scattering which comes into play when working with eye-safe lidar, description of theoretical background about physics behind lidar and description of used lidar system as well lidar equation that combines angular scattering coefficient, absorption coefficient and detected scattered light. In second part of presented work are presented test measurements which include everything from completely basic measurements to detection of aerosols and testing of lidar range. Measurements were taken in Ljubljana on Faculty of Mathematics and Physics, in front of building of Primorska institute for natural science and technology, on Secondary technical school Koper, in harbour Luka Koper d.d. and on Aerodrome Portorož in Sečovlje.

Unfortunately because of some technical imperfection used lidar is not yet working operatively. Therefore all taken measurements represent only testing of eye-safe lidar with the intention of discovering its limitations and imperfections as well as its capabilities. This will help when further improving used lidar to work even better when detecting air pollutants in Luka Koper d.d. which was the primary reason for creating eye-safe lidar.

Keywords: LIDAR, scattered light, Mie, Rayleigh

Stvarni vrstilec (PACS): 07.60.-j

Zahvaljujem se mentorju prof.dr. Marku Zgoniku za vso pomoč pri pripravi diplome.

Prav posebna zahvala pa gre somentorju doc. dr. Klemenu Bergantu za vse nasvete, literaturo, razlage, organizacijo meritev na letališču v Sečovljah ter za vso pomoč pri problemih, ki so se pojavili ob pisanju diplomske naloge.

Lepo bi se zahvalila tudi bivšemu vršilcu dolžnosti direktorja in sedanjemu vodji Oddelka za tehnologijo inštituta UP PINT prof.dr. Tomažu Pisanskemu za vso pomoč ter direktorju UP PINT prof. dr. Andreju Brodniku.

Zahvaljujem se tudi direktorju Aerodroma Portorož Ljubu Miliču za odobritev in organizacijo merjenja na letališču v Sečovljah.

Zahvaljujem se tudi Srednji tehniški šoli Koper za odobritev in organizacijo merjenja na STŠ Koper.

Posebna zahvala gre Nataši Grlj, ki me je seznanila z obstojem projekta LIDAR, organizirala merjenje v Kopru in na Fakulteti za matematiko in fiziko. Iskreno se ji zahvaljujem za vso potrepljenje in posluh ob nastajanju mojega diplomskega dela ter za vso pomoč.

Zahvala gre tudi Luki Koper d.d.

Na koncu bi se še zahvalila vsem, ki so mi stali ob strani v vseh letih študija, najbolj pa moji mami Justini.

Kazalo

1	Uvod	5
1.1	Namen diplomskega dela	5
2	Sipanje	7
2.1	Rayleigh-ovo sipanje	7
2.2	Mie-vo sipanje	8
3	LIDAR	11
3.1	Očem varni lidar	15
3.1.1	Optične komponente	15
3.1.2	Krmilni sistem	20
3.1.3	Program jeVel	20
4	Meritve	22
4.1	Spreminjanje števila signalov in črpalne energije laserja	25
4.2	Ponovljivost meritev ob programskem premikanju lidarja	27
4.3	Signal ter šum	28
4.4	Ozadje	29
4.5	Detekcija roba	30
4.6	Vpliv meglice na detekcijo objekta	31
4.7	Dinamika meglice	32
4.8	Določanje višine oblakov	33
4.9	Detekcija dima z ladje	34
4.10	Detekcija premogovega prahu	36
4.11	Skenirano območje	37
4.12	Domet	38
5	Zaključek	40

Poglavje 1

Uvod

Z izpusti različnih plinov in aerosolov (mikroskopskih lebdečih delcev in kapljic), s katerimi onesnažujemo ozračje, spreminjamo sestavo ozračja in posledično njegove optične lastnosti (prepustnost, vpojnost in odbojnost). Med plini se zadnje čase še posebno pozornost posveča toplogrednim (npr. H_2O , CO_2 , CH_4 , NO_x , O_3 , itd.), saj porast njihove vsebnosti v ozračju povečuje učinek tople grede in posledično povzroča globalno segrevanje. Po drugi strani pa aerosoli povzročajo globalno senčenje [24], neposredno, ker slabijo sončne žarke na poti skozi ozračje, ter posredno, ker vplivajo na sevalne lastnosti in količino oblakov. Učinek globalnega senčenja lahko do neke mere blaži učinek tople grede, vendar pa imajo zaradi svojih kemijskih lastnosti običajno aerosoli številne negativne posledice na okolje.

Da bi z ustreznimi ukrepi zmanjševanja izpustov plinov in aerosolov ublažili kratkoročne in dolgoročne negativne posledice na okolje, moramo najprej temeljito poznati obstoječe stanje. Zato moramo opraviti ustrezne meritve vsebnosti onesnaženja v ozračju in na zemeljskem površju in to s primerno časovno in prostorsko ločljivostjo. Obstaja več možnosti meritev: merjenje parametrov ozračja na mestu samem ("in situ") oz. merjenje na daljavo z uporabo lidarja. LIDAR je angleška okrajšava za "LIght Detection and Rangin". Glavne prednosti slednjega ni le možnost 3D meritev na daljavo z veliko ločljivostjo, temveč tudi hitrost ter mobilnost. Njegovi največji omejitvi pa sta visoka cena ter potencialna nevarnost za oči.

Z lidarji s pomočjo oddajanja kratkih kolimiranih svetlobnih sunkov iz laserja ter detekcije in analize sipanega dela oddane svetlobe lahko merimo koncentracijo plinov (ozon, vodna para, metan, dušikovi oksidi, ...) ter aerosolov na razdalji nekaj 10 m pa do nekaj 10 km. Da je merjenje dovoljeno tudi v naseljih (nevarnost za oči), moramo omejiti izhodno energijo laserskih sunkov, uporabiti povečevalni daljnogled za prilagoditev divergence laserskega snopa ter svetlobne sunke z valovno dolžino večjo od 1400 nm, saj se svetloba takšne valovne dolžine v večini absorbira že pred mrežnico [2], [5], [14], [15]. V takšnem primeru lahko govorimo o očem varnem lidarju.

1.1 Namen diplomskega dela

Diplomska naloga se navezuje na projekt z naslovom "Razvoj prenosnega, očem varnega lidarja za nadzor onesnaževanja ozračja", ki je bil kot aplikativni projekt financiran s

strani Agencije Republike Slovenije za raziskovanje (ARRS) in Luke Koper d.d. Nosilec projekta je Univerza na Primorskem, Primorski inštitut za naravoslovne in tehnične vede (UP PINT). Končni cilj projekta je izdelati operativni sistem za zaznavanje aerosolov v ozračju in lociranje njihovega izvora.

Namen pričujočega diplomskega dela je predstaviti osnovni princip delovanja lidarja s posebnim poudarkom na uporabljenem očem varnem lidarskem sistemu. Glavni namen diplomske naloge glede na cilj projekta "Razvoj prenosnega, očem varnega lidarja za nadzor onesnaževanja ozračja" je bil testirati izdelan lidar, testirati program za krmiljenje, zajem in analizo lidarskih podatkov, detektirati pomanjkljivosti obstoječega sistema in podati predloge za izboljšavo, ki bi omogočili operativno rabo sistema. Želja pa je bila tudi na praktičnem primeru meritev pokazati uporabnost lidarja za detekcijo aerosolov in lociranje njihovega izvora.

Poglavje 2

Sipanje

Fizikalno ozadje delovanja sistema lidar (glej poglavje 3) je povezano s sipanjem svetlobe na sipalcu reda velikosti nekaj mikrometrov naprej.

Ko pride do pojava sipanja, se del svetlobnega žarka iz laserja, ki predstavlja oddajnik lidarja, razprši v vse smeri z različno intenziteto. Intenziteta sipanja v dani smeri je odvisna od fizikalnih lastnosti sipalca v področju, ki ga proučujemo z lidarjem. Podobno velja tudi za absorpcijo, kjer je intenziteta absorbirane svetlobe odvisna od prisotnosti atmosferskih absorberjev, kot so snovi, ki vsebujejo ogljik, vodni hlapi, ozon. . . [9] vzdolž smeri emitirane svetlobe iz lidarja. Vendar je z razliko od sipanja absorpcija svetlobe rezultat v spremembi notranje energije plinov oz. aerosolskih absorberjev.

Ko raziskujemo ozračje na podlagi sipane svetlobe, v največji meri doprineseta k rezultatu sipanje svetlobe na molekulah, Rayleighovo sipanje, in sipanje svetlobe na aerosolih, Mievo sipanje. Obe vrsti sipanja, tako Mie-vo kot Rayleigh-jevo prištevamo med elastična sipanja [3], saj imata vpadna in sipana svetloba enaki valovni dolžini. Nekatero lastnosti ozračja lahko sicer proučujemo tudi na podlagi neelastičnega, npr. Ramanovega sipanja [5], vendar uporabljen lidarski sistem tega ne omogoča. Zato v nadaljevanju sledi le opis Rayleigh-jevega in Mie-vega sipanja.

2.1 Rayleigh-ovo sipanje

Celotna teorija Rayleigh-jevega sipanja ne velja le za molekule plina, temveč tudi za aerosole, katerih obseg je manjši od 10 % [9] velikosti valovne dolžine vpadne svetlobe.

Koeficient sipanja $\beta_{\theta, \lambda}$ določa intenziteto sipane svetlobe z valovno dolžino λ v smeri θ glede na smer emitirane svetlobe.

Ob predpostavki, da depolarizacijskega efekta ter uravnavanja na temperaturo in pritisk ni, se molekulski kotni sipalni koeficient pri valovni dolžini svetlobe λ in v smeri θ glede na smer iz laserja oddane svetlobe zapiše kot [9]

$$\beta_{\theta, m} = \frac{\pi^2(m^2 - 1)^2 N}{2N_s^2 \lambda^4} (1 + \cos^2 \theta), \quad (2.1)$$

kjer je m realni del lomnega količnika žarkov, N je število molekul na enoto volumna pri izbrani temperaturi in pritisku, N_s pa je številčna gostota molekul pri standardnih pogojih. Zadnji člen v enačbi (2.1) pride ob predpostavki, da so molekule merjenca porazdeljene enakomerno [9].

Lomni količnik žarkov m je pomemben parameter za poljuben sipajoč oz. absorbirajoč medij. Je kompleksna številka, kjer je realni del razmerje fazne hitrosti propagacije elektromagnetnega polja med snovjo, ki jo raziskujemo in praznim prostorom. Imaginarni del pa je povezan s sposobnostjo sipajoče snovi, da absorbira elektromagnetno energijo. Lomni količnik je odvisen od valovne dolžine svetlobe, kot tudi od zunanjih pogojev tj. temperature in pritiska [9].

Amplituda sipane svetlobe je simetrična glede na smer potovanja svetlobnega žarka. V primeru simetrije okoli ene osi se diferencialni prostorski kot zapise kot

$$d\omega = \sin\theta d\theta d\phi, \quad (2.2)$$

kjer gre ϕ od 0 do 2π , θ pa od 0 do π . Molekularni volumski koeficient povratnega sipanja dobimo z integracijo po vseh kotih

$$\beta_m = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \beta_{\theta,m} \sin\theta d\theta d\phi. \quad (2.3)$$

S pomočjo enačb (2.1) in (2.3) se za molekularni volumski koeficient povratnega sipanja dobi

$$\beta_m = \frac{8\pi^3(m^2 - 1)^2 N}{3N_s^2 \lambda^4}. \quad (2.4)$$

Intenziteta molekularnega sipanja je močno odvisna od valovne dolžine vpadne svetlobe. Sipanje je namreč proporcionalno λ^{-4} , kar pomeni, da je sipanje na molekulah v infrardečem področju spektra zanemarljivo, medtem ko to ne velja v področju ultravijoličnega dela spektra.

Za vrednosti m in N v enačbi (2.4) je potrebno prilagoditi dejansko temperaturo T , pritisk P ter upoštevati depolarizacijo, saj v nasprotnem primeru lahko pride do napak reda 10 % [9]

$$\beta_m = \frac{8\pi^3(m^2 - 1)^2 N}{3N_s^2 \lambda^4} \left(\frac{6 + 3\gamma}{6 - 7\gamma}\right) \left(\frac{P}{P_s}\right) \left(\frac{T_s}{T}\right), \quad (2.5)$$

kjer je γ tabeliran depolarizacijski faktor.

V primeru sipanja na molekulah, je sipalni presek, ki pove količino sipanega glede na posamezno molekulo, odvisen od molekularnega volumskega koeficienta povratnega sipanja in sicer

$$\sigma_m = \frac{\beta_m}{N}, \quad (2.6)$$

kjer je N gostota molekul. Če upoštevamo izraz (2.4) v enačbi (2.4), dobimo

$$\sigma_m = \frac{8\pi^3(m^2 - 1)^2}{3N_s^2 \lambda^4}. \quad (2.7)$$

2.2 Mie-vo sipanje

Ko se karakteristične velikosti aerosolov približujejo vrednosti valovne dolžine vpadne svetlobe, se narava sipanja drastično spremeni. Sipanje si lahko v tem primeru predstavljamo kot interakcijo med valovi, ki "objamejo" delec in tistimi, ki gredo čez delec. Opazujemo lahko konstruktivno ali destruktivno interferenco. Do konstruktivne interference pride, ko je obseg delca mnogokratnik valovne dolžine. Takrat je tudi sipalni presek

velik. V primeru destruktivne interference pa je sipalni presek majhen. V primeru delcev, ki so bistveno večji od valovne dolžine svetlobe, pa govorimo kar o geometrijski optiki.

Najbolj enostaven primer je, če privzamemo, da so vsi preiskovani delci porazdeljeni enakomerno, da so enake velikosti in oblike (sferično simetrični). Taki delci imajo enak lomni količnik žarkov in posledično enake lastnosti sipanja. Podobno kot pri sipanju na molekulah lahko zapišemo celoten koeficient povratnega sipanja na aerosolih kot

$$\beta_{aer} = N_{aer}\sigma_{aer}, \quad (2.8)$$

kjer je N_{aer} številska gostota aerosolov, σ_{aer} pa je sipalni presek posameznega delca. V primeru aerosolov pa se definira še dva brezdimenzijska parametra tj. sipalna dobrota Q_{sc} , ki je definirana kot razmerje sipalnega preseka aerosolov σ_{aer} in geometrijskega preseka sipajočega aerosola

$$Q_{sc} = \frac{\sigma_{aer}}{\pi\rho^2}, \quad (2.9)$$

kjer je ρ polmer sipajočega aerosola. Drug brezdimenzijski parameter je velikostni parameter Φ

$$\Phi = \frac{2\pi\rho}{\lambda}, \quad (2.10)$$

kjer λ predstavlja valovno dolžino vpadne svetlobe. Iz izrazov (2.8) ter (2.9) se dobi celotni koeficient povratnega sipanja

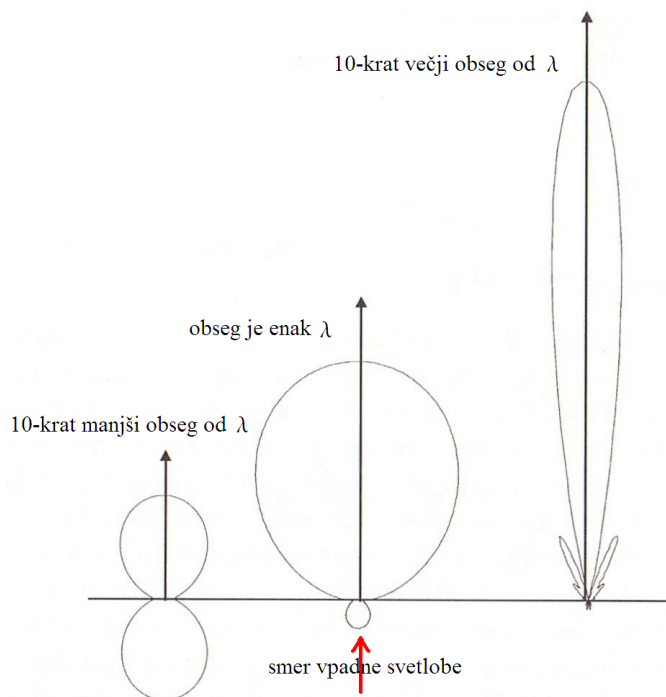
$$\beta_{aer} = N_{aer}\pi\rho^2Q_{sc}. \quad (2.11)$$

V realni atmosferi pa žal nimamo enako velikih delcev in tudi niso enake sestave. Tako je potrebno narediti "in-situ" meritev, da dobimo porazdelitev velikosti aerosolov. Celotno število delcev na enoto volumna atmosfere je vsota po vseh različnih sipalcih v volumnu

$$N = \sum_{i=1}^k N(\rho_i), \quad (2.12)$$

kjer je $N(\rho_i)$ število vseh aerosolov z radijem ρ_i . Za celoten pravi koeficient povratnega sipanja bi pa morali upoštevati še dejstvo, da niso vsi delci sferično simetrični.

Rayleighovo sipanje lahko razlikujemo od Mie-vega sipanja tudi po kotni porazdelitvi intenzitete sipane svetlobe, kar je prikazano na sliki 2.1, kjer je v primeru Rayleigh-jevega sipanja oblika kotne porazdelitve intenzitete sipane svetlobe simetrična, kar se vidi že v enačbi 2.1, kjer nastopa faktor $(1 + \cos^2 \theta)$. Za Mie-vo sipanje je ta odvisnost bolj komplicirana.



Slika 2.1: Kotna porazdelitev intenzitete sipane svetlobe pri treh različnih velikosti delcev glede na vpadno valovno dolžino valovanja. Od leve proti desni: obseg delca je 10-krat manjši od valovne dolžine svetlobe, obseg delca in valovne dolžine sta enaka, valovna dolžina je 10-krat večja od obsega delca. [9]

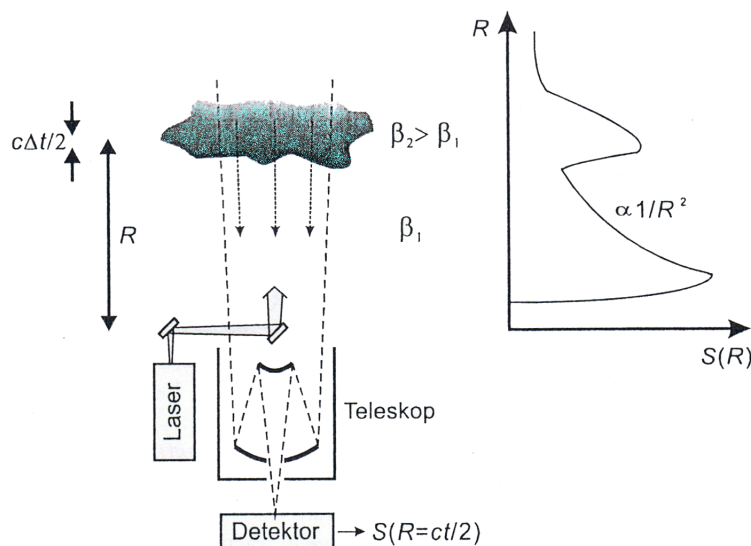
V skrajno levem primeru delu slike 2.1 je prikazan primer Rayleigh-jevega sipanja, ko je obseg delca bistveno manjši od valovne dolžine vpadne svetlobe. Zato je tudi kotna porazdelitev intenzitete sipane svetlobe enaka v smeri sipanja naprej in nazaj glede na vpadno svetlobo. V srednjem primeru na sliki 2.1 pa imamo opravka z Mie-vim sipanjem, kjer je količina sipane svetlobe naprej tj. v smeri vpadne svetlobe bistveno večja, kot pa v smeri nazaj. Z večanjem velikostnega parametra ϕ se večja tudi intenziteta sipanja v smeri naprej, kar se vidi na skrajno desnem delu slike 2.1. Prav tako je kotna odvisnost v primeru sipanja na aerosolih bolj komplicirana kot v primeru molekul, saj se z večanjem velikostnega parametra ϕ pojavljajo dodatne pentlje sipanja. Sipanje na velikih delcih pa je dokaj neobčutljivo na valovno dolžino vpadne svetlobe v primerjavi s sipanjem na molekulah [9].

Poglavje 3

LIDAR

Light Detection And Ranging (LIDAR) deluje podobno kot RADAR, vendar na drugem frekvenčnem območju (tipično v spektru ultravijolične, vidne oz. infrardeče svetlobe). Z njim se lahko meri koncentracijo različnih plinov in aerosolov v atmosferi, parametre sipanja ter absorpcije, višino oblačnega dna, atmosfersko dinamiko... Skratka, služi kot orodje za preučevanje lastnosti ozračja. Z nekaterimi vrstami lidarja se da meriti tudi globino morja, pokritost reliefa z gozdom, hitrost oddaljenih predmetov...

Princip merjenja z lidarjem (slika 3.1) bi v grobem opisali z oddajo svetlobnega signala iz laserja v ozračje, kjer se svetloba sipa ter absorbira, ter detekcijo dela povratno sipane svetlobe, ki jo prestreže sprejemni teleskop, s pomočjo fotopomnoževalke. Iz intenzitete sprejete sipane svetlobe lahko upoštevajoč dejstvo, da nam gostota energijskega toka slabi s kvadratom razdalje, ocenimo relativno gostoto sipalca, čas potovanja sipane svetlobe pa da podatke o oddaljenosti sipalca.



Slika 3.1: Delovanje lidarja. Laser oddaja kratke kolimirane svetlobne sunke v ozračje. Teleskop prestreže del povratno sipane svetlobe. Časovno razločeno merjenje njene intenzitete daje krajevno razločeno informacijo o strukturi ozračja. [14]

Prednosti lidarja v primerjavi z "in-situ" meritvami so: merjenje na daljavo, mobilnost,

hitrost, 3D preiskovanje z visoko ločljivostjo, možnost proučevanja velikih območij...

Glavni sestavni deli vsakega lidarja so sunkovni laserski oddajnik, sprejemni teleskop ter detektor. Laser oddaja kolimirane svetlobne sunke s tipično dolžino ~ 10 ns in vršno močjo nekaj MW. Zmanjševanje intenzitete svetlobe iz laserja v ozračju je posledica sipanja ter absorpcije svetlobe na molekulah plina ter aerosolih. V primeru molekul (njihova velikost je bistveno manjša od valovne dolžine iz lidarja oddane svetlobe λ) je sipanje Rayleigh-ovo, v primeru aerosolov (njihova velikost je primerljiva z valovno dolžino λ) pa je potrebno uporabiti Mie-ovo teorijo sipanja. Velikost absorpcije pa je sorazmerna z valovno dolžino λ . Najbolj izrazita je pri valovni dolžini λ , ki ustreza elektronskim (vibracijskim oz. rotacijskim) prehodom merjenega plina.

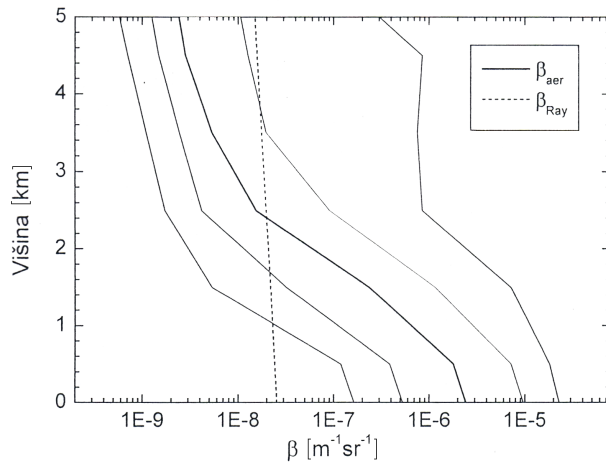
Sipalne ter absorpcijske lastnosti ozračja, ki določajo intenziteto povratnega sipanja svetlobe z valovno dolžino λ , ponazorimo z dvema koeficientoma: atenuacijskim koeficientom $\alpha(\lambda, R)$ z enotami $[m^{-1}]$, ki je definiran kot sipalni presek na enoto prostornine, ter koeficientom povratnega sipanja $\beta(\lambda, R)$ (glej poglavje (2)), ki je vsota prispevkov sipanja na molekulah plina in aerosolih v smeri proti oddajniku [19], z enotami $[m^{-1}sr^{-1}]$.

Atenuacijski koeficient za Rayleigh-jevo sipanje svetlobe z valovno dolžino λ v ozračju zapišemo kot [14]

$$\alpha_{Ray}(\lambda, r) = \frac{8\pi}{3}\beta_{Ray}. \quad (3.1)$$

Za Miejevo sipanje so na sliki 3.2 le orientacijske vrednosti za β_{aer} za valovno dolžino $1.5 \mu m$. Razmerje med sipalni in atenuacijskim koeficientom pa se za Miejevo sipanje glasi

$$\alpha_{aer} = 50 \cdot \beta_{aer}. \quad (3.2)$$



Slika 3.2: Koeficient povratnega sipanja β za svetlobo z valovno dolžino $1.5 \mu m$. [14]

Del oslabljenega signala, ki se sipa v povratni smeri, prestreže teleskop po času t . Časovno razločeno merjenje intenzitete prestrežene svetlobe daje krajevno razločeno informacijo o strukturi ozračja oz.

$$R = \frac{ct}{2}. \quad (3.3)$$

Število povratno sipanih fotonov, ki prispe iz krajevnega intervala $[R - \frac{\Delta R}{2}, R + \frac{\Delta R}{2}]$ v časovnem intervalu $\Delta t = \frac{2\Delta R}{c}$ na detektor, opisuje lidarska enačba

$$S(\lambda, R) = O(R)T(\lambda)E_0 \frac{\lambda}{hc} \beta(\lambda, R) \frac{c\Delta t}{2} \frac{A}{R^2} e^{-2 \int_0^R \alpha(\lambda, r) dr}. \quad (3.4)$$

V enačbi (3.4) predstavlja $O(R)$ koeficient prekrivanja laserskega žarka z vidnim poljem detekcijskega sistema, $T(\lambda)$ transmisijo detekcijskega sistema. E_0 energijo laserskega sunka z valovno dolžino λ , $\Delta R = \frac{c\Delta t}{2}$ krajevno ločljivost lidarskega sistema, $\frac{A}{R^2}$ zbiralni prostorski kot sprejemnega teleskopa z efektivno površino A , eksponentni člen pa transmisijo ozračja za svetlobo na poti do sipalnega volumna in nazaj. Enačba (3.4) pa velja le za enkrat sipane povratne fotone.

Lažja obravnava lidarske enačbe (3.4) je v njeni diferencialni obliki. Uvede se novo spremenljivko

$$s(\lambda, R) = \ln \frac{S(\lambda, R)R^2}{S(\lambda, R_0)R_0^2}, \quad (3.5)$$

kjer je R_0 najmanjša razdalja popolnega prekrivanja vidnega polja detekcijskega sistema z laserskim žarkom. V enačbo (3.5) se vstavi (3.4). Ob upoštevanju (3.10) ter da je ob popolnem prekrivanju vidnega polja detekcijskega sistema z laserskim žarkom $O(R) = 1$, se (3.5) lahko zapiše kot

$$s(\lambda, R) = \ln \frac{\beta(\lambda, R)}{\beta(\lambda, R_0)} - 2 \int_{R_0}^R \alpha(\lambda, r) dr. \quad (3.6)$$

(3.6) se le še odvaja po R in tako dobi lidarsko enačbo v diferencialni obliki

$$\frac{\delta s(\lambda, R)}{\delta R} = \frac{1}{\beta(\lambda, R)} \frac{\delta \beta(\lambda, R)}{\delta R} - 2\alpha(\lambda, R). \quad (3.7)$$

Reševanje lidarske enačbe je zahtevno, saj problem ni enolično rešljiv. Zato je potrebno že v začetku sprejeti kompromis oz. dodatne predpostavke. Obstaja več metod reševanja [9]

- metoda strmine, kjer se za predpostavko vzame, da je atmosfera homogena. Iz enačbe (3.7) se pri teh pogojih parameter absorpcije α določi preko strmine krivulje $s(\lambda, R)$.
- integracijska metoda izhaja iz enačbe (3.7). Za predpostavko se v tem primeru vzame potenčna zveza med koeficientom povratnega sipanja in atenuacijskim koeficientom

$$\beta = C\alpha^k, \quad (3.8)$$

kjer je k funkcija razdalje, C pa konstanta. Tako se enačba (3.7) transformira v Bernoullijevo oz. homogeno Ricattijevo diferencialno enačbo, ki jo z ustrežno substitucijo ($z(R) = \alpha(R)^{-1}$) lahko prevedemo v linearno diferencialno enačbo prvega reda, ki pa zaradi privzete predpostavke ni enolično rešljiva.

Občutljivost lidarskega sistema je odvisna od razmerja signal-šum, ki sta oba odvisna od samega lidarja ter atmosfere.

Signal je odvisen od

- lidarja
 - energije laserskih signalov: višja energija pomeni močnejši signal
 - velikosti sprejemnega teleskopa: večja ko je površina sprejemnega teleskopa, močnejši je signal
 - občutljivosti detektorja: bolj občutljiv detektor ima za posledico močnejši signal
 - ojačevalnega faktorja: večji ojačevalni faktor, večji signal
- atmosfere
 - koncentracije delcev: čim več delcev, tem več svetlobe se sipa nazaj
 - sipalnega preseka (ki je odvisen tudi od valovne dolžine laserske svetlobe): večji sipalni presek, več signala
 - oddaljenosti aerosolov (intenziteta nazaj sipane svetlobe, ki jo ujame teleskop, pada s kvadratom razdalje med sipalci in teleskopom): dlje kot je merjenec, slabši je signal

Šum pa je odvisen od

- lidarja
 - šuma detektorja
 - šuma elektronike
- sevanja ozadja
 - neposredne ali sipane sončne ali lunine svetlobe
 - svetlobe svetil v okolici

Sevanja ozadja namreč ne more popolnoma odstraniti filter pred detektorjem, zato je potrebno odšteti od prejetega signala povprečno vrednost sevanja ozadja, toda Poissonov šum pri detekciji ostane.

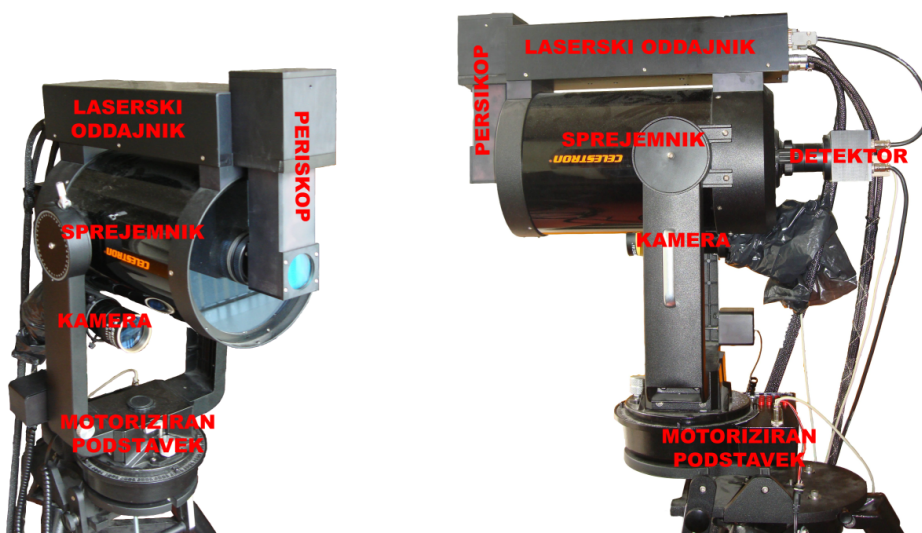
Pri danih pogojih v atmosferi lahko na razmerje signal-šum vplivamo s povprečevanjem signala (krajevno in časovno). Lidar pa bo tudi bolj občutljiv ob šibkejši sončni svetlobi, t.j. ob oblačnem vremenu oz. ponoči.

3.1 Očem varni lidar

3.1.1 Optične komponente

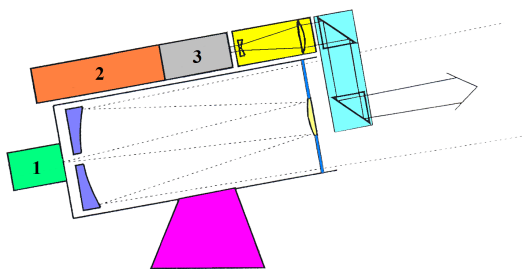
Projekt Luke Koper d.d. ter Primorskega inštituta za naravoslovne in tehnične vede (UP PINT) je bil izdelati očem varni lidar za merjenje onesnaženja zraka oziroma odkrivanje onesnaževalcev. Na ladjah namreč v lukah ponoči sežigajo smeti, kar je kaznivo. Ker ponoči ne vidimo dima s prostim očem, lukam ne preostane drugega kot stalno opazovanje območja, za katerega so odgovorne, z lidarjem. Seveda, ker pa je navaden lidar nevaren očem in ker skeniranje poteka na območju, kjer se nahajajo ljudje, je bila edina možna izbira lidarja očem varen lidar.

Na fotografiji 3.3 je predstavljen uporabljen očem varen lidar iz dveh perspektiv s ključnimi sestavnimi deli: laserskim oddajnikom, sprejemnim teleskopom ter detektorjem.

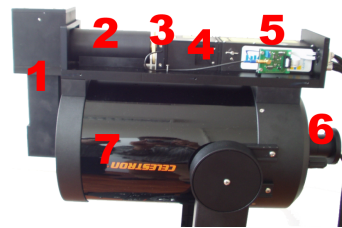


Slika 3.3: Očem varen lidarski sistem z označenimi komponentami.

Laserski oddajnik predstavlja komercialni miniaturni laserski sistem Big Sky Laser, Model Ultra, ki ga sestavlja sunkovni črpalni laser $Nd : YAG$ (pulzno delovanje laserja dosežemo s preklapljanjem dobrote) in optični parametrični oscilator (OPO) s kristalom KTP , kot je prikazano na shemi 3.4 ter fotografiji 3.5. Tu predstavlja OPO optični frekvenčni pretvornik, ki s pomočjo optično nelinearnega kristala pretvarja svetlobo črpalnega laserja v svetlobo z daljšo valovno dolžino, ki jo je mogoče spreminjati v širokem območju (več 100 nm). Optično nelinearni kristal KTP se pa odlikuje po veliki kvaliteti in visokem pragu za optične poškodbe. Z njim je mogoče doseči tudi do 60 % celokupno pretvorbo. Signalna valovna dolžina kristala KTP pa je 1574 nm pri izbranem nekritičnem faznem ujemanju in črpalni valovni dolžini 1064 nm . Izbran laserski sistem (laser $Nd : YAG$ in $KTP OPO$) se v svojem velikostnem razredu odlikuje po veliki izhodni moči (do 9 mJ/sunek pri repetitiji 20 Hz) in enostavnem vzdrževanju. Sicer je energija na sunek $\leq 9 \text{ mJ}$, repetitija $1 - 20 \text{ Hz}$, dolžina sunka 8 ns , premer laserskega žarka na izhodu 3.8 mm , divergenca laserskega žarka pa znaša 6.7 mrad .



Slika 3.4: Shema lidarskega sistema z označenimi komponentami. (1) detektor (2) Nd:YAG laser (3) OPO. [14]



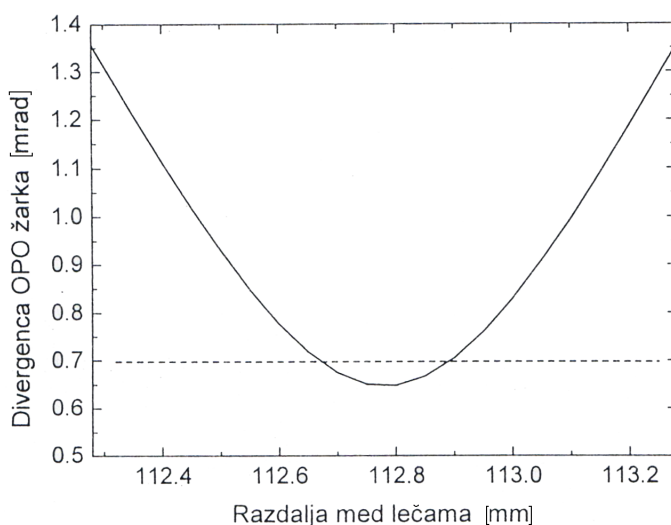
Slika 3.5: Fotografija lidarskega sistema z označenimi komponentami. (1) periskop s prizmama (2) povečevalni daljnogled (3) fotodioda (4) KTO OPO (5) črpalni laser Nd:YAG (6) detektor (7) sprejemni daljnogled. [14]

Pomemben kriterij za kvaliteto laserskega žarka je faktor M^2

$$M^2 = \frac{\pi}{4\lambda} W\theta, \quad (3.9)$$

kjer je λ valovna dolžina (1574 nm), W premer žarka v grlu ($\sim 3.8 \text{ mm}$) in θ divergenca žarka. Ocena za M^2 na podlagi podatkov proizvajalcev je $M^2 = 12.9$. Velik M^2 , sicer značilen za *OPO*, govori o prisotnosti višjih transferzalnih modov, zaradi česar je divergenca žarka relativno velika. Ker je zaželjena čim manjša divergenca, je na izhodu *OPO* povečevalni teleskop s katerim se zmanjša divergenca žarka za faktor njegove povečave.

Izhodni laserski žarek je razširjen s povečevalnim teleskopom z 10.4-kratno povečavo. Daljnogled je sestavljen iz plankonkavne leče ($f = -12 \text{ mm}$) ter plankonveksne leče ($f = 125 \text{ mm}$). Leči sta obojestransko neparjeni z antirefleksnim slojem v območju $1050 \text{ nm} - 1600 \text{ nm}$. Zbiralna leča je vpeta v nosilec, ki ga je moč z vrtenjem premikati vzdolž osi teleskopa ($0.1 \text{ mm}/36^\circ$) in tako natančno spreminjati razdaljo med lečama.

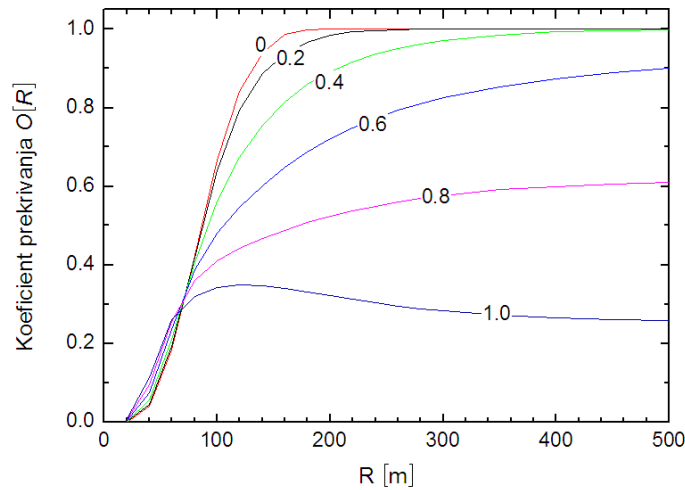


Slika 3.6: Divergenca razširjenega *OPO* žarka v odvisnosti od razdalje med lečama povečevalnega teleskopa [14].

Minimalna divergenca z uporabo povečevalnega teleskopa znaša 0.65 mrad (slika 3.6). Grlo žarka se takrat nahaja na mestu izhodne leče teleskopa in ima premer 40 mm . Upoštevajoč $\pm 0.1 \text{ mm}$ odstopanje od optimalne razdalje ostane divergenca pod 0.7 mrad .

Maksimalna gostota energije pa je v razširjenem žarku na izhodu lidarja, kjer je grlo snopa s premerom 40 mm , za tri velikostne rede manjša od praga za poškodbo oči, ki je 10^4 J/m^2 [8].

Za povečevalnim teleskopom pa je nameščen periskop z dvema pravokotnima prizmama ($A = B = C = 45 \text{ mm}$), katerih katetne površine so neparjene z antirefleksnim dielektričnim slojem za svetlobo z valovno dolžino okrog 1574 nm , ki na izhodu lidarja omogočata centralno sklopitev laserskega žarka z vidnim poljem detekcijskega sistema za enostavnejšo pravilno nastavitvev smeri. Na sliki 3.7 je prikazan koeficient prekrivanja $O(R)$ za primer, ko je razširjen *OPO* žarek predstavljen s poenostavljenim pravokotnim intenzitetnim profilom ter divergenco 0.7 mrad . Pri natančni nastavitvi smeri žarka, ko le-ta sovpada z osjo teleskopa, imamo popolno prekrivanje na razdalji 180 m .



Slika 3.7: Krajevna odvisnost koeficientov prekrivanja $O(R)$ za različne smeri razširjanja *OPO* žarka glede na os sprejemnega teleskopa. Krivulje so označene z vrednostmi kota od 0 mrad do 1 mrad v korakih po 0.2 mrad . Očitno je, da je lidar zelo občutljiv na odstopanje smeri žarka od osi teleskopa v primeru nenatančne nastavitve smeri žarka. [14]

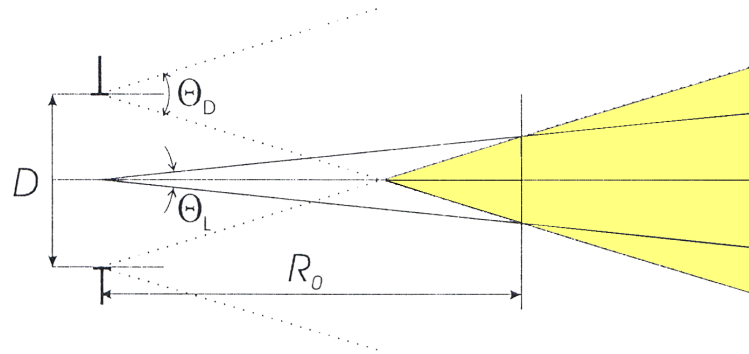
Do tega pridemo tudi s pomočjo grafičnega prekrivanja laserskega žarka z vidnim poljem detekcijskega sistema v primeru centralne sklopitve. Na levi strani slike 3.8 je vhodna apertura detekcijskega sistema s premerom D . Laserski žarek z divergenco Θ_L je sklopljen tako, da se njegovo grlo nahaja na mestu vhodne aperture D , smer razširjanja pa sovpada z osjo vidnega polja detekcijskega sistema. Kot vidnega polja je označen s Θ_D . Rumeno obarvana površina označuje območje, ki ga detekcijski sistem vidi s celotno vhodno aperturo. Iz slike 3.8 je očitno, da celotni laserski žarek vstopi v obarvano območje na razdalji R_0 . Pri razdaljah večjih od R_0 je prekrivanje med laserskim žarkom in vidnim poljem detekcijskega sistema popolno:

$$O(R \geq R_0) = 1. \quad (3.10)$$

Iz skice 3.8 vidimo, da

$$R_0 = \frac{D}{\Theta_D - \Theta_L}. \quad (3.11)$$

če pa smer laserskega žarka ter os vidnega polja detekcijskega sistema ne sovpadata, je minimalna razdalja popolnega prekrivanja večja. Ker pa obstaja želja, da se meri signal z lidarjem na čim krajši razdalji, je potrebno R_0 kar se da minimizirati. Skratka, divergenca mora biti čim manjša (uporaba povečevalnega teleskopa), kot vidnega polja Θ_D pa mora biti optimalen: večji kot je kot vidnega polja, manjši je R_0 , večja je intenziteta svetlobe ozadja (je sorazmerna s kvadratom Θ_D), detektor mora imeti večjo detekcijsko površino, slabše je razmerja signal-šum.

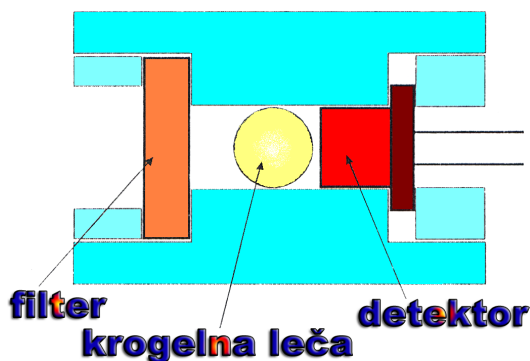


Slika 3.8: Prekrivanje laserskega žarka z vidnim poljem detekcijskega sistema v primeru centralne sklopitve. D je vhodna apertura detekcijskega sistema, Θ_D je vidni kot detekcijskega sistema, Θ_L pa je divergenca laserskega žarka. Na razdaljah $R > R_0$ je prekrivanje med vidnim poljem in laserskim žarkom popolno. [14]

Na izhodu periskopa je zaščitno okno premera 50 mm , ki je prav tako kot prizmi naparjeno proti Fresnelovim izgubam. Smer žarka je moč spreminjati z nagibanjem zgornje prizme periskopa. Z obratom mikrometerskega vijaka za 5° spremenimo nagib prizme za $87 \mu\text{rad}$ oz. odklonimo *OPO* žarek za $174 \mu\text{rad}$ v pripadajoči ravnini.

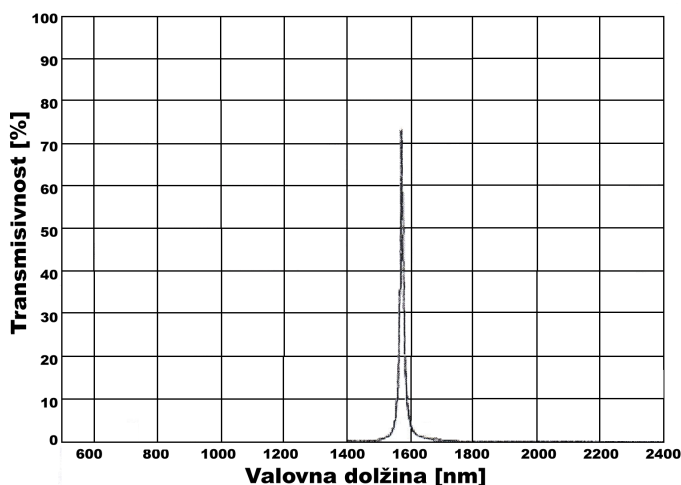
Laserski oddajnik, povečevalni teleskop ter periskop so preko plošče pritrjeni na zgornji del sprejemnega teleskopa, ki je astronomski teleskop s premerom 20 cm , vidnim kotom 1.8 mrad , goriščno razdaljo 2032 mm ter motoriziranim podstavkom. Slednje seveda omogoča natančno nastavitvev azimuta ter deklinacije oz. računalniško *3D* skeniranje ozračja.

Detekcijski modul je predstavljen na shemi 3.9 in predstavlja “okular” teleskopa. Sestavljen je iz interferenčnega filtra, zbiralne leče ter detektorja (z elektroniko), ki je *PIN* fotodioda *InGaAs* s premerom aktivne površine 0.5 mm , ki je primerna za detekcijo svetlobe pri valovni dolžini $1.55 \mu\text{m}$, odlikuje pa se po veliki odzivni hitrosti, relativno dobri občutljivosti ter majhnemu šumu.



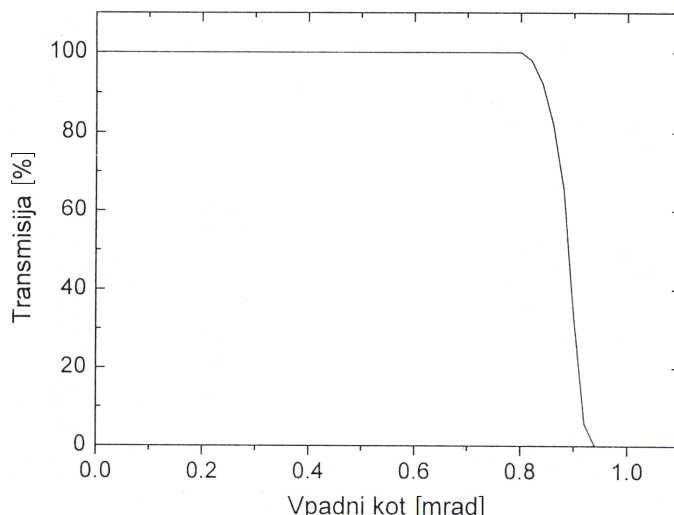
Slika 3.9: Shema detekcijskega modula [14].

Poissonove statistične fluktuacije v izmerjenem signalu, ki so posledica sončne svetlobe (ob dnevnih meritvah) in poslabšajo razmerje signal/šum, so zmanjšane z interferenčnim filtrom, ki prepušča svetlobo le v ozkem intervalu okrog valovne dolžine laserskega oddajnika. Transmisija optičnega filtra znaša 73 % (slika 3.10), polna širina na polovični višini pa 15 nm.



Slika 3.10: Transmisijska krivulja interferenčnega filtra v detekcijskem modulu [14].

Vidno polje detekcijskega sistema je nastavljeno tako, da je v goriščno ravnino sprejemnega teleskopa postavljena zaslonka, tik za zaslonko pa še zbiralna leča, ki zbere svetlobo na majhno detektorjevo površino (manjša ko je detektorjeva površina, manjši je detekcijski šum). Zbiralna leča v uporabljenem lidarju je krogelna leča s premerom 5 mm iz materiala BK7, ki je antirefleksno neparjena za območje 1100 nm – 1600 nm. Transmisija detekcijskega sistema v odvisnosti od vpadnega kota je prikazana na sliki 3.11. Pri kotu ~ 0.9 mrad pade transmisija na polovično vrednost, tako da znaša polni kot detekcijskega sistema 1.8 mrad.



Slika 3.11: Transmisija detekcijskega sistema za snop vzporednih žarkov v odvisnosti od vpadnega kota glede na os teleskopa za primer detektorja s premerom 0.5 mm . Upoštevane so le geometrijske izgube vpadnih žarkov, ki ne prispejo na površino detektorja. [14]

3.1.2 Krmilni sistem

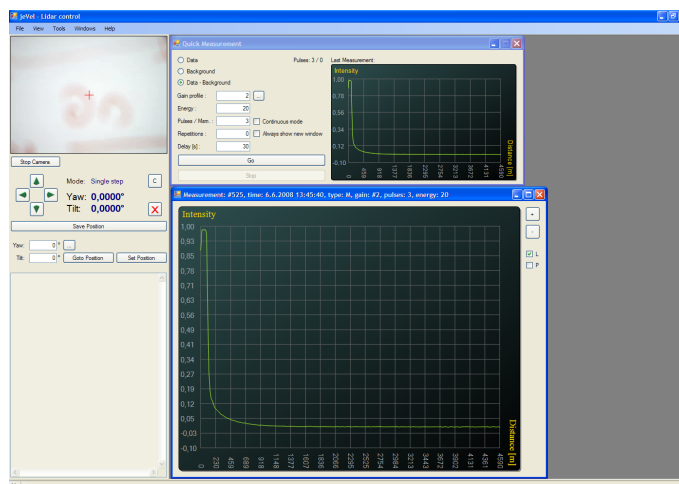
Tovarniško vgrajeni sistem za krmiljenje astronomskega teleskopa Celestron 2000, ki ga lidar uporablja za sprejem sipane svetlobe, je v osnovi zelo počasen. Koračna motorja, vgrajena v podstavek teleskopa, sta namreč mehansko vezana na pogonske osi preko reduktorjev, ki omogočajo zelo fine premike, kar sicer doprinese k natančnosti meritve a tudi k počasnosti delovanja. Hitrost premikanja teleskopa je bila povečana s pomočjo dodanih ojačevalnikov [17], zaradi česar sistem prvih nekaj 10 korakov pospešuje. Ta način delovanja je zvezen: na začetku motor najprej enakomerno pospešuje, do predefini-rane maksimalne kotne hitrosti, s katero se potem nadalje vrti. Ob ustavljanju motor enakomerno pojema, dokler se ne ustavi. Če lidar dobi povelje za ponoven premik še preden se motor popolnoma ustavi, le-ta začne pospeševati od trenutne hitrosti. V primeru premikov lidarja hkrati v horizontalni in vertikalni smeri, se motorčka premikata sočasno. Sicer še vedno obstaja prvotno premikanje astronomskega teleskopa po manjših korakih, ki omogoča bolj natančne premike na posamezen korak motorčka. Hitrost vrtenja je v tem primeru vseskozi konstantna in precej nižja, kot pri zveznem premiku. Ob ustavljanju pa se motor hipoma ustavi.

Hitrost zajemanja podatkov pri meritvah v različnih točkah pa je omejena prav s hitrostjo premikanja astronomskega teleskopa, saj je sam zajem podatkov razmeroma hiter. Na začetku meritev si najprej pomagamo s priližno ročno usmeritvijo teleskopa, ki je sicer zelo groba, vendar hitra.

3.1.3 Program jeVel

Programsko opremo jeVel je v okviru svojega diplomskega dela v programskem jeziku Microsoft C# razvil Jernej Bodlaj [17]. JeVel omogoča vključitev računalniškega vida preko web-kamere, kontrolo krmilnika za obračanje naprave, različne tipe meritev, shranjevanje in iskanje podatkov, podrobne nastavitve naprave lidarskega sistema, ki se uveljavijo avtomatsko ob zagonu, preglednega izvoza podatkov.

Program omogoča hitro/osnovno meritev (Quick Measurement), meritev v pravokotnem območju (Field Measurement), meritev v rezini (Slice Measurement) ter panoramsko meritev (Panorama).



Slika 3.12: Program jeVel za upravljanje z lidarjem, ki ga je izdelal Jernej Bodlaj za diplomsko nalogo na Fakulteti za računalništvo in informatiko leta 2007. [17]

Quick Measurement omogoča hitro meritev v izbrani smeri brez avtomatske podpore za obračanje naprave. Izbiramo lahko profil občutljivosti detektorja, energijo laserskega sunka, število laserskih signalov na meritev, število ponovitev meritve in način prikaza.

Profil občutljivosti detektorja je zaporedje 256 poljubnih faktorjev, ki se jih pred vsako meritvijo pošlje v senzor. Veljavne vrednosti faktorjev so od 0 do 1. Z faktorji občutljivosti detektorja se nastavi občutljivost sensorja za vsak kanal posebej. Tako lahko za kanal, kjer bi sicer zabilo signal, zmanjšamo občutljivost detektorja, v primeru šibkega signala, pa povečamo občutljivost detektorja.

Field Measurement omogoča več enostavnih meritev v pravokotnem območju. Meje območja izberemo sami, bodisi s kamero, bodisi pokličemo že shranjene koordinate, bodisi jih vpišemo ročno. Prav tako lahko izberemo koliko meritev želimo na območju opraviti in kje naj lidar z meritvijo začne (na robu območja, na polovici ekvidistantno velikih intervalov). Način seveda omogoča izbiro tudi vseh ostalih parametrov kot pri osnovni meritvi.

Slice Measurement omogoča meritev, s katero lahko skonstruiramo sliko podobno radarski. Meritev zajame podatke na poti od začetne do končne točke v enakomernih kotnih razmakih. Prejeti podatki se avtomatsko shranjujejo v bazo ter se na koncu prikažejo v oknu, ki je posebej oblikovano za prikaz rezine.

Panorama se uporablja za avtomatsko upravljanje enostavnih meritev in sicer na v naprej določenih položajih.

Poglavje 4

Meritve

Na Fakulteti za matematiko in fiziko (FMF) so bile izvedene testne meritve, s katerimi se je poskušalo ugotoviti optimalne nastavitve lidarja pri merjenju objektov, oblakov, meglic itd. ob različnih pogojih. V Luki Koper je bil narejen drugi set meritev, s katerim se je želelo pokazati uporabnost lidarja za zaznavanje aerosolov, kot indikatorjev onesnaženosti zraka v luki. Pri tem smo proučevali dva tipa aerosolov – prah, ki nastane pri pretovarjanju tovora ter dim, ki je posledica prepovedanega nočnega kurjenja odpadkov na ladjah v pristanišču. Na letališču v Sečovljah pa se je testiral dejanski domet lidarja.

Meritve se začne, ko laser odda sunek (triganje), ki se nato na aerosolih siplje, deloma tudi proti sprejemniku. Sprejemnik signal zbere in usmeri na detektor. Analogno-digitalni analizator pretvori analogni signal na detektorju v digitalno obliko ter ga za vsak oddan sunek vzorči s frekvenco tj. s hitrostjo zajemanja signala $\nu_v \sim 10 \text{ MHz}$, s 14-bitno ločljivostjo/kanal v 256 kanalih.

Ob laserskem sunku se aktivira števec, ki šteje s frekvenco vzorčenja $\nu_v \sim 10 \text{ MHz}$. S tem števcem hkrati omejimo maksimalen domet meritve z lidarjem, saj le 256 zaporednih vzorčenj in tako zaznavamo povratno sipan signal le določen čas ter ne čakamo na vse povratno sipane fotone med posameznimi laserskimi sunki.

Prostorsko ločljivost meritev vzdolž smeri žarka lahko določimo iz hitrosti zajemanja podatkov: $l_0 = \frac{c}{2\nu_v} \sim 15 \text{ m}$. Število bitov A/D pretvornika pove, kakšen je merilni obseg lidarja, število kanalov pa maksimalen možen doseg $l = N \cdot l_0 \sim 3.8 \text{ km}$ je teoretično gledano sicer odvisen od najmanjše intenzitete povratno sipane svetlobe, ki jo detektor še lahko zazna in hkrati loči od šuma, vendar ga v našem primeru omejimo z omejenim časom kar predstavlja dejanski doseg.

Pri vseh meritvah se pojavi začetni vrh, ki je posledica vstopa laserskega žarka v vidno polje detekcijskega sistema. Ta je seveda večji, če je tik pred lidarjem ovira, kakršno je npr. predstavljala okenska mreža v primeru meritev na FMF (slika 4.2)), ki je povzročila zelo intenzivno sipanje/odboj že v bližini lidarja.. Vsi naslednji vrhovi pa so posledica prisotnosti aerosolov v ozračju ter krajinskih elementov, kot so npr. stavbe in drevesa. V primeru merjenja na FMF (slika 4.1) je bilo vedno dokaj čisto ozračje. To je razvidno iz meritev, ki ne kažejo nobenih izrazitih struktur v porazdelitvi aerosolov.



Slika 4.1: Lokacija meritev na Fakulteti za matematiko in fiziko (FMF) je obkrožena z rdečo.



Slika 4.2: Slabost pri merjenju na FMF je predstavljala mreža.

Glavni namen testnih meritev na FMF je bil testiranje zmožnosti lidarja oz. preizkus delovanja lidarja pri različnih nastavitvah laserja, načinih merjenja in povprečevanja signala. Tako smo pomerili kaj se dogaja, če se spreminja število signalov, ki jih lidar pošlje zaporedoma in jih nato povpreči, če se spreminja črpalno energijo laserja. . . Zanimalo nas je, kako je s ponovljivostjo meritve, s signalom in šumom glede na programski del lidarja (slika 3.12), kakšno je ozadje, kako natančno lahko detektiramo rob stavb oz. dreves. Slednje je bilo za nas zelo pomembno, saj bi si lahko z detekcijo roba stavb/dreves pomagali pri ročnem nastavljanju smeri kamere (slika 3.3), ki prikazuje živo sliko merjenega območja, da bi se ujemala s smerjo merjenja lidarja. Kamera se je namreč pri transportu vedno premaknila. Preverili smo tudi ali lahko spremljamo dinamiko megle oz. oblakov.

V Kopru se je merilo pred stavbo Primorskega inštituta za naravoslovne in tehnične vede (UP PINT), na Srednji tehniški šoli (STŠ) Koper ter v Luki Koper d.d. (slika 4.4). Pred UP PINT je bila v času meritve zelo gosta megla, ki je bila tudi zelo blizu lokacije lidarja (slika 4.3). Odziv, ki smo ga dobili, ko smo hoteli spremljati dinamiko megle, je bil do neke mere pričakovan. Signal je, zaradi intenzivnega sipanja ob vstopu v meglo, zabilo, hkrati pa oslabilo oddano svetlobo do te mere, da njen sipan delež iz notranjosti megle, ki je prišel nazaj do sprejemnika, ni presegel občutljivosti praga A/D pretvornika glede na maksimalen signal z roba megle. Zato smo detektirali le rob megle oziroma vstop laserskega žarka v meglo, nismo pa mogli proučevati samega dogajanja v notranjosti megle.



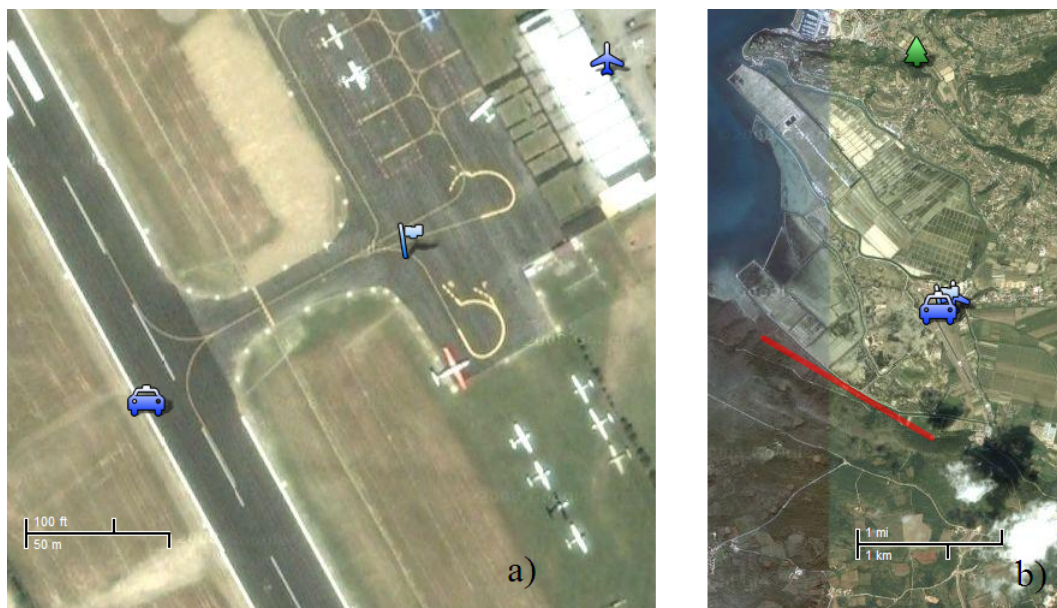
Slika 4.3: Merjenje pred stavbo Primorskega inštituta za naravoslovne in tehnične vede. Megla je celoten signal popolnoma zabila.

Na STŠ Koper smo detektirali dim iz dimnika ladje, ki je bil s prostim očesom slabše viden. V Luki Koper d.d. pa je bilo narejenih nekaj meritev celotnega območja, pri čemer smo zaznali aerosole na terminalu za razsuti tovor, kar pa je bil tudi eden od ciljev diplomske naloge.



Slika 4.4: Lokacija lidarja pri merjenju pred UP PINT je označena z rumenim “žebličkom”, lokacija lidarja pri merjenju na STŠ Koper z modrim “žebličkom”, pri merjenju v Luki Koper d.d. pa modro zastavico. S svetlo zelenim je označeno področje merjenja s STŠ Koper, s temno zelenim pa Evropski energetski terminal oz. področje merjenja v Luki Koper d.d. Z vijoličnim “žebličkom” so označeni detektirani silosi, ki so dali najmočnejši odziv pri meritvi 4.23. Z “ognjem” je označeno področje, kjer smo detektirali aerosole, z rdečo črto pa prednji del ograde v Luki Koper d.d., ki smo ga detektirali. Zemljevid je narejen s pomočjo spletne strani [http : //maps.google.com/maps](http://maps.google.com/maps).

Zadnji sklop meritev pa se je opravljal na Letališču Portorož (slika 4.5), kjer se je testiral dejanski domet lidarja. Žal uporabljeni lidar še ni popolnoma operativen, saj je kamera, s katero je bil nadomeščen daljnogled za lociranje objektov (finderscope), namenjena snemanju v notranjih prostorih. Zato je uporabna le za lociranje objektov v mraku oziroma ob šibki svetlobi, za lociranje objektov ob močni sončni svetlobi pa je neprimerna. Zato ni bilo mogoče natančno lociranje okoliških objektov, ki bi jim lahko z uporabo naprave GPS določili natančne lokacije in njihovo oddaljenost od kraja meritev primerjali z ocenami pridobljenimi iz lidarskega signala. Zato smo se zanesli le na oceno na podlagi lidarskega signala in hkrati preverili do katere razdalje še zaznamo okoliške objekte in hribe. Da pa so razdalje pridobljene z meritvami z lidarjem kolikor toliko točne, pa smo preverili s pomočjo spletne strani [http : //maps.google.com/maps](http://maps.google.com/maps).



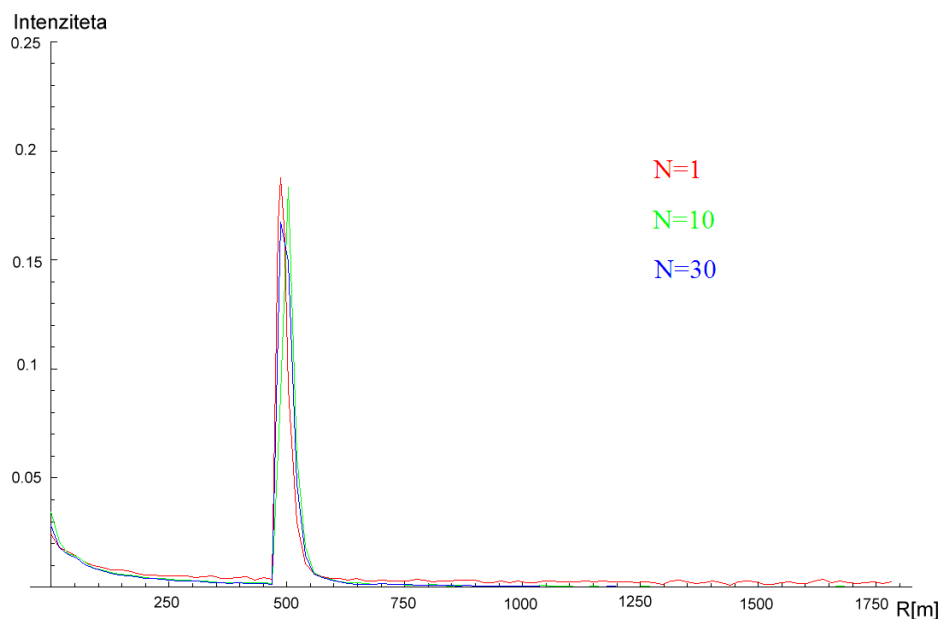
Slika 4.5: Na sliki a) je bil na portoroškem letališču na mestu zastavice lidar. Na mestu avta je bila tarča, ki smo jo želeli uporabiti za testiranje dometa. Na sliki b) rdeča črta ponazarja vznožje hriba, ki smo ga pomerili, smrekica pa najbolj oddaljen detektiran grič. Zemljevid je narejen s pomočjo spletne strani [http : //maps.google.com/maps](http://maps.google.com/maps).

4.1 Spreminjanje števila signalov in črpalne energije laserja

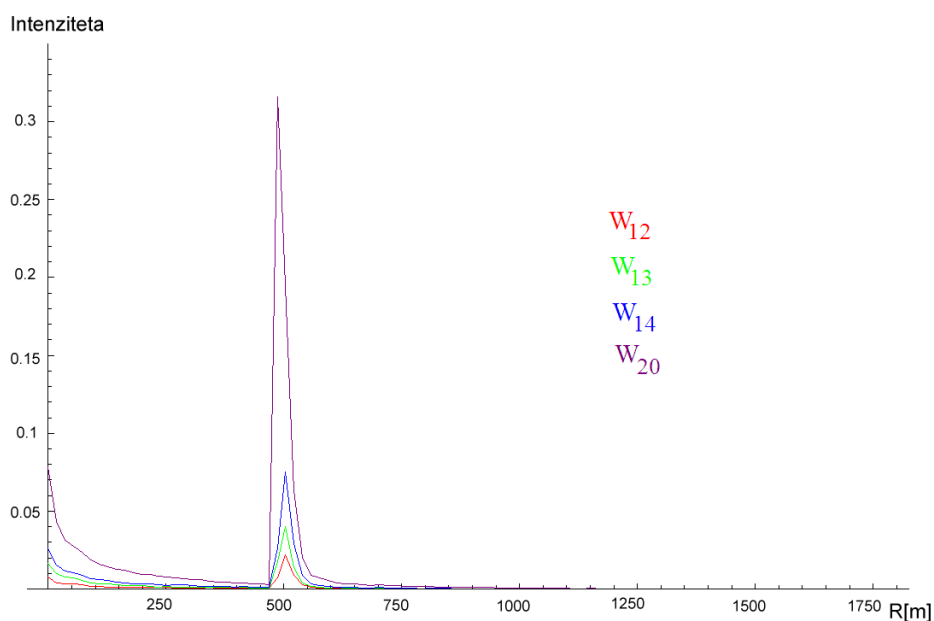
Ker smo se s sistemom lidar srečali prvič, smo morali preveriti čisto osnovne stvari, za katere smo vedeli, kakšen rezultat lahko pričakujemo. Tako smo preverili, kako število signalov, ki jih program nato povpreči v en sam odziv, vpliva na šum in domet lidarja ter kako je signal odvisen od črpalne energije laserja, ki je razdeljena na 20 stopenj. Število pulzov smo večali od 1 do 50, črpalno energijo laserja pa od 1. do 20. stopnje. Merili smo vedno v isti točki drevesa. Žal bolj statičnega (npr. stavbe) in oddaljenejšega objekta, ni bilo v lidarjevem vidnem polju. Omejeni smo bili po eni strani z ogrođjem okenske mreže (slika 4.2)), po drugi strani pa z omejeno prenosljivostjo lidarja zaradi njegove teže ter dostopnostjo električne energije, v primeru iskanja ustrežnejše lokacije za meritve.

Pričakovalo se je, da bo z večanjem števila signalov dobljeni povratno sipani signal bolj gladek oz. da bo Poissonov šum minimiziran. Z večanjem črpalne energije laserja pa smo pričakovali, da bo vrh v signalu, ki bo posledica odboja od drevesa, vedno višji.

Iz slike 4.6 je razvidno, da se s povprečenjem preko več signalov izpovpreči beli šum in se lahko tako podaljša domet. To je pomembno predvsem v primeru bolj oddaljenih sipalcev, saj oddana svetloba z razdaljo slabi zaradi sipanja in absorpcije kot tudi zaradi divergence, kar je posledično vzrok za šibkejši signal iz večjih razdalj.



Slika 4.6: Meritev v isti točki drevesa ob različnem številu signalov, ki so nato povprečeni. Za rdečo krivuljo je bil uporabljen 1 signal, za zeleno 10, za modro pa 30 signalov. Vrh ponazarja drevo, ki je bilo oddaljeno $500\text{ m} \pm 15\text{ m}$. V primeru 1 signala je statistična napaka večja, kar se vidi tudi iz grafa, če rdečo krivuljo primerjamo z drugima dvema.



Slika 4.7: Meritev vedno v isti točki drevesa, ki je bil oddaljen $500\text{ m} \pm 15\text{ m}$ ob različnih črpalnih energijah laserja. Signal smo dobili šele pri črpalni energiji nivoja 12, ki je ponazorjen z rdečo barvo. Meritev pri črpalni energiji nivoju 13 je zelena, pri črpalni energiji nivoja 14 modra, pri črpalni energiji nivoja 20, ki je maksimalen možen, pa je graf vijoličen.

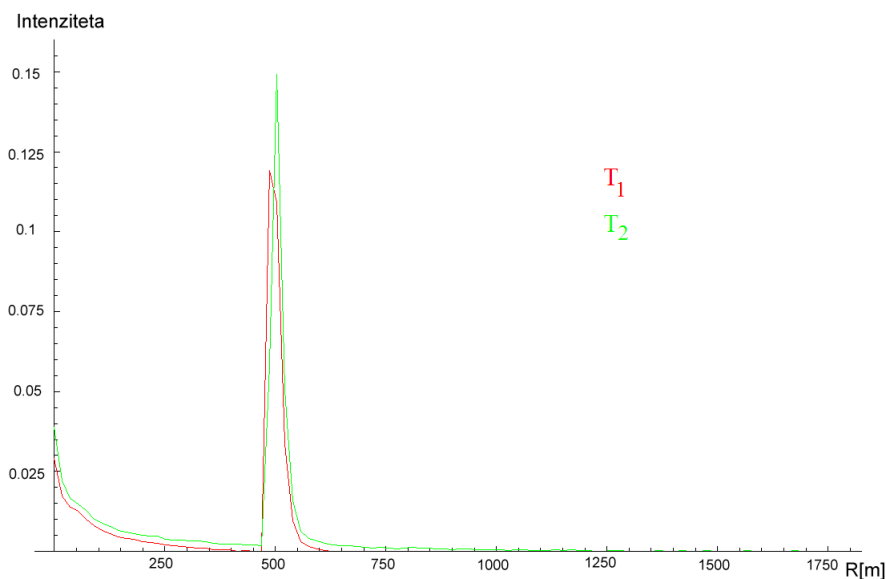
Preko koliko pulzev povprečiti je odvisno od merjenega sipalca. Če je sipalec blizu ali pa če nas zanima dinamika sipalcev, povprečimo preko manj signalov. Če pa je merjenec oddaljena tarča s počasnejšo dinamiko, povprečimo preko več signalov, da zmanjšamo šum in s tem povečamo razmerje signal-šum. Upoštevamo pa lahko tudi, da se s številom signalov, po katerih povprečimo, podaljša čas merjenja.

Pri črpalni energiji laserja nivoja 11 ni bilo odziva. Najmanjši črpalna energija laserja pri kateri dobimo odziv je 12, nato se odziv veča z višanjem črpalne energije laserja, kar pa je bilo tudi pričakovano (slika 4.7).

Skratka, če je naš merjenec bližje, lahko nastavimo laser na manjšo moč, sicer lahko signal celo zabijemo. V primeru oddaljenih in šibkejših tarč pa pride v poštev maksimalna črpalna energija laserja.

4.2 Ponovljivost meritev ob programskem premikanju lidarja

Ponovljivost meritev predstavlja pomembno informacijo o natančnosti zaključkov. Zato smo tarčo (drevo) pomerili v neki točki, nato pa smo po vmesnem spreminjanju smeri meritve poskušali meritev ponoviti v isti točki pri istih nastavitvah lidarja.



Slika 4.8: Meritvi v isti točki drevesa ob istih nastavitvah lidarja. Prva meritev je označena z rdečo, druga pa z zeleno. Vrh ponazarja detektirano drevo, ki je bilo oddaljeno $500\text{ m} \pm 15\text{ m}$.

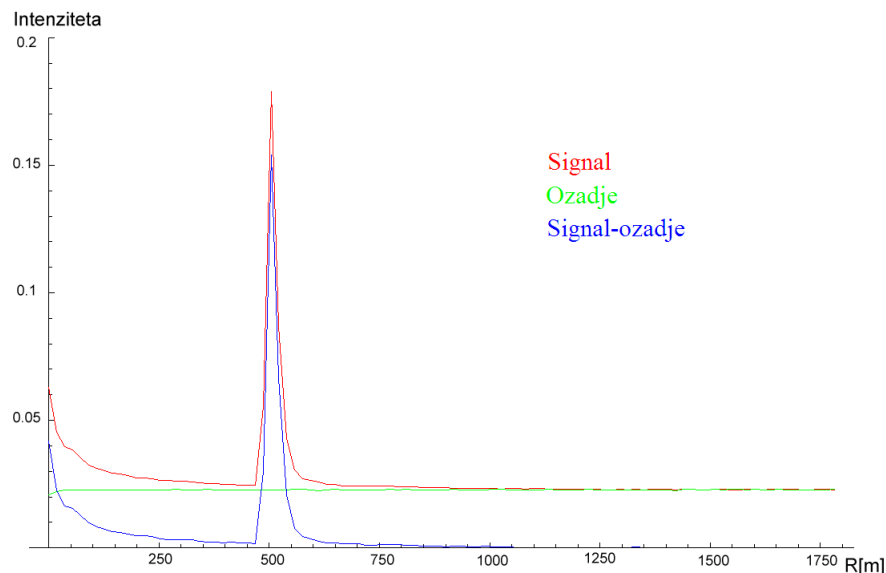
Na sliki 4.8 se vidi, da ponovljivost meritve ni najboljše. Lege vrhov se razlikujejo za $\sim 20\text{ m}$, medtem ko je prostorska ločljivost 15 m . Intenziteti vrhov se razlikujeta za $\sim 15\%$ glede na višji vrh. Prav tako je višina na polovični višini v primeru višjega signala za $\sim 20\%$ manjša od signala, kjer smo dobili nižji vrh, kjer meri širina na polovični

višini ~ 40 m. Pred vrhom pa je celo krivulja z višjim vrhom (zelena na sliki 4.8) dvignjena nad drugo (rdeča na sliki 4.8) za 0.2 % glede na maksimalno možno detektirano intenziteto, ki je 1.

Ostaja vprašanje, če smo se res vrnili v isto točko, saj smo med celotnim testnim procesom ugotovili, da je ravno vračanje lidarja v začetno točko problem. S to meritvijo smo ugotovili, da je bolje, če ne izvajamo ponovne meritve ampak le povečamo število signalov, saj pri ponovni nastavitvi položaja lahko pride do napake. Ta del je Jernej Bodlaj popravil v samem programskem delu lidarja [17], žal pa kasneje, kot so se izvajale meritve.

4.3 Signal ter šum

Preverili smo tudi pravilnost delovanja programa, ki avtomatično odšteva povprečno vrednost ozadja (šum) od celotnega signala, da bi se prepričali, če smemo pred meritvijo izbrati, da program sam odstrani šum.



Slika 4.9: Meritev celotnega signala, ozadja ter njune razlike pomejena na drevesu oddaljenem $500\text{ m} \pm 15\text{ m}$. Celoten signal je rdeč, ozadje je zeleno, njuna razlika, ki je enaka ali jo izračunamo naknadno z odštevanjem ozadja od signala ali pa če vse prepustimo programu, pa je modra.

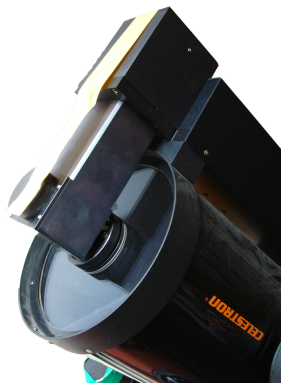
Na sliki 4.9 je prikazana meritev šuma, celotnega signala in njuna razlika v eni točki drevesa. Vidi se, da je celoten signal le za šum premaknjen navzgor glede na signal, ki mu je bil odstranjen šum ali ročno ali pa s programom.

Zaključek je očiten: če nas zanima le signal brez ozadja, pustimo programu, da naredi svoje, saj je vseeno ali v nadaljnji obdelavi meritev izračunamo razliko ali pa to za nas že v naprej opravi programski del lidarja.

Kar pa še lahko vidimo iz te meritve pa je, da je ponovljivost meritve v eni točki odlična, če lidarja ne premikamo s programom. Namreč, te meritve so bile izvedene zaporedoma brez premikanja lidarja, v isti točki. Program lidarja žal ne omogoča, da bi lahko hkrati pomerili in ozadje in celoten signal in programsko dobljeno njuno razliko.

4.4 Ozadje

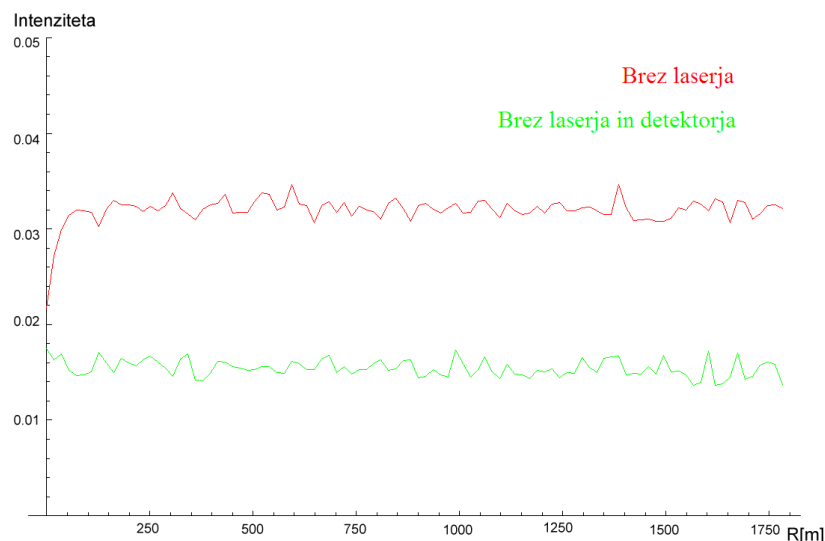
Meritve ozadja ob dnevi svetlobi ob prekritem laserju oz. ob prekritem laserju ter detektorju (detektor smo prekrili, kolikor se je dalo ob danih možnostih) so nas zanimale iz razloga, da bi videli, koliko sevanja ozadja (v tem primeru sončne svetlobe), ki predstavlja enega od virov šuma v meritvi, pride do detektorja.



Slika 4.10: Prva meritev se je izvedla s pokritim laserjem.



Slika 4.11: Druga meritev se je izvedla s pokritim laserjem ter detektorjem.



Slika 4.12: Meritve ozadja/šuma ob prekritem laserju (rdeča krivulja) oz. ob prekritem laserju ter detektorju (zeleno krivuljo). Žal detektorja nismo imeli s čim popolnoma prekriti, tako da je lahko svetloba dostopala do sprejemnika s strani. Vendar je bil laser ob merjenju v notranjih prostorih, tako da direktni sončni žarki niso imeli dostopa do površine sprejemnika.

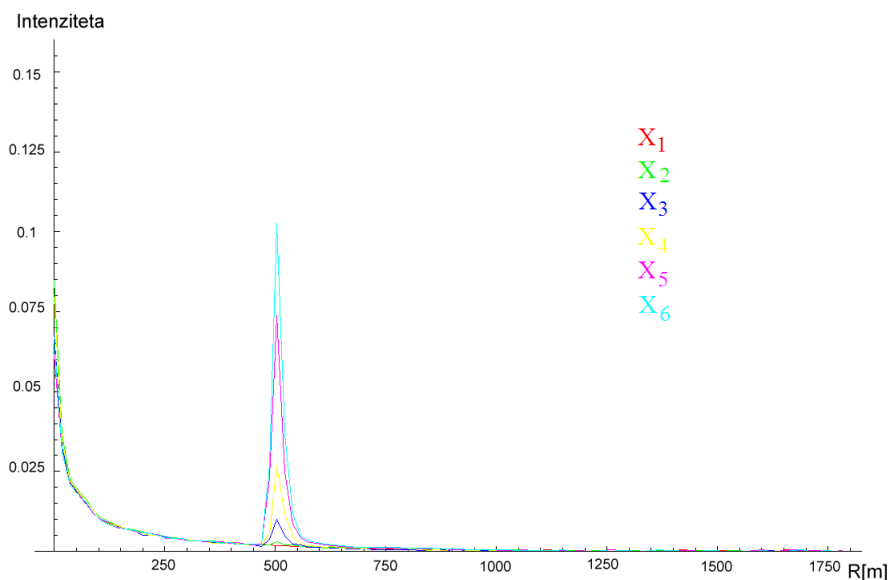
S slike 4.12 je očitno, da je v primeru le prekritega laserja šum posledica detekcije dnevne svetlobe na detektorju, v primeru, ko (nepopolno) prekrijemo še sprejemnik, pa je signal posledica svetlobe, ki s strani prodre do sprejemnika mimo pokrova. Vendar so ti dogodki povsem naključni, zato ima signal ozadja obliko belega šuma okoli neke konstantne vrednosti določene s prepustnostjo zatemnitve oz. odličnostjo prekritja sistema.

Zaključek te meritve je, da je optika lidarja svojim z uporabljenim interferenčnim filtrom (slika 3.9) odlično narejena, saj je izmerjen signal zaradi ozadja - sončne svetlobe majhen, kar nam omogoča merjenje tudi podnevi.

4.5 Detekcija roba

Ker je kamera (slika 3.3), ki nam kaže živo sliko v smeri meritve (pove, kaj z lidarjem "gledamo"), z vidika nastavitve smeri zelo občutljiva na dotike in se pri transportu pogosto premakne, jo moramo vedno znova nastaviti. To pomeni, da moramo z lidarjem poiskati 2 robova (navpičnega in vodoravnega), da lahko kamero pravilno nastavimo.

Umerjanja kamere s smerjo merjenja z lidarjem je bil tudi povod detektiranja roba. A ker s položaja, kjer smo imeli mi postavljen lidar, nismo z lidarjem videli nobene stavbe, smo ponovno za merjenec izbrali $500\text{ m} \pm 15\text{ m}$ oddaljeno drevo, ki smo ga pomerili v horizontalni smeri s pomočjo koračnega motorčka v ekvidistantnih korakih po 0.01° .



Slika 4.13: Detekcija roba s premikanjem koračnega motorčka za kot 0.01° . Merili smo od leve proti desni in detektirali levi rob drevesa začevši s točko $X_1 = 0$, pa po 0.01° naprej do X_6 .

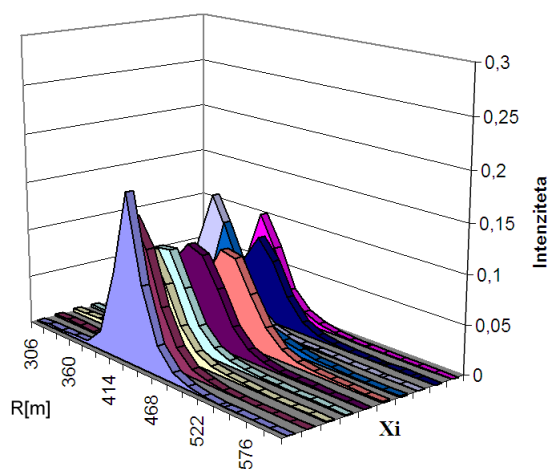
Upoštevajoč divergenco žarka, ki je $0,7\text{ mrad}$, širino žarka na izhodu 40 mm , je žarek pri $500\text{ m} \pm 15\text{ m}$, kjer se nahaja drevo, širok $0.74\text{ m} \pm 0.02\text{ m}$. Ko ta celoten žarek pade na drevo, imamo maksimalen možen odboj, kar je na sliki 4.13 v primeru merjenja v točki X_6 (vsi naslednji vrhovi niso bili večji od X_6). Rob drevesa pa je bil detektiran

takrat, ko je polovica žarka na merjencu oz., ko rob detektiramo s centrom žarka. Na sliki 4.13 ustreza modra krivulja maksimalno velikemu signalu. Polovica tega signala pa je na polovici vrhov roza in rumene krivulje. Torej, če bi se s koračnim motorčkom premikali po 0.005° in začeli meriti v točki, ki je bila naše izhodišče, bi s centrom žarka ravno zadeli rob drevesa. Tako smo zgrešili rob za 0.005° , kar pa na naši razdalji lidar-sipalec $500\text{ m} \pm 15\text{ m}$ pomeni, da je prečna ločljivost 0.04 m .

Izkazalo se je, da z lidarjem detektiramo rob zelo natančno, saj ima možnost finega koračnega premikanja merilnega sistema. Seveda se ta natančnost z razdaljo manjša, a ima lidar doseg le dobre 3 km , tako ne prihaja do večjih odmikov. Za vsak km , če se premikamo s koraki po 0.01° , je ločna natančnost dodatnih 0.08 m . Dobra stran natančne detekcije roba z lidarjem je torej, da lahko kamero, ki nam prikazuje dejansko sliko preiskovanega območja, natančno poravnamo s smerjo laserskega žarka.

4.6 Vpliv meglice na detekcijo objekta

Želeli smo detektirati statične elemente krajine (drevesa), ki so bili v meglici. Zanimal nas je signal dreves: ali ga bomo dobili ali ne. S prostim očesom smo namreč videli vsa drevesa, tako smo predpostavili, da bi jih lahko zaznal tudi lidar. Meritev horizonta v megli je bila izvedena v 10 ekvidistantno oddaljenih točkah horizonta v razmaku $0,5^\circ$.



Slika 4.14: Meritev v 10 ekvidistantno oddaljenih točkah horizonta v meglici razmaknjenih za 0.5° . X_i gre od 0° do 10° , i pa označuje zaporedno meritev

Najbližji krajinski element, ki bi ga lahko detektirali, je bilo drevo oddaljeno $\sim 500\text{ m}$. Sicer smo ga lahko s prostim očesom videli skozi meglico, a z lidarjem ga nismo detektirali (slika 4.14), saj je bila meglica, od nas oddaljena le dobrih 400 m , pregost medij, da bi signal prišel do drevesa in nazaj.

Širina na polovični višini vrha je bila v primeru drevesa v meglici (slika 4.14) večja kot pa v primeru drevesa (slika 4.8) v soncu. Merila je od 50 m pa do 100 m . Kar pa je tudi dokaz, da nismo pomerili drevesa, saj je drevo boljši sipalec in ima zato bolj oster vrh (manjša širina na polovični višini). Kot drugo, pa premer krošnje drevesa ni večji niti od

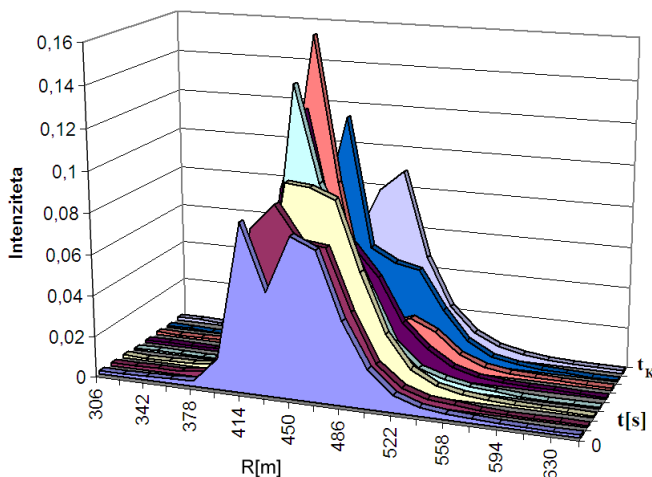
50 m, kar je bila najmanjša širina na polovični višini v primeru poskusa detekcije drevesa v meglici.

Prav tako se je spreminjala oblika signala. Dobili smo celo dva vrha. Žal pa drugi vrh ni bil krajinski element, ampak le še en večji kosem meglice. Skratka, če naš lidar ne bi bil očem varen, in bi deloval pri višjih energijah, bi z njim lahko preiskovali celo dlje v notranjost meglic in ne le dobrih 100 m v meglici, kjer je vidljivost s prostim očesom večja od merilnega dosega lidarja. Tako lidar ne bo uporaben za detektiranje in lociranje ladij, ki z dimom onesnažujejo zrak v Luki Koper, kadar bo v ozračju prisotna meglica ali megla.

4.7 Dinamika meglice

Pogost pojav v Ljubljani je jutranja megla, ki izgine zaradi segrevanja ozračja ter vetrov. Nas je zanimalo, če sploh lahko z našim lidarjem opazujemo razkroj megle. Meritev smo izvedli v eni točki, kjer ni bilo krajinskih elementov, v enakomernem časovnem zaporedju z razmikom 15 s, da bi lahko videli efekt lokalnih vetrov na meglo.

Do razkroja megle običajno pride zaradi mešanja vlažnega zraka z okoliškim bolj suhim zrakom, zaradi ogretja plasti ozračja, kjer se megla nahaja, ali zaradi dotoka hladnejšega in bolj suhega zraka, ki izpodrine vlažen in toplejši zrak. Če je megla dovolj tanka, jo tako lahko razkroji sonce, ki skozi meglo segreje tla in povzroči termično konvekcijo. Slednja povzroči mešanje zraka in prenos toplote v meglo kar povzroči, da vodne kaplice izparijo. Tudi v našem primeru je razkroju megle botroval učinek vetra in sonca.



Slika 4.15: Meritev izginjanja jutranje megle. Zaradi preglednosti je na grafu le 8 krivulj v časovnem razmaku 15 s.

Na sliki 4.15 je prikazana dinamika izginjanja megle. Prisotnost lokalnih vetrov se vidi ob primerjavi vse od svetlomodrega do oranžnega grafa, kjer se je spremenila oblika krivulje iz edinega ostrega vrha (svetlomodra krivulja) v razvlečeno krivuljo z dvema vrhovoma (oranžna krivulja). To je posledica lokalnega vetra, ki je razbil meglico na dva dela.

Prisotnost lokalnih vetrov potrdi tudi primerjava rumenega s svetlomodrim grafom, kjer je očitno, da je veter pomagal pri premikanju večjih delov megle, saj so se vrhovi premaknili (oblika vrhov ni primerljiva).

Takoj za oranžno krivuljo pa je signal v merjeni točki začel padati in se ni več dvignil. To pa je posledica vertikalnega gibanja zraka, ki ga povzroča termična konvekcija. Seveda v povezavi z lokalnim vetrom, ki je redčil meglo na manjše in manjše kosme, kakršne sonce lažje “razgradi” (kot raztapljanje topljenca v topilu, kjer pomagamo z mešanjem).

4.8 Določanje višine oblakov

V 5 ekvidistantno oddaljenih točkah v razmaku 0.07° pri najvišji črpalni energiji laserja, ki je potrebna zaradi velike oddaljenosti tarče in s tem manjšega signala, je bil pomerjen oblak, ki je bil dovolj blizu, da smo ga še lahko detektirali.

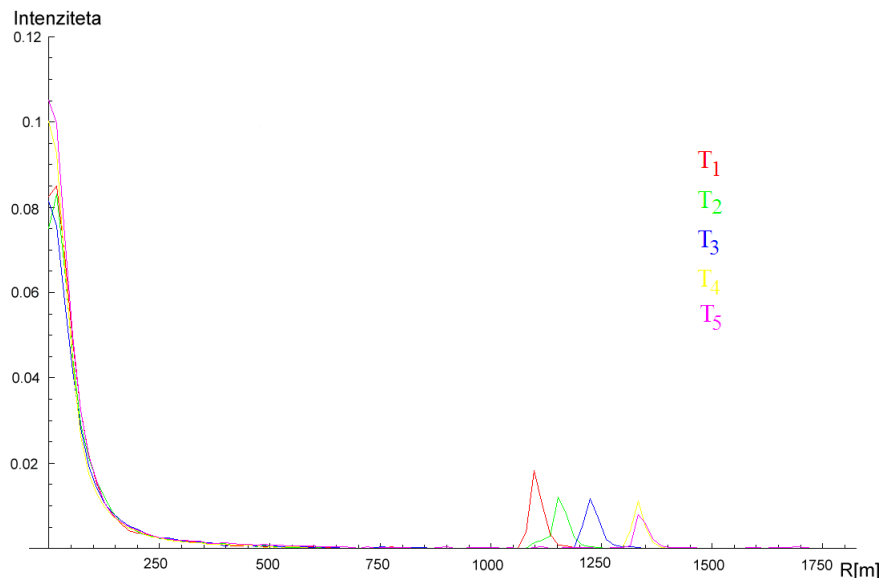


Slika 4.16: Oblak, katerega višino baze smo določali z lidarskimi meritvami iz sobe na FMF.

Med posameznimi meritvami so bile le 4 s, tako da meritev predstavlja lokalno relativno gostoto kapljic v oblaku ter oddaljenost od merilnega sistema v času meritve. Govorimo lahko le o relativni gostoti kapljic v oblaku, ker dejanske gostote iz lidarskih meritev z uporabljenim sistemom ne moremo oceniti, ker ne poznamo dejanske porazdelitve kapljic po velikosti in učinka različnih velikosti kapljic na lidarski signal. Podoben učinek z vidika signala lahko namreč povzroči sipanje laserskega snopa na manjšem številu večjih kapljic kot na večjem številu manjših kapljic. Prav tako pa zaradi debeline in gostote kapljic merjenega oblaka ne moremo premeriti v celoti, saj nam signal preveč oslabi že v spodnji plasti, da bi iz notranjih plasti lahko še kaj zaznali (podobno kot v primeru megle v Kopru). Skratka, z lidarjem bi lahko sledili spreminjajočemu se oblaku v vseh pogledih: premikanje oblaka kot celote (ko se premika v smeri proti nam bi lahko detektirali približevanje njegovega roba) ter spreminjanje njegove lokalne relativne gostote, kar je oboje časovna spremenljivka, prav tako bi pa lahko premerili samo obliko počasi spreminjajočega se oz. počasi potujočega oblaka in tako dobili 2D sliko. Žal zaradi šibke energije izhodnega žarka ter omejenega dometa lidarja, 3D slike oblaka ne moremo dobiti,

razen če v primeru, če bi bil oblak tanek in redek.

Žal pa niti 2D slike baze oblaka nismo mogli dobiti, ker merilni sistem ni bil ustrezno zavarovan proti dežju, saj je začelo deževati v merilno sobo na FMF, kar pa je pomenilo konec meritev, saj je že začelo padati po kablovju lidarja in samem lidarju. Če bi seveda lidar prestavili bolj v notranjost sobe, da bi ga sicer zavarovali pred dežjem, bi naš merjenec ušel iz našega merilnega območja.

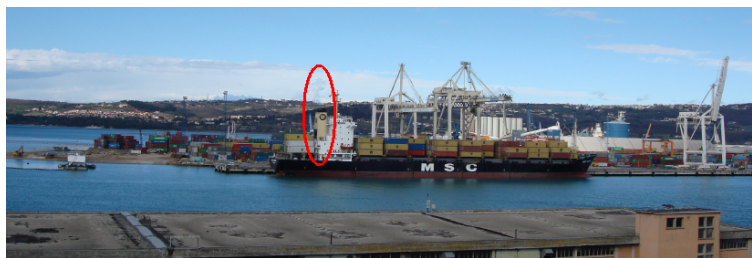


Slika 4.17: Meritev 5 različnih točkah oblaka s slike 4.16 razmaknjenih za 0.07° na premici, ki je $\sim 75^\circ$ nagnjena glede na vodoravno os lidarja. Meritve so bile izvedene v razmaku 4 s. Prva meritev je označena s T_1 , zadnja pa s T_5 .

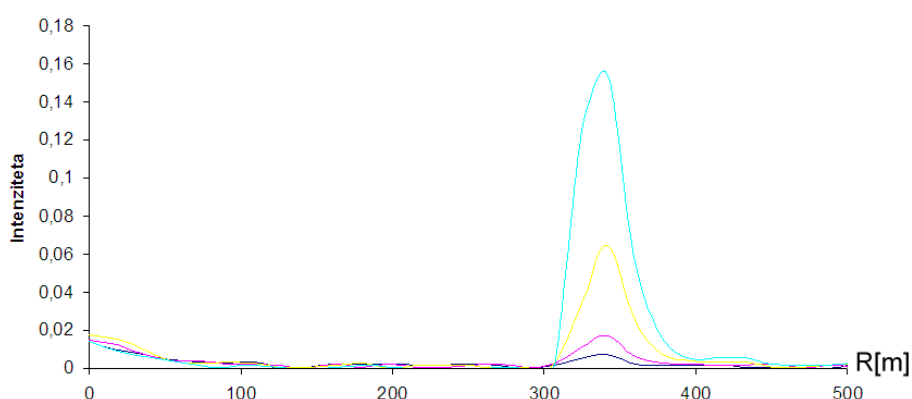
Kot glede na vodoravno os lidarja, pod katerim smo merili oblak, lahko le grobo ocenimo, saj lidarju lahko vedno z nova izberemo izhodiščni položaj $(0, 0, 0)$. Prav tako lahko lidar premikamo ročno, pa se v programu lega ne prenastavi. Groba ocena za kot bi bila 75° , merili pa smo v zadnjem nadstropju FMF, kar je nekje med 10 m in 15 m. Baza oblaka bi tako za prvi in najvišji vrh na sliki 4.17 znesla 1070 m.

4.9 Detekcija dima z ladje

Iz najvišjega nadstropja Srednje tehniške šole Koper je bil lep razgled nad celo Luko Koper. Videle so se ladje in različni kontejnerji, ki so jih z dvigali premikali, kar smo zaznali tudi z lidarjem, čeprav to ni bil primarni namen izvedene meritve, temveč smo želeli zaznati morebitne izpuste delcev – dima z ladij. Zaznavanje onesnaženja z ladij, zaradi sežiganja odpadkov, je namreč osnovni namen očem varnega lidarja, ki je bil razvit na UP PINT. Dim je bil s prostim očesom slabo viden in smo ga dejansko opazili šele z lidarskim pregledom območja. Kot je razvidno iz slike 4.19 smo ladjo in njene izpuste iz dimnika zaznali na oddaljenosti nekaj manj kot $335 \text{ m} \pm 15 \text{ m}$ od mesta meritve v smeri SV.



Slika 4.18: Ladja v pristanišču Luke Koper. Iz njenega dimnika, ki je označen z rdečo, se "vali" z lidarjem detektiran dim.



Slika 4.19: Meritev dima na ladji. Svetlo modra krivulja ponazarja dim kmalu po izhodu iz dimnika. Vse ostale so pomerjene višje.

Slika 4.19 prikazuje lidarski signal zaradi dima, ki se vali iz dimnika ladje (slika 4.18). Najvišji odziv je bil pomerjen bližje dimniku. Obstaja možnost, da se v vrhu svetlo modre krivulje zaradi netočkastega žarka skriva poleg signala zaradi dima tudi še del, ki pripada odboju dela laserskega žarka na samem dimniku. Ker pa je širina na polovični višini za svetlo modro krivuljo $\sim 45\text{ m}$, dimenzije dimnika pa so manjše, glavnini signala gotovo botruje dim iz ladje. Vse ostale krivulje so pomerjene še višje, kjer se je dim že volumsko razširil oz. se je koncentracija aerosolov zmanjšala.

Za vsemi vrhovi v lidarskem signalu zaradi dima pa se je pojavil še manjši vrh, za katerega nismo mogli določiti vzroka.

Zaradi težav z računalniškim krmiljenjem oziroma premikanjem lidarja preko programa jeVel, smo kote meritev nad horizontom nastavljali ročno in jih tako nismo mogli natančno določiti. Posledično ne moremo določiti tudi višine merjene točke nad tlemi.

Meritev kaže, da lahko z lidarjem dokaj natančno lociramo vir onesnaženja zraka (smer in oddaljenost), kar bi v operativni rabi bilo v veliko pomoč Luki Koper pri ukrepanju zoper onesnaževalce, še posebej v nočnem času.

4.10 Detekcija premogovega prahu

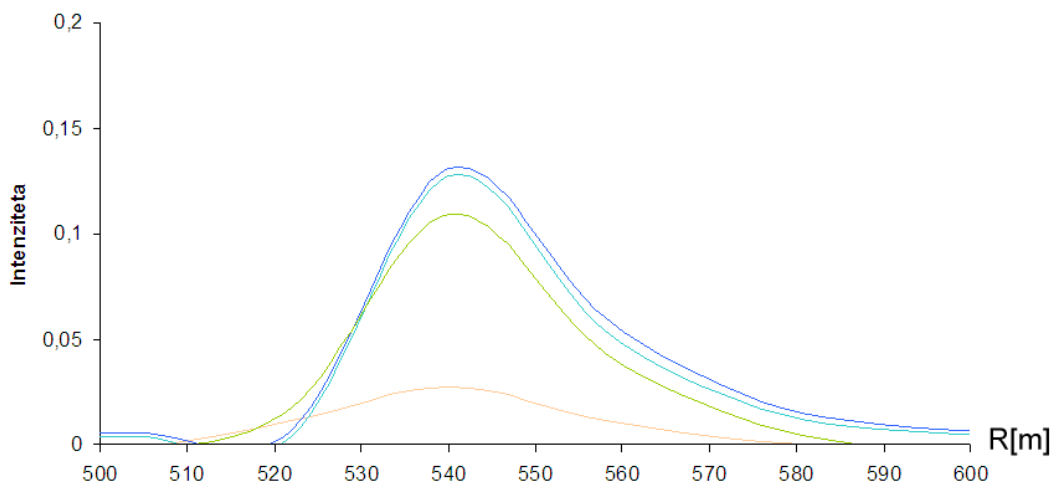
Delni cilj diplomske naloge je bil dosežen v Luki Koper, kjer smo uspeli detektirati aerosole na terminalu za razsuti tovor. Kljub konstantnemu polivanju kupov premoga in podobnih razsutih tovorov, je zaradi močnega vetra delce premoga dvigalo v zrak v koncentracijah vidnih s prostim očesom.



Slika 4.20: V ozadju se vidi kup razsutega premoga označenega z rdečo, ki ga je močan veter občasno prašil na okrog.



Slika 4.21: Konstantno polivanje razsutega tovara z vodo je označeno z rdečo. Žal ob močnem vetru tudi to ne koristi, da premoga ne bi odnašalo.



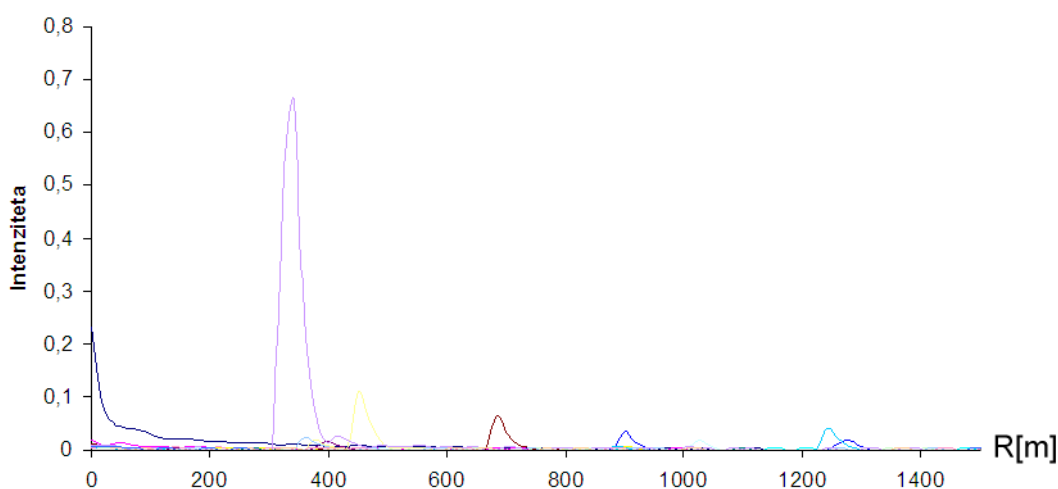
Slika 4.22: Meritev prašenja v Luki Koper d.d. na terminalu za razsuti tovor. Nad kupi premoga je veter nosil prašne delce na daleč vidne s prostim očesom. Krivulje prikazujejo signal zaradi premogovega prahu na različnih višinah.

Iz slike 4.22 je razvidno, da bližje ko smo tlom in s tem viru onesnaženja, večja je gostota delcev, ki so koncentrirani okrog vira (močnejši in ožji signal s širino na polovični višini ~ 30 m), višje ko merimo, manjše so že koncentracije, prav tako pa se delci prostorsko že bolj razširijo zato dobimo signal tudi iz bližjih oziroma bolj oddaljenih razdalj (širino na polovični višini ~ 50 m) in ne le samo iz neposredne bližine kupa premoga.

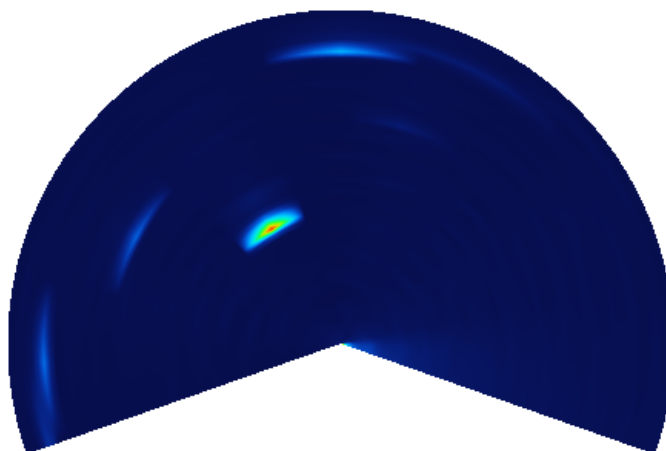
S to meritvijo smo pokazali, da lahko dokaj natančno lociramo aerosole. Vendar zaenkrat lahko določamo le njihovo oddaljenost in izvor.

4.11 Skenirano območje

Projekt očem varen lidar je bil zasnovan iz želje kontroliranja nedovoljenih nočnih izpustov dima iz ladij, kar pomeni, da bi naj lidar sam od sebe po predhodno vnesenih podatkih skeniral celotno območje. Za sam preizkus delovanja skeniranja jsmo pomerili eno rezino po prostoru širine 15° v 20 različnih smereh.



Slika 4.23: V Luki Koper smo z lidarjem poskenirali 15° veliko območje v 20 različnih smereh. Čisto na začetku smo naleteli še na rob avtomobila (modra krivulja) in kasneje na nekaj stavb. Krivulje, kjer nismo detektirali ničesar, zaradi preglednosti niso predstavljene.



Slika 4.24: Skenirano 15° (na sliki je območje raztegnjeno) veliko območje v Luki Koper. Najvišji vrh na sliki 4.23 je tukaj najmočneje obarvana pika.

Na slikah 4.23 in 4.24 so detektirane stavbe v koperskem pristanišču okrog silosov, ki so dali največji odziv, saj so bili najbližji velik sipalec. Za boljšo predstavbo je na sliki 4.4 označena z vijoličnim “žebličkom” pozicija silosa, pozicija lidarja pa z modro zastavico. Za vse ostale sipalce nismo mogli ugotoviti kaj so, saj si s kamero nismo mogli pomagati, v luki pa se je venomer nekaj premikalo. Tako smo lahko detektirali tudi kakšno dvigalo ali kaj podobnega, pa žal tega ne moremo vedeti, saj smo imeli le lidarsko sliko in nobene druge reference. Potrebno bi bilo večkrat pomeriti iste smeri ob različnih časih, saj bi tako lahko določili, kateri detektirani vrhovi predstavljajo stacionarne objekte, saj kot smo ugotovili, je potrebno dobro poznati lokacije fiksnih objektov (stavb, dvigal, itd.), da se bo lahko razločil signal od signala, ki ga povzročajo izpusti iz ladij.

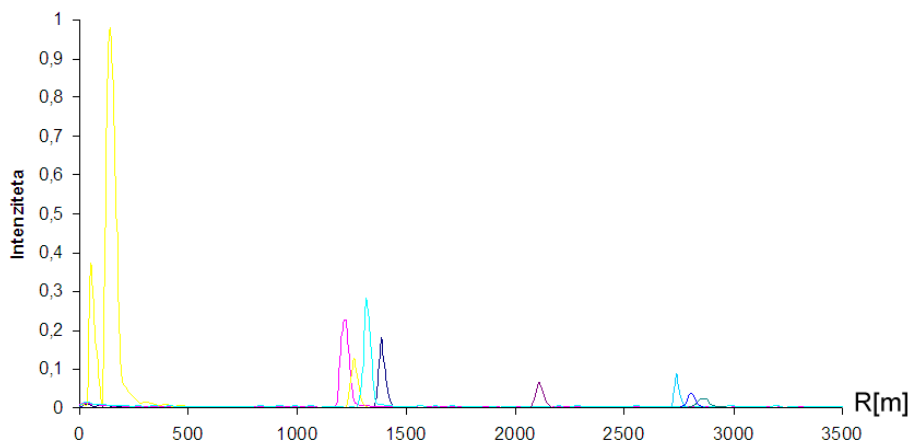
Ko bo dodana lidarju še dobra kamera (ki bi videla po dnevi in po noči), ki bo shranjevala ustrezno sliko meritvam v bazo podatkov, bo lidar postal samostojna naprava, ki se ji bo na začetku le “povedalo” kaj in kako naj meri, nato pa vsaj nekaj časa ne bomo več potrebni, saj bo lidar vse pomeril sam.

4.12 Domet

Dejanski domet glede na ozadje in optično učinkovitost sistema smo poskušali testirati z oddaljevanjem tarče. Zanimalo nas je namreč, ali lahko merimo do razdalje omejene z elektroniko lidarja, ki omogoča merjenje do 3.8 km. Ker pa je bila tarča kljub več kot 2 m² veliki površini premajhna, da bi jo na večji oddaljenosti lahko z laserjem zadeli brez pomoči kamere, ki nam zaradi močne sončne svetlobe ni delovala, načrtovanega preizkusa dometa ter vpliva oddaljenosti na intenziteto signala z oddaljevanjem enotne tarče nismo mogli izvesti. Zato smo domet preizkusili preko bližnjih gričev v okolici letališča Portorož, ki so bili oddaljeni tudi do 3 km.



Slika 4.25: Za premično tarčo smo nameravali uporabiti kar dve večji plošči postavljeni skupaj prislonjeni na avto, ki bi ga oddaljevali od lidarja. Foto: Nataša Grlj.



Slika 4.26: Merjenje dejanskega maksimalnega dometa.

Razdalje na sliki 4.26, na katerih smo detektirali okoliške griče letališča Sečovlje, bližnje stavbe na solinah ter avto s ploščama (rumena krivulja: prvi vrh predstavlja deloma oplazeno premično tarčo¹ (slika 4.25), drugi visoko skoraj nepropustno rastje v ozadju, tretji pa predvidevamo da kamnite stavbe na področju solin), so žal vedno od drugega sipalca, tako da na podlagi tega nismo mogli preveriti teoretične odvisnosti signala od kvadrata razdalje (R^2), ki izhaja iz enačbe 3.4, kot je bilo prvotno mišljeno s premično tarčo. Na podlagi izvedenih meritev lahko zaključimo, da je dejanski doseg uporabljenega očem varnega lidarja vsaj okrog $\sim 3 \text{ km}$, kar za potrebe detekcije in lociranja onesnaževalcev v Luki Koper popolnoma zadostuje.

¹Če bi z lidarjem na sliki 4.26 na rumeni krivulji popolnoma zadeli premično tarčo (avto s ploščama), ne bi dobili nobenega drugega vrha. Mi pa smo dobili še dva.

Poglavje 5

Zaključek

Pri rokovanju z očem varnim lidarjem, smo naleteli na kar nekaj rešljivih tehničnih težav, ki so nam vzele dobršen del časa, preden smo sploh lahko začeli meriti.

Problem predstavlja sam krmilni mehanizem, saj ne deluje premikanje motorčkov krmilnega mehanizma, ki sta povezana preko doma izdelanega vezja [17] z osebnim računalnikom. Zato smo morali namesto z natančnima koračnima motorčkoma premikati lidar kar sami. Tako smo izgubili na natančnosti meritve in na času, saj bi lahko preko programa le dali ukaz za merjenje v izbranih točkah in ko bi lidar meril, bi mi že analizirali pred tem pomerjene rezultate.

Drugi problem je povezan z mobilnostjo lidarja. Lidar je sicer mobilan, vendar so težave zaradi dostopa do električne energije, saj lidar zaenkrat še nima lastnega napajanja, ter potrebe po ponovnih nastavitvah po transportu, saj se kamera izmakne iz smeri merjenja lidarja. Vrnitev kamere v “pravo” smer pa zahteva več testnih meritev na fiksnem sipalcu in torej več časa.

Tretji večji problem pa je kamera, ki žal izven notranjih prostorov ne kaže slike, kar predstavlja veliko oviro pri merjenju.

Kljub prej navedenim pomanjkljivostim, ki jih bo potrebno za operativno rabo lidarja v prihodnje odpraviti, pa izvedene meritve kažejo na veliko uporabnost lidarja pri zaznavanju onesnaženosti ozračja za potrebe Luke Koper d.d. Z opravljenimi meritvami smo namreč pokazali, da z lidarjem lahko zaznamo različne vire onesnaženja v Luki Koper d.d. – npr. izpuste iz dimnikov na ladjah ter prašenje premoga.

Seveda pa je uporaba lidarja lahko bistveno širša kot le detekcija onesnaženja v ozračju. Že z našimi tesnimi meritvami smo nakazali, da se lidar lahko uporabi tudi za meritve višine baze oblakov, za določanje naklona hribov oziroma skeniranje reliefa, . . . V takšne namene se dejansko različni lidarji tudi uporabljajo. Hkrati smo z meritvami tudi pokazali, da zaradi majhne energije izhodnega žarka, ne moremo meriti notranjosti megle ali oblakov, za kar pa konkretno uporabljeni lidar tudi ni bil razvit. V ta namen bi potrebovali močnejšo izhodno energijo in verjetno tudi večji sprejemnik.

Zaradi tehničnih težav nismo uspeli testirati dometa in odvisnosti jakosti signala od razdalje do tarče, kar je bilo prvotno načrtovano s poskusom na letališču Portorož. Smo pa s tamkajšnjimi meritvami pokazali, da je dejanski domet lidarja dovolj velik, da več kot zadosti potrebam zaznavanja aerosolov v Luki Koper.

Prav tako je začetna želja, da bi ugotovili minimalne velikosti aerosolnih delcev in njihovih koncentracij na nekem področju, ki sta potrebni za zaznavanje le-teh z lidarjem, zaenkrat premaknjena v prihodnost, bodo odpravljene navedene težave in bo mogoče pogosteje in ob različnih razmerah izvajati lidarske meritve, ter se posvetiti predvsem njihovi analizi in ne toliko reševanju sprotnih težav, ki se sedaj pojavljajo ob vsakršni meritvi.

V želji, da bi uporabljeni lidarski sistem prišel do točke, ko se bo mogoče posvetiti predvsem analizi meritev, in ne toliko reševanju tehničnih težav, predlagam sledeče izboljšave:

Izboljšave lidarja glede kamere in daljnogleda:

- pri kameri bi morali zamenjati čip s CCD čipom, ki sicer deluje tudi ob šibkejši svetlobi, kar pa je najbolj pomembno pa je, da deluje tudi po dnevi. Dobro bi bilo, da bi bil čip Super CCD, saj bi bila tako slika dobljena iz iste površine čipa, bolj kakovostna.
- zavarovati bi bilo potrebno vezje na koncu kamere z ohišjem (trenutno je okrog vezja le črna folija).
- montiranti bi bilo dobro daljnogled (finderscope) nazaj na lidar, saj bi v primeru nedelovanja kamere prišel zelo prav.
- na teleskop lidarja bi bilo priporočljivo dodati libelo, ki bi nam povedala, ali je naš lidar poravnan z zemljo.

Izboljšave krmilnega sistema in mobilnosti:

- potrebno bi bilo pregledati vezje, preko katerega s programom, ki upravlja lidar, sporočamo premike lidarja. Po zamenjavi okvarjenih delov bi bilo potrebno zavarovati vezje tako, da se ne bi več iskrilo in da se na ohišju lidarja ne bi več nabiral statični naboj.
- razmišljati bi bilo potrebno v smer nakupa generatorja za delovanje lidarja, saj bi lidar šele takrat postal mobilan.

Izboljšave programa:

- v programu bi bilo potrebno dodati možnost, da se za vsako meritev shrani slika s kamere, da bi bila kasneje obdelava podatkov lažja. Tukaj bi se Super CCD čip izkazal, saj bi na bolj kakovostni sliki videli tudi detajle in bi tako lažje izbrali pravi sipalec.
- dodati bi morali GPS napravo, katere podatki o lokaciji bi se morali shraniti k meritvam. Če bi dodali dva GPS-a, potem libele ne bi potrebovali.

- v program bi bilo potrebno dodati, da se slike s kamere in graf meritve prenašata v tekočem času “varnostnikom”, ki bodo nadzorovali onesnaževalce v Luki Koper d.d. in tako lahko pravočasno odreagirali.

Skratka, do operativnosti lidarja bo potrebno vložiti še nekaj dela. Odpraviti bo potrebno težave z iskrečim se vezjem, statičnim nabojem, ki se nabira na ohišju, ter posodobiti programsko opremo. Nato bo šele možna rutinska uporaba lidarja za detekcijo onesnaževanja in se bo pripomoglo k ohranjanju čiste narave in okolja.

Literatura

- [1] S. M. Spuler, S. D. Mayor. *Scanning Eye-safe Elastic Backscatter Lidar at 1.54 μm* . Journal of atmospheric and oceanic technology, Volume 22, 2004.
- [2] Y. Saito, H. Kurata, F. Kobayashi, T. D. Kawahara, A. Nomura, T. Maruyama, M. Tanaka. *Experimental Discussion on Eye-Safe 1.54 μm Photon Counting Lidar Using Avalanche Photodiode*. Optical review, Volume 11, 2004.
- [3] S. Veerabuthrian. *Exploring the Atmosphere with Lidars - Basics and Applications*. Resonance, Volume 8, 2003.
- [4] S. Veerabuthrian. *Exploring the Atmosphere with Lidars - Types of Lidars*. Resonance, May 2003.
- [5] S. D. Mayor, S. M. Spuler. *Raman-shifted eye-safe aerosol lidar*. Applied optics, Volume 19, 2004.
- [6] K. Bergant. *Daljinsko zaznavanje lastnosti ozračja z lidarjem*. Življenje in tehnika, letn. 56, 2005.
- [7] T. Pisanski. *A simple algorithm for signal detection*. Članek v pripravi. 2008.
- [8] C. Weitkamp. *Lidar - Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*. Springer, Singapore, 2005.
- [9] V. A. Kovalev, W. E. Eichinger. *Elastic Lidar - Theory, Practice, and Analysis Methods*, John Wiley & Sons, ZDA, 2004.
- [10] Th. G. Brown, K. Creath, H. Kogelnik, M. A. Kriss, J. Schmit, M. J. Weber. *The Optics Encyclopedia - Basic Foundations and Practical Applications. Volume 2*. Wiley-VCH, Weinheim, 2004.
- [11] P. S. Argall, R. J. Sica. *LIDAR in the Encyclopedia of Imaging Science and Technology*. John Wiley & Sons Inc., New York, 2002.
- [12] E. Hecht. *Optics*. Addison-Wesley, ZDA, 1998.
- [13] M. Čopič. *Elektrooptika. Skripta*. Ljubljana, 2003.
- [14] G. Poberaj, I. Poberaj, M. Zgonik. *Razvoj očem varnega LIDARja za nadzor onesnaženja ozračja. Tehnično poročilo*. Ljubljana, 2003.
- [15] K. Bergant, B. Cenčič, A. Dolžan, G. Močnik, S. Stanič, X. Song. *Razvoj lidarja za daljinsko detekcijo kemičnih in bioloških agensov. Poročila za TIA projekt DALJDET*. Ljubljana, 2008.

- [16] M. Horvat. *Merjenje optične prepustnosti atmosfere s sistemom LIDAR. Diplomsko delo.* Ljubljana, 2001.
- [17] J. Bodlaj. *Prenosni, očem varni lidar z računalniškim krmiljenjem in podporo. Diplomsko delo.* Ljubljana, 2007.
- [18] M. Čolović-Daul. *LIDAR Sensing of Aerosols and Determination of their Trajectories. Master thesis.* Nova Gorica, 2007.
- [19] BC-CARMS. *LIDAR - Overview of Technology, Applications, Market Features and Industry.* Victoria, BC, 2006.
- [20] Wikipedia, The Free Enciklopedia. <http://en.wikipedia.org/wiki/LIDAR>. Zadnjič dostopano 16.06.2008.
- [21] About LIDAR data. <http://www.csc.noaa.gov/products/sccoasts/html/tutlid.htm>. Zadnjič dostopano 16.06.2008.
- [22] B. Lohani. *Airborne Altimetric LIDAR: Principle, Data Collection, Processing and Applications.* http://home.iitk.ac.in/~blohani/LiDAR_Tutorial/Airborne_Altimetric_Lidar_Tutorial.htm. Zadnjič dostopano 16.06.2008.
- [23] D. Veneziano. *Accuracy Evaluation of LIDAR-Derived Terrain Data for Highway Location* <http://www.ctre.iastate.edu/mtc/papers/2002/Veneziano.pdf>. Zadnjič dostopano 16.06.2008.
- [24] BBC-Science and Nature. D. Signton. *Global Dimming* http://www.bbc.co.uk/sn/tvradio/programmes/horizon/dimming_prog_summary.shtml. Zadnjič dostopano 16.06.2008.
- [25] K. Bergant, D. Veberič. *Lidar daljinsko "tipa" lastnosti ozračja - nove tehnologije v meteorologiji.* Delo, Ljubljana, 27. maj 2004.

Spodaj podpisana Barbara Horvat, rojena 30.04.1981 v Mariboru, potrjujem, da sem avtorica pričujočega diplomskega dela.

V Ljubljani, 14. junij 2008

Barbara Horvat