

# Mjerenje laserskim daljinomjerom

---

Egredžija, Lovro

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:015172>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-15**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni studij**

**MJERENJE LASERSKIM DALJINOMJEROM**

**Završni rad**

**Lovro Egredžija**

**Osijek, 2022.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Osijek, 16.09.2022.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Lovro Egredžija
<b>Studij, smjer:</b>	Preddiplomski sveučilišni studij Računarstvo
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	R4196, 24.07.2018.
<b>OIB Pristupnika:</b>	38506390933
<b>Mentor:</b>	Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Glavaš
<b>Sumentor:</b>	Ružica Kljajić, mag. ing. el.
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Mjerenje laserskim daljinomjerom
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rad:</b>	Zadatak rada je analizirati mogućnosti praktične primjene laserskog daljinomjera. Rad treba prikazati teorijsku osnovu rada laserskog daljinomjera i parametre koji utječu na točnost mjernog rezultata. Na praktičnom primjeru velike udaljenosti usporediti odstupanje mjernog rezultata prilikom upotrebe laserskog daljinomjera i mjerne trake. Osim navedenog potrebno je provesti analizu primjene u postupku mjerenja promjenive veličine s osvrtom na pivsku pjenu. Mjereći opadanje pивske pjene sukladno normama propagaciju je potrebno matematički modelirati. Prijelazu pojavu nestaka pjene u čaši za različite vrste piva treba usporediti kroz matematički model i statističku analizu.
<b>Prijedlog ocjene završnog rada:</b>	Izvrstan (5)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
<b>Datum prijedloga ocjene od strane mentora:</b>	16.09.2022.
<b>Datum potvrde ocjene od strane Odbora:</b>	21.09.2022.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 27.09.2022.

**Ime i prezime studenta:**

Lovro Egredžija

**Studij:**

Preddiplomski sveučilišni studij Računarstvo

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

R4196, 24.07.2018.

**Turnitin podudaranje [%]:**

7

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Mjerenje laserskim daljinomjerom**

izrađen pod vodstvom mentora Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Glavaš

i sumentora Ružica Kljajić, mag. ing. el.

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
1.1. Zadatak završnog rada .....	1
2. POVIJESNI PRIKAZ RAZVOJA LASERSKIH DALJINOMJERA .....	2
3. PRINCIPI FUNKCIONIRANJA LASERSKIH DALJINOMJERA .....	3
3.1. Dijelovi i izvedbe lasera .....	4
3.2. Princip rada laserskog daljinomjera .....	5
3.2.1. Princip pulsne telemetrije .....	5
3.2.2. Princip faznog pomaka .....	9
3.3. Problemi prilikom rada sa laserskim daljinomjerima .....	13
3.4. Analiza primjene u postupku mjerenja propagacije pive pjene .....	13
4. MJERENJE LASERSKIM DALJINOMJEROM .....	16
4.1. Uređaji korišteni prilikom mjerenja .....	16
4.1.1. Bosch GLM 80 Professional .....	16
4.1.2. Gossen Mavolux 5032C USB .....	17
4.2. Analiza izmjerene udaljenosti s obzirom na kut mjerenja .....	19
4.3. Analiza izmjerene udaljenosti s obzirom na kut mjerenja kada se mjerna točka nalazi iza vizualno prozirne površine – stakla .....	25
4.4. Analiza intenziteta utjecaja sunčeve svjetlosti na mjerenje laserskim daljinomjerom .....	29
4.5. Promjena veličine osvijetljene točke u odnosu na udaljenost .....	32
5. ZAKLJUČAK .....	35
LITERATURA .....	36

# 1. UVOD

Duljina je osnovna fizikalna veličina kojom se opisuje udaljenost između dvije točke u prostoru. Prema SI sustavu osnovna mjerna jedinica duljine je metar, a slovna oznaka je m. Udaljenost se može mjeriti mjernom vrpcom ili uređajima za mjerenje udaljenosti koji se zovu daljinomjeri. U ovom radu opisana je građa, način rada i mogućnost industrijske primjene daljinomjera kroz mjerenje propagacije pivske pjene koja je poluprozirni materijal. Obradeni su i određeni problemi kao što je postojanje mjerne nesigurnosti koji se javljaju prilikom mjerenja. Kroz nekoliko jednostavnih mjernih pokusa su isti problemi i dokazani korištenjem daljinomjera, kartonske ploče, komada papira i mjerne vrpce. Na mjernu nesigurnost utječu količina svjetlosti, lokacija mjernog objekta, struktura objekta do kojeg mjeri te preciznost mjeritelja. Prema predloženoj metodi zaključuje se da je mjerna nesigurnost najmanja kada je upadni kut laserske zrake na površinu objekta do kojeg se mjeri najmanje  $40^\circ$ .

Rad je podijeljen u pet poglavlja sa uvodom kao prvim poglavljem. U drugom poglavljju opisan je povijesni prikaz laserskih daljinomjera. U trećem poglavljju opisana je građa, vrste, način rada i primjena lasera koji je temeljni dio svakog laserskog daljinomjera te su opisana su i dva najvažnija principa rada laserskih daljinomjera a to su pulsna telemetrija te detekcija faznog pomaka. U ovom poglavljju ukratko se i navode problemi koji se mogu pojaviti pri upotrebi gotovo svih laserskih daljinomjera. U četvrtom poglavljju opisat će se ciljano osmišljeni mjerni pokusi kojima je cilj mjerenjem udaljenosti u različitim uvjetima ukazati na mjerne nesigurnosti prilikom mjerenja pod kutom u odnosu na površinu mjerenja, utjecaj intenziteta sunčeve svjetlosti na maksimalnu udaljenost mjerenja, te promjenu veličine osvijetljene točke u odnosu na povećanje udaljenosti. U ovom poglavljju analizirat će se izmjerene udaljenosti i dimenzije osvijetljene točke dobivene provedbom mjernih pokusa i na temelju rezultata donijeti zaključci. U petom poglavljju rada nalazi se zaključak kojim će se ukratko rezimirati sve o laserskom daljinomjeru te ciljevima i postignutim rezultatima mjerenja.

## 1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak ovog završnog rada jest prikazati građu i način rada laserskih daljinomjera te probleme koji se javljaju prilikom mjerenja. Analizirati mogućnosti praktične primjene laserskog daljinomjera. Na praktičnom primjeru prikazati rad sa laserskim daljinomjerom, analizirati njegovu preciznost mjerenja na nekoliko eksperimentalnih mjerenja te objasniti ranije navedene probleme s kojima se susrećemo prilikom rada sa laserskih daljinomjerom.

## **2. POVIJESNI PRIKAZ RAZVOJA LASERSKIH DALJINOMJERA**

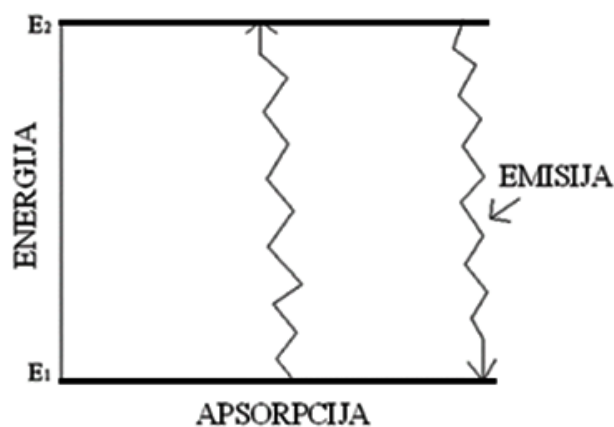
Prije gotovo trideset godina prvi je put javnosti predstavljen ručni laserski daljinomjer. Godine 1993. švicarska tvrtka Leica Geosystems je na sajmu graditeljstva u Parizu predstavila svoj daljinomjer Leica Disto koji je imao mogućnost mjerenja udaljenosti do 30 metara sa preciznošću od 3,175 mm [1] dok je istovremeno bio velik i težak kao cigla. Kroz godine laserskim daljinomjerima su se maksimalna udaljenost i preciznost povećavale dok se veličina samog uređaja smanjivala, a osim mjerenja udaljenosti dobili su i brojne mogućnosti kao što su računanje površine, računanje zapremine, zbrajanje i oduzimanje, mjerenje kuta te funkcija libele [2]. Najnoviji laserski daljinomjeri veličine su kao manji mobilni telefoni a težine do 200 g i to sve sa mogućnošću mjerenja na udaljenostima i preko 150 metara uz preciznost  $\pm 1,5$  mm sa funkcijom digitalnog tražila za lakši pronalazak točke. Spajanje i prijenos podataka na računalo omogućeno je s pomoću USB kabela ili putem Bluetootha [3]. Većina današnjih daljinomjera posjeduje IP certifikat otpornosti na vodu i prašinu te su otporni na udarce i ogrebotine. Laserski daljinomjeri se svakodnevno usavršavaju kako bi se popravili nedostaci koje primjena laserske tehnologije u mjeriteljstvu nosi sa sobom te kako bi se krajnjem korisniku olakšao rad s takvim uređajima i daljnja analiza izmjerenih vrijednosti.

### 3. PRINCIPI FUNKCIONIRANJA LASERSKIH DALJINOMJERA

Laser (eng. *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) ili prevedeno na hrvatski, pojačanje svjetlosti pomoću stimulirane emisije zračenja, je uređaj za stvaranje i pojačavanje vrlo usmjerenog snopa koherentnog svjetla [4], a u širem smislu i koherentnog elektromagnetnog zračenja. Zasniva se na kvantnim pojavama prilikom prijenosa energije zračenjem i na međudjelovanju atoma ili molekula sa vlastitim zračenjem. Laserska svjetlost se kao i svjetlost emitirana iz žarulje emitira prilikom prijelaza atoma iz višeg u niže energetske stanje, ali za razliku od običnih žarulja kod lasera atomi djeluju zajedno i stvaraju svjetlost koja ima sljedeće karakteristike:

1. Svjetlost je ima samo jednu frekvenciju stoga je ona visoko monokromatska.
2. Svjetlost je koherentna.
3. Svjetlost je usmjerena.
4. Svjetlost se može oštro fokusirati.

Emisija svjetla nastaje kao posljedica promjene energije skupa atoma ili molekula i može se shvatiti kao zatvoreni sustav ukoliko se promatra nastala svjetlost i skup atoma ili molekula koji ju je stvorio. Tada se dolazi do zakonitosti koje tumače pojačavanja svjetlosti u atomskoj sredini. Tako definirana atomska sredina s vlastitim poljem zračenja, zatvorena unutar optičkog rezonatora, daje laserske oscilacije uz određene uvjete. Izmjena energije zračenja s atomima ili molekulama odvija se upijanjem (apsorpcijom) te spontanom i stimuliranom emisijom zračenja. i može se objasniti na jednostavnom modelu atoma s dvije energetske razine prikazanom na slici 3.1. [5].



Sl. 3.1. Izmjena energije zračenja u pojednostavljenom modelu atoma [5]



Izmjena energije jednaka je razlici energija  $E_2$  i  $E_1$  i prikazana je niže navedenom formulom 3-1:

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (3-1)$$

Kada na atom u pobuđenom stanju djeluje zračenje energije događa se stimulirana emisija. Zračenje koje je nastalo tom stimuliranom emisijom širi se u istom smjeru kao i zračenje koje je stimuliralo atome na emisiju.

### 3.1. Dijelovi i izvedbe lasera

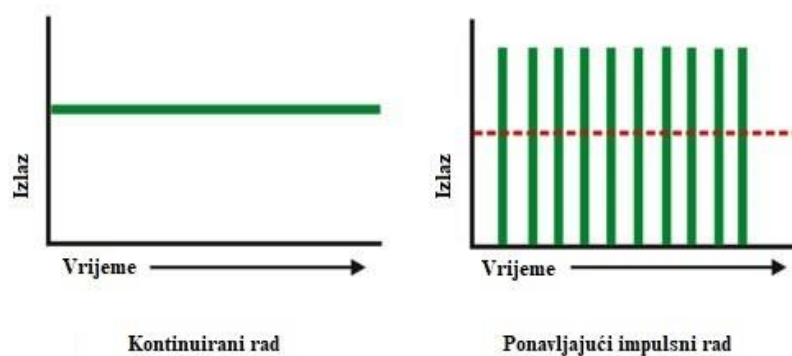
Laserski uređaji sastoje se od više dijelova od kojih su najvažniji:

- aktivna tvar
- rezonator
- izvor napajanja
- upravljačka elektronika
- izlazna optika – nije uvijek obavezan dio

Prema vrsti aktivne stvari laseri mogu biti plinski, čvrsti, tekući i poluvodički. Kod plinskog lasera se obično koriste plemeniti plinovi kao što su ugljikov dioksid, argon, neon, helij i drugi. U čvrstim laserima koriste se kristali ili amorfna tijela. Prvi proizvedeni laser koristio je rubin. Tekući laseri koriste organske i anorganske tekućine. Poluvodički laseri koriste poluvodičke diode, najčešće galij-arsen (GaAs) tipa. Poluvodički laseri imaju najširu primjenu zbog svoje male veličine i dobrih karakteristika.

Prema načinu rada laseri se mogu podijeliti na impulsne lasere i lasere s kontinuiranim radom, grafički prikazano slikom 3.2. na sljedećoj stranici. Impulsni laseri emitiraju svjetlost u vrlo kratim impulsima. Takvi laseri postižu veću snagu pojedinog impulsa zato što se energija koja bi se oslobodila tijekom jedne sekunde oslobađa najčešće u 20 do 50 kraćih impulsa u sekundi. Kontinuirani laseri emitiraju kontinuirani snop svjetlosti koji se ne mijenja u vremenu.

Laserski uređaji imaju širok spektar primjene, a neke od mogućih primjena su lasersko obrađivanje materijala, laserska komunikacija, lasersko navođenje, precizno mjerenje, medicina i biologija te najvažnije za ovaj rad; lasersko mjerenje dužina.



Sl. 3.2. Razlika između impulsnog i kontinuiranog lasera [6]

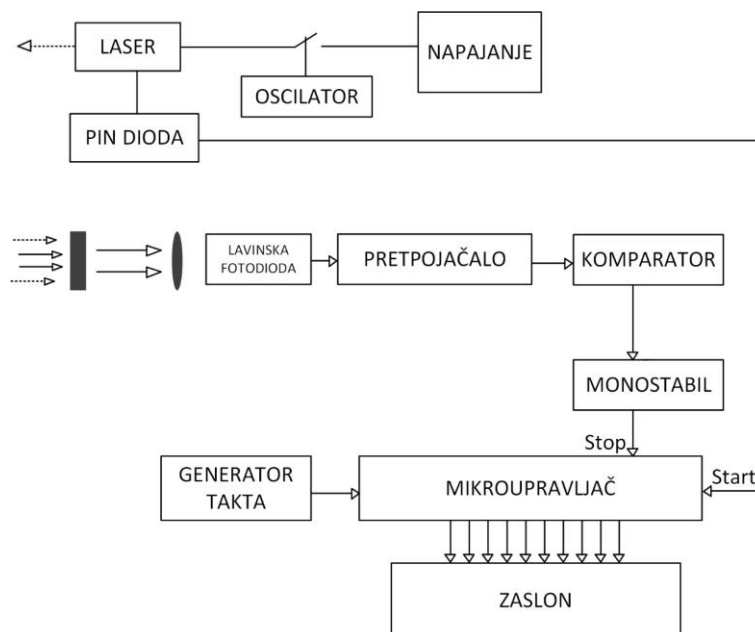
## 3.2. Princip rada laserskog daljinomjera

Razvojem poluvodičkih lasera, mikroprocesora i integriranih sklopova omogućen je razvoj malih laserskih sklopova, a time i razvoj malih laserskih daljinomjera. U većini slučajeva iz laserskog daljinomjera laser emitira uski snop crvene svjetlosti valne duljine  $670\mu\text{m}$  [1] dok ostatak procesa ovisi o principu rada samog uređaja koji može biti princip pulsne telemetrije ili princip faznog pomaka.

### 3.2.1. Princip pulsne telemetrije

Princip pulsne telemetrije temelji se na određivanju vremena potrebnog da svjetlosni impuls dođe od odašiljača, odnosno lasera do odredišta i natrag do fotodetektora na uređaju. Ovaj princip se još naziva i *Time-of-flight* (TOF) [7]. Prema slici 3.3. laserski daljinomjer koji radi na ovom principu sastoji se od više osnovnih cjelina [8]:

1. Odašiljačka cjelina koja sadrži laserski uređaj, izvor napajanja i oscilator koji služi za određivanje broja impulsa odaslanih u vremenu.
2. Analogna cjelina za prijem povratnog impulsa sadrži prijemnu leću, optički filter, lavinsku fotodiodu koja služi za detekciju svjetlosnog impulsa, a nakon fotodiode nalazi se pretpojačalo niskog šuma koje služi za pojačavanje primljenog signala.
3. Digitalna cjelina za prijem uključuje izolacijski krug, mikroupravljački krug za procesiranje signala i krug za sučelje prema korisniku odnosno zaslon.



Sl. 3.3. Shematski prikaz TOF daljinomjera[8]

Kao što je vidljivo na slici 3.3., zraka svjetlosti emitirana iz lasera prelazi put duljine  $2l$  i pritom gubi snagu pa je obično snaga povratne zrake svjetlosti vrlo mala. Odnos između snage povratne zrake svjetlosti  $P_{ul}$  i udaljenosti  $l$  dan je sljedećim izrazom 3-2:

$$P_{ul} = \frac{\rho \cdot \tau \cdot S}{\pi \cdot l^2} \cdot P_{izl} \quad (3-2)$$

gdje je  $\tau$  prijenosni koeficijent dan izrazom  $\tau = \tau_{opt} \cdot \tau_c$  pri čemu je  $\tau_{opt}$  prijenosni koeficijent leća dok je  $\tau_c$  prijenosni koeficijent odredišta. Koeficijent  $\rho$  jest koeficijent raspršivanja svjetlosti od odredište (metu) sa vrijednošću  $\rho = 1$  za potpuno zrcalo dok  $\rho = 0$  za crno tijelo.  $P_{izl}$  je izlazna snaga lasera dok je  $S$  površina leće na prijemu. Na primjer, meta do koje se mjeri reflektira samo 1% svjetlosti i uz gubitke prijenosa od 75% te pretpostavku da je leća na prijemu savršeno okrugla promjera 1 cm, udaljenost do mete jest 100 metara i za izlaznu snagu lasera 10 W ulazna snaga će biti samo 7.5  $\mu$ W, što se može vidjeti i iz izraza 3-3:

$$P_{ul} = \frac{0.01 \cdot 0.75 \cdot \pi}{\pi \cdot 100^2} \cdot 10 = 7.5 \cdot 10^{-6} W \quad (3-3)$$

Također, iz slike 3.3. može se vidjeti da mjerenje započinje sa početkom emitiranja zrake svjetlosti tako što se START signal preko PiN diode dovodi u mikroupravljački krug za procesiranje. Nakon što je START signal stigao do odredišta, pokreće se brojač koji broji impulse sve dok STOP signal ne pristigne u krug za procesiranje signala. Kao što je prethodno napisano, zraka svjetlosti prelazi put duljine  $2l$ , od daljinomjera do odredišta i natrag. Po povratku u daljinomjer zraka svjetlosti

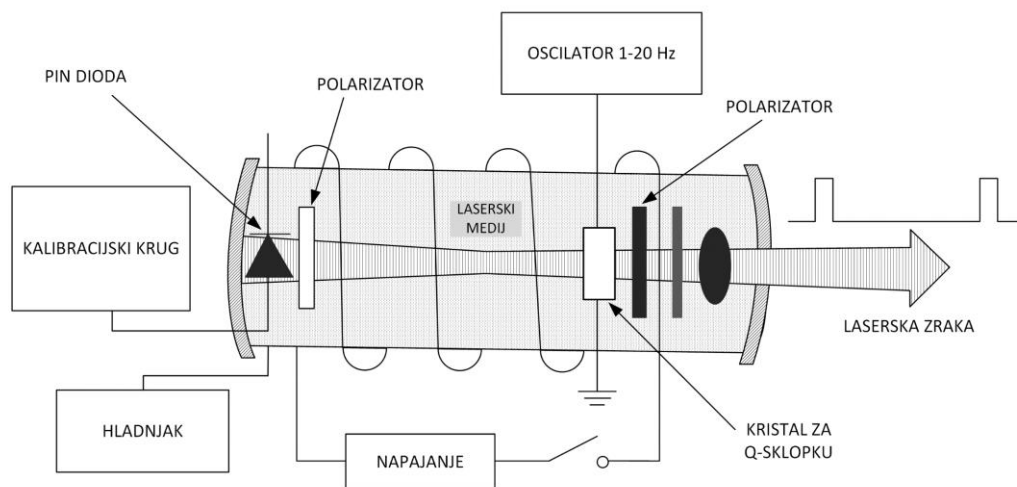
prolazi kroz prijemnu leću i optički filter te ulazi u lavinsku fotodiodu visoke osjetljivosti i malog vremena porasta. Lavinska fotodioda svjetlosne impulse pretvara u električne signale kojima se zatim pojačava napon u pretpojačalu.

Ako se uzme frekvencija takta  $f_{clk}$  tada je udaljenost  $l$  između odredišta i prijemnika dana izrazom:

$$l = \frac{C \cdot N}{2 \cdot f_{clk}} \quad (3-4)$$

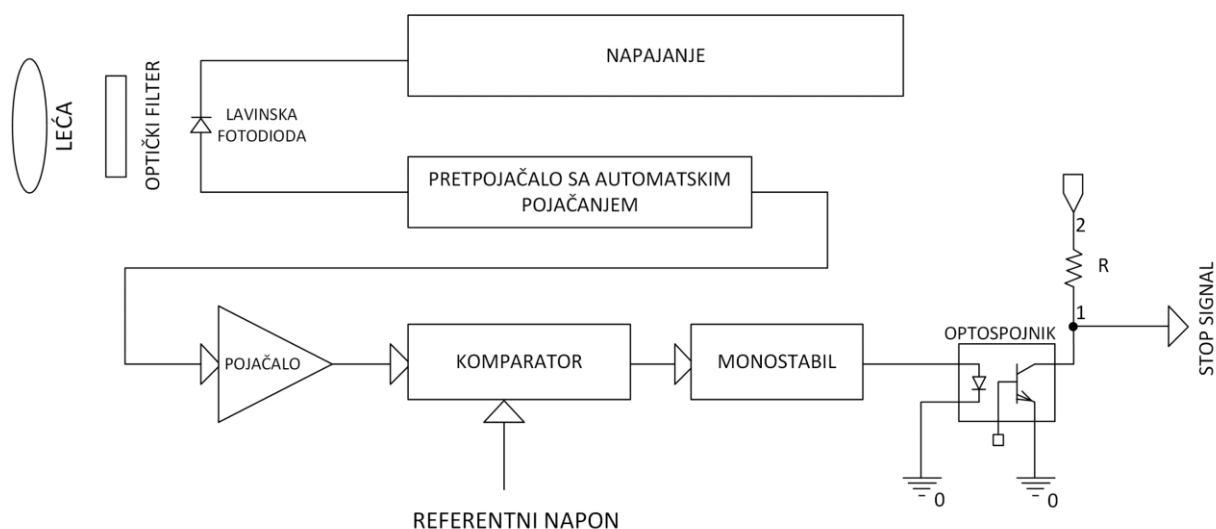
gdje  $N$  označava broj impulsa koje je brojač izbrojao između START i STOP signala, dok  $C$  označava brzinu svjetlosti.

Glavna zadaća odašiljačke cjeline jest proizvesti snažan kratki impuls svjetlosti te prilagođavati njegovu frekvenciju odašiljanja. Također zadaća ove cjeline je kreiranje START signala. Prema slici 3.4. glavni dijelovi odašiljačke cjeline su laser, napajanje, upravljački i oscilatorski krug lasera te sustav za hlađenje. Ukoliko se ne koristi laser vrlo velike izlazne snage sustav za hlađenje nije neophodan.



Sl. 3.4. Odašiljačka cjelina TOF laserskog daljinomjera[8]

Vidljivo je da se korištenjem Q-sklopke i odgovarajućih upravljačkih i oscilatorskih sklopova može odrediti frekvencija impulsa u rasponu od 1 do 20 Hz a trajanje jednog impulsa u rasponu od 10 do 15 nanosekundi. Kada se okida Q-sklopka, PiN dioda proizvodi impuls struje koji se u procesnoj cjelini prevodi kao START signal da bi brojanje započelo.



Sl. 3.5. Analogna prijemna cjelina TOF laserskog daljinomjera[8]

Prema slici 3.5. laserska zraka koja se odbila od mete prolazi kroz leću i optički filter i dolazi do lavinske fotodiode visokog odziva. Budući da je lavinska fotodiode u strujnom načinu rada, signal koji iz nje izlazi pojačava se u širokopojasnom pretpojačalu koje najčešće ima ulaznu impedanciju oko  $50\Omega$ . Izlazni napon  $U_{izl}$  pojačala dan je izrazom 3-5:

$$U_{izl} = P_{ul} \cdot \mathfrak{R} \cdot Z_t \cdot A_v \quad (3-5)$$

gdje je  $P_{ul}$  ulazna snaga povratne zrake svjetlosti,  $\mathfrak{R}$  je responzivnost lavinske fotodiode,  $Z_t$  je pojačanje transimpedancije pretpojačala dok je  $A_v$  naponsko pojačanje pretpojačala.

Napon signala nakon izlaska iz pojačala se u komparatoru uspoređuje sa referentnim naponom koji može iznositi svega nekoliko milivolta. Po završetku usporedbe signala, signalu se u monostabilu produljuje širina impulsa, takav signal dalji sklopovi prepoznaju kao STOP signal.

Važno je napomenuti da za ispravan rad pojačanje pretpojačala treba biti proporcionalno ulaznoj snazi svjetlosti. To se može postići promjenom osjetljivosti lavinske fotodiode vodeći računa i o prednaponu na pojačalu. Ako je  $\mathfrak{R}$  osjetljivost lavinske fotodiode, a  $Z_t$  je pojačanje transimpedancije tada je ukupno pojačanje pretpojačala dano formulom 3-6:

$$A' = \frac{U_{izl}}{P_{ul}} = \mathfrak{R} \cdot Z_t \quad (3-6)$$

Veliki problem preciznom mjerenju predstavljaju unutarnje smetnje komponenti. Smetnje izazvane pulsnim radom lasera uklanjaju se filterima za elektromagnetske interferencije (EMI filterima) dok se smetnje u digitalnom prijemnom krugu uklanjaju odvajanjem napajanja i

uzemljenja digitalnog kruga od ostalih krugova. Najveće smetnje stoga stvara analogni prijemni krug odnosno, pretpojačalo koje se nalazi u tom krugu. Smetnje prijemnog kanala se izračunavaju izrazom 3-7:

$$i_n^2 = \frac{4 \cdot K \cdot T}{R_{ul}} \cdot \left( \frac{\pi}{2} \cdot \Delta f_i \right) \quad (3-7)$$

gdje je  $K$  Boltzmanova konstanta,  $T$  je apsolutna temperatura,  $R_{ul}$  je ulazna impedancija pretpojačala dok je  $\Delta f_i$  pojasna propusnost cijelog sustava i najčešće iznosi oko 100 MHz.

Konačno, omjer signala i šuma  $S/N$  izračunava se izrazom 3-8:

$$\frac{S}{N} = \frac{i_s}{i_n} = \frac{M \cdot \mathfrak{R} \cdot P_{ul}}{[2q \cdot (k_{TP} \cdot P_{ul} \cdot \mathfrak{R} \cdot M^2 \cdot F(M) + i_{na}^2)]^{\frac{1}{2}}} \quad (3-8)$$

gdje je  $k_{TP}=0,5$ ,  $M$  je unutarnje pojačanje fotodetektora dok je  $F(M)$  faktor viška smetnji.

### 3.2.2. Princip faznog pomaka

Daljinomjeri koji koriste princip faznog pomaka zasnivaju se na brojanju valnih duljina koje se odbijaju od određite i vraćaju u daljinomjer te određivanju razlike faze između odaslane i primljene zrake svjetlosti.

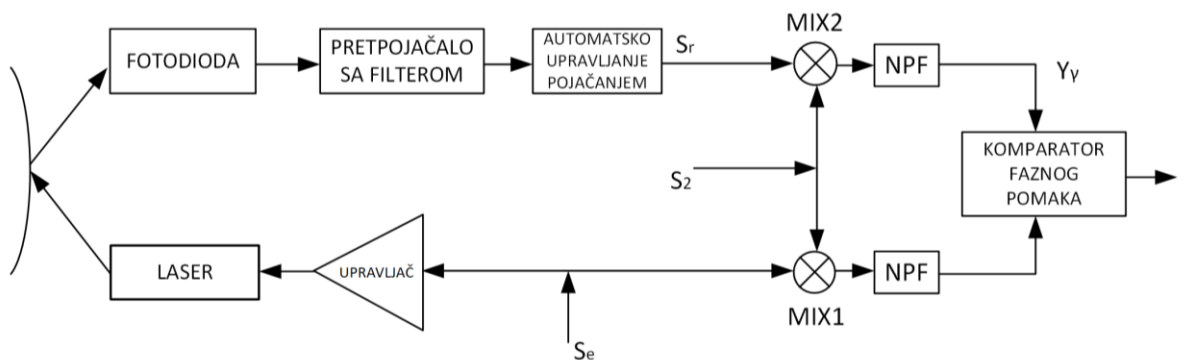
Prema slici 3.6. sustav laserskog daljinomjera koji radi na principu mjerenja faznog pomaka ima nekoliko cjelina:

1. Odašiljačka cjelina; sastoji se od laserskog uređaja, upravljačkog kruga za lasersku diodu te izlazne optike.
2. Prijemna cjelina; sastoji se od lavinske fotodiode koja detektira odbijenu svjetlost, pojačala, mješaća i filtera te analogno-digitalnog pretvornika.
3. Procesna cjelina; sadrži dodatne niskopopusne filtere, komparator za usporedbu faza te mikroprocesor koji nije na shematskom prikazu vidljiv.

Kod ove vrste laserskog daljinomjera svjetlosni signali moduliraju se konstantnom frekvencijom. Upravljački krug laserske diode generira sinusni signal određene frekvencije koji modulira istosmjernu struju laserske diode. Na taj način se emitira svjetlost koja ima sinusni oblik snage i ima neku određenu frekvenciju. Nakon što se svjetlost odbije od predmet do kojeg se mjeri udaljenost vraća se natrag do daljinomjera gdje ju nakon prolaska kroz ulaznu optiku detektira fotodioda i pretvara u električni signal. Svjetlost je pri ulasku u daljinomjer fazno pomaknuta za određeni iznos u odnosu na emitiranu svjetlost i taj pomak  $\Delta\varphi$  se izračunava izrazom 3-9:

$$\Delta\varphi = 4 \cdot \pi \cdot f_{izl} \cdot \frac{D}{c} \quad (3-9)$$

gdje je  $f_{izl}$  frekvencija kojom se modulira emitirana svjetlost,  $D$  je udaljenost od daljinomjera do predmeta mjerenja dok je  $c$  brzina svjetlosti.



1) NPF = Nisko propusni filter

Sl. 3.6. Shematski prikaz laserskog daljinomjera temeljenog na principu faznog pomaka [8]

Izraz za izračunavanje udaljenosti  $D$  od daljinomjera do predmeta mjerenja dobije se izvođenjem iz izraza za izračunavanje faznog pomaka:

$$D = \frac{c(\Delta\varphi + 2 \cdot k \cdot \pi)}{4 \cdot \pi \cdot f_{izl}} \quad (3-10)$$

Postoji nekoliko načina mjerenja dobivenog faznog pomaka, međutim u ovom radu primjenjuje se heterodinski način zato što se upravo ovim načinom dobije uskopojasno pojačanje koje uvelike poboljšava odnos signala i šuma u cijelom sustavu.

Ukoliko je  $s_e$  emitirani signal,  $s_u$  je primljeni, ulazni svjetlosni signal, a  $s_{ref}$  je referentni signal tada vrijede sljedeći izrazi:

$$s_e = \widehat{S}_e \cdot \cos(\omega_1 \cdot t)$$

$$s_u = \widehat{S}_r \cdot \cos(\omega_1 \cdot t + \varphi_d) \quad (3-11)$$

$$s_{ref} = \widehat{S}_2 \cdot \cos(\omega_2 \cdot t + \Psi)$$

iz kojih proizlazi da su frekvencije emitiranog i primljenog signala jednake. Vrijednost faznog pomaka signala označena je sa  $\varphi_d$ , frekvencija referentnog signala označena je sa  $f_2$  dok je fazni pomak između referentnog i emitiranog signala označen sa  $\Psi$ .

Zbog korištenja heterodinske tehnike množenjem referentnog signala  $s_{ref}$  sa signalima  $s_e$  i  $s_u$  dobit će se sljedeći izrazi za emitirani i primljeni, ulazni signal:

$$\begin{aligned} X_e &= s_e \cdot s_{ref} = \frac{\widehat{S}_e \cdot \widehat{S}_e \{ \cos[(\omega_1 - \omega_2) - \Psi] + \cos[(\omega_1 + \omega_2) + \Psi] \}}{2} \\ X_u &= s_u \cdot s_{ref} = \frac{\widehat{S}_u \cdot \widehat{S}_e \{ \cos[(\omega_1 - \omega_2) + (\varphi_d - \Psi)] + \cos[(\omega_1 + \omega_2) + (\varphi_d + \Psi)] \}}{2} \end{aligned} \quad (3-12)$$

Pošto izrazi navedeni pod 3-12 u sebi imaju i oduzimanje i zbrajanje frekvencija mogu se skratiti, odnosno ukloniti dijelove koji sadrže zbrajanje frekvencija. To se ostvaruje uvođenjem niskopropusnih filtera u sustav, a tada izrazi za emitirani i primljeni signal glase:

$$\begin{aligned} y_e &= \widehat{Y}_e \cdot \cos(\omega_m \cdot t - \Psi) \\ y_u &= \widehat{Y}_u \cdot \cos(\omega_m \cdot t + \varphi_d - \Psi) \end{aligned} \quad (3-13)$$

gdje je  $\varphi_d$  fazni pomak između krajnjih signala u komparatoru izražen u radijanima.

Budući da zraka svjetlosti emitirana iz lasera prelazi put duljine  $2l$  i pritom gubi snagu, obično je snaga povratne zrake svjetlosti vrlo mala a odnos između snage povratne zrake svjetlosti  $P_{ul}$  i udaljenosti  $l$  i površine  $A$  dan je sljedećim izrazom 3-14 [9]:

$$P_{ul} = T_t \cdot T_R \cdot \frac{\rho_d}{\pi} \cdot P_{izl} \cdot \cos \theta \frac{A_u}{D^2} \quad (3-14)$$

gdje je  $P_{izl}$  izlazna snaga laserske diode,  $T_t$  je koeficijent učinkovitosti odašiljačke cjeline,  $T_R$  je transmisijski koeficijent prijemne leće, faktor  $\rho$  je koeficijent raspršivanja svjetlosti od određite (metu) gdje  $\rho = 1$  označava potpuno zrcalo dok  $\rho = 0$  označava crno tijelo. Upadni kut zrake svjetlosti označen je slovom  $\theta$  dok je  $A_u$  površina leće prijemnika.

Za prethodno navedene matematičke izraze vrijedi da se prilikom mjerenja udaljenosti koriste samo difuzne komponente za koje vrijedi Lambertov zakon. Tako se dolazi do izračuna intenziteta zračenja svjetlosti koja se odbija okomito na površinu mjerenja:



$$int = \frac{\rho_d \cdot P_{izl}}{\pi} \quad (3-15)$$

Intenzitet se izražava mjernom jedinicom vat po steradianu (W/sr) i uvelike ovisi o vrsti materijala od kojeg je napravljena površina mjerenja. Za primjer čisti bijeli papir, drvo ili čak nepolirani metal imaju vrijednost  $\rho_d$  između 0,6 i 0,7 W/sr za valnu duljinu od 820 nm prema [10], dok sa valnom duljinom svjetlosti od 950 nm vrijednost  $\rho_d$  je u rasponu od 0,4 do 0,8 W/sr, prema [11].

Kod ove vrste daljinomjera javljaju se smetnje zbog nekoliko faktora. To može biti preslušavanje (engl. *crosstalk*, smetnje), previsoke amplitude u radijsko frekvencijskom krugu te drift međufrekvencije. Proračunom snage može se uvidjeti da omjer snaga emitirane zrake  $P_{izl}$  i primljene zrake  $P_{ul}$  može doseći vrijednosti veće od 1000 ukoliko se mjerena udaljenost  $D$  mijenja primjerice od 1 do 10 metara. Dakle, kada amplituda fotoelektričnog signala varira za 1000 greška faznog pomaka  $\delta_\varphi$  koja nastaje ovom varijacijom mora biti manja od  $0,1^\circ$  za pogrešku mjerenja  $\delta_D = 2,5$  mm. Problem koji nastaje sa velikom amplitudom signala jest pojava distorzije i rezanja vrhova signala koji u konačnici uzrokuju greške u faznom pomaku i dovode do pogrešnog izračuna udaljenosti. Prvo rješenje ovog problema jest pomoću leća izmijeniti fokus fotodiode tako da ona primi manje svjetlosti na manjim udaljenostima dok je drugo rješenje pojačati signal povratne veze u mješać kako bi se izbjegle distorzije i rezanje vrhova.

Korištenjem laserske diode niske snage, uskopojasno pojačavanje signala poboljšava omjer signala i šuma (engl. *Signal To Noise Ratio* – SNR). Za bijeli šum koji nastaje na ulazu, izlaz iz pojasio propusnog filtera drugog reda daje širinu pojasa  $B_n$  ekvivalentnu bijelom šumu prema sljedećem izrazu:

$$B_n = \frac{\pi}{2} \cdot \Delta f_{izl} \quad (3-16)$$

Nadalje, efektivna vrijednost šuma korisnog signala proporcionalna je korijenu širine pojasa  $\Delta f_{izl}$ . Zbog simetričnosti može se pretpostaviti da drift frekvencije  $\delta f_{izl}$  ili  $\delta f_{ul}$  jednog od oscilatora uravnotežava drift frekvencije drugog oscilatora. Ukoliko su izlazne vrijednosti iz oba filtera međufrekvencija jednaka na referentnom kanalu te na signalnom kanalu tada neće biti grešaka u mjerenju. Međutim, ako se uzme premala vrijednost širine pojasa u obzir treba uzeti pojavu nepravilnosti u krugovima koji ovise o međufrekvenciji zbog odstupanja vrijednosti  $f_{izl}$  i  $\delta f_{ul}$ . Kako bi se sačuvala dovoljna razlučivost uređaja i time pogreške mjerenja svele na minimum, najbolje je držati međufrekvenciju konstantnom.

Električno preslušavanje između odašiljača i prijemnika je još jedna pojava koja uzrokuje greške prilikom određivanja mjerene vrijednosti. Preslušavanje se događa kada fotoelektrični signal i modulatorska struja laserske diode imaju jednaku frekvenciju  $f_{izl}$ . Tada se javlja sinkrono curenje napona uzrokovano strujom modulacije koje se vektorski zbraja sa fotoelektričnim signalom kojeg uređaj obrađuje. Zato, kako bi preslušavanje smanjilo, pojačalo transimpedancije koje je povezano sa fotodiodom treba biti zaštićeno od neželjenih vanjskih signala. Iako nije moguće u potpunosti ukloniti preslušavanje pomoću zaštite pojačala postoji nekoliko načina kako to svesti na minimum. Jedan od načina je iskoristiti pojačalo laserske diode za generiranje signala oblika češlja i lavinsku fotodiodu postaviti da detektira samo drugi harmonik reflektiranog fotoelektričnog signala. Drugi način, iako teži za implementirati, temelji se na odašiljanju fotoelektričnog signala sa frekvencijom koja je višekratnik modulatorske frekvencije.

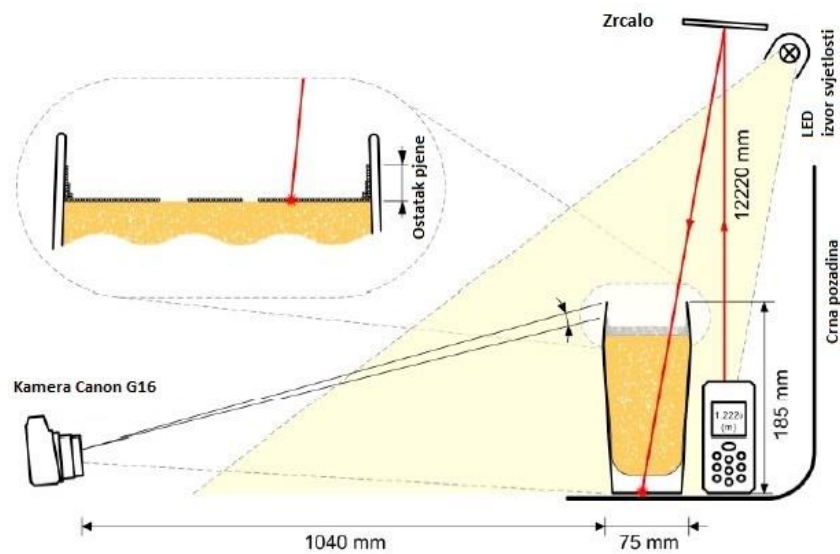
### **3.3. Problemi prilikom rada sa laserskim daljinomjerima**

Laserski daljinomjeri zbog svojeg načina rada imaju u specifičnim situacijama poteškoća sa normalnim mjerenjem ili je mjerenje čak i nemoguće. Primjer takvih situacija može biti mjerenje na izravnom sunčevom svjetlu gdje je pretpostavka da će biti teško ili nemoguće uočiti točku svjetlosti na predmetu mjerenja. Nadalje, problematično može biti i mjerenje pod prevelikim kutom u odnosu na okomicu predmeta mjerenja ili pak mjerenje udaljenosti do predmeta mjerenja koji su građeni od prozirnih ili poluprozirnih materijala. Također, veliku ulogu u preciznosti mjerenja imaju vrsta materijala od kojeg je napravljeno tijelo do kojeg mjerimo udaljenost te koliko je glatka ili hrapava površina tog tijela.

### **3.4. Analiza primjene u postupku mjerenja propagacije pive pjene**

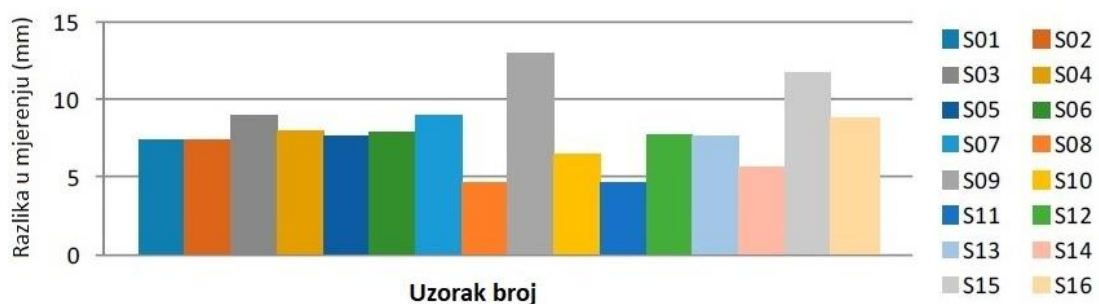
Jedan od zadataka ovog završnog rada bio je analizirati primjenu laserskog daljinomjera u postupku mjerenja promjenjivih veličina, konkretno mjerenjem opadanja pive pjene koja se stvara prilikom ulijevanja piva u čašu. Početna pretpostavka jest da će uređaj moći mjeriti propagaciju pjene na pivu zato što prema [12], pivska pjena ima reflektivnost svjetlosti od 88% pri valnoj duljini svjetlosti od približno 900 nm što znači da se 88% svjetlosti koja dođe na pjenu odbije natrag i dolazi do daljinomjera. Prema tome, laserski daljinomjer bi trebao biti u mogućnosti izmjeriti razliku udaljenosti koja se javlja opadanjem pive pjene unutar čaše. Istraživanje provedeno u suradnji između Prehrambeno tehnološkog fakulteta Osijek i Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek koje se bavilo određivanjem stabilnosti pive pjene pomoću analize digitalnih slika te pomoću laserskog daljinomjera [13] dotiče se upravo ove problematike.

U analizi opadanja pивske pjene uspoređivale su se vrijednosti opadanja pивske pjene 16 različitih lager piva skladištenih u istim uvjetima, na sobnoj temperaturi, točenih u identične čaše zapremine 0.5 L promjera koje su prije točenja dovedene na sobnu temperaturu. Mjerni postav prikazan slikom 3.7. sadržavao je digitalnu kameru koja opadanje pjene mjeri kao smanjenje bijelih piksela u kadru, pa se u ovom slučaju preračunava kao 1 mm = 6.6 piksela. Drugi dio mjernog postava je laserski daljinomjer Bosch GLM 80 usmjeren ka zrcalu postavljenom iznad čaše koje lasersku zraku odbija prema pivskoj pjeni pa se ovdje opadanje pивske pjene očituje kao povećanje udaljenosti na zaslonu daljinomjera.



Sl. 3.7. Mjerni postav sadrži digitalnu kameru i laserski daljinomjer. Prevedeno s engleskog. [13]

Nakon provedenih svih 16 mjerenja rezultati dobiveni digitalnom kamerom i laserskim daljinomjerom uspoređeni su i dobiveni su rezultati prikazani dijagramom na slici 3.8.



Sl. 3.8. Stupčasti dijagram prikazuje razliku između izmjerenih vrijednosti maksimalne visine pjene u početnom trenutku pomoću kamere i laserskog daljinomjera. Prevedeno s engleskog. [13]

Iz dijagrama je vidljivo da se laserski daljinomjer pokazao nepreciznim prilikom mjerenja opadanja pивske pjene sa odstupanjima od 4,5 mm do gotovo 15 mm u usporedbi sa rezultatima dobivenim pomoću digitalne kamere. Razlog tomu je što je pjena građena od mnogobrojnih slojeva mjehurića, a sama laserska zraka prodire kroz slojeve i odbija se između tih slojeva mjehurića te tako vraća do leće daljinomjera. Važno je napomenuti da prilikom mjerenja sa laserskim daljinomjerom na preciznost mjerenja mogu utjecati same karakteristike pjene kao što su gustoća pjene ili veličina mjehurića koji čine tu pjenu.

Također, u istraživanju [13] se pokazalo da laserski daljinomjer, iako nedovoljno precizan za mjerenje propagacije pивske pjene, vrlo precizno određuje točan trenutak nestanka pjene na pivu pokazujući udaljenost do dna čaše. Zaključak je da laserski daljinomjeri u većini slučajeva neće biti u mogućnosti mjeriti opadanje pивske pjene ili bilo koje druge vrste pjene zbog same strukture pjene, ali bit će u mogućnosti precizno detektirati trenutak nestanka iste. Ovakav način detekcije nestanka pjene nudi preciznost uz relativno malu cijenu u odnosu na neke druge metode detekcije.

## **4. MJERENJE LASERSKIM DALJINOMJEROM**

Praktični dio mjerenja bavit će se problemima koji se pojavljuju prilikom rada sa gotovo svim laserskim daljinomjerima, a to su mjerenje do površine koja je pod izravnom sunčevom svjetlosti, mjerenje do i kroz prozirne površine, te mjerenje udaljenosti pod kutom u odnosu na predmet mjerenja, Kratak osvrt bit će i na promjenu veličine osvijetljene točke na predmetu mjerenja u ovisnosti o udaljenosti.

Sva mjerenja provedena su na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku na adresi Kneza Trpimira 2b dana 2. lipnja 2022. godine u vremenu od 11:30h do 17h. Svako od mjerenja laserskim daljinomjerom su individualno obavile četiri osobe kako bi dani rezultati bili što objektivnije prikazani.

### **4.1. Uređaji korišteni prilikom mjerenja**

Za provođenje praktičnog dijela ovog rada korišteno je više uređaja za mjerenje različitih veličina. Za mjerenje udaljenosti koristio se laserski daljinomjer *Bosch GLM 80 Professional* dok se za mjerenje razine osvijetljenja i razine luminancije koristio svjetlomjer *Gossen Mavolux 5032C USB* zbog sumnje na slabu vidljivost pod određenim uvjetima osvijetljenosti i luminancije.

#### **4.1.1. Bosch GLM 80 Professional**

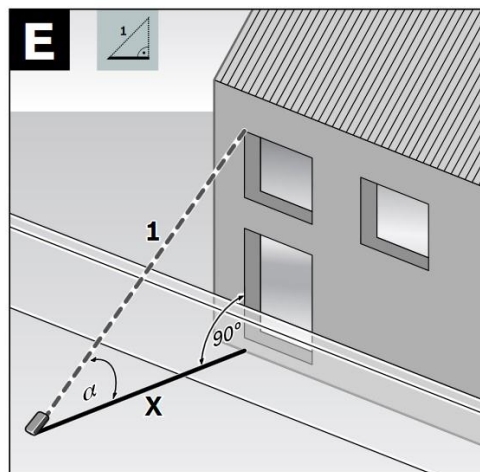
Uređaj Bosch GLM 80 Professional, prikazan na sl na slici 4.1, je profesionalni laserski daljinomjer koji je aktualan na tržištu već desetak godina zahvaljujući brojnim naprednim mogućnostima koje posjeduje. Uređaj ima mogućnost mjerenja udaljenosti, mjerenja nagiba odnosno funkciju libele. Također ima mogućnost indirektnog mjerenja udaljenosti, odbrojavanja vremena te pohrane do 20 prethodnih mjerenja. U sebi sadrži funkcije zbrajanja i oduzimanje a moguće je računati površinu i volumen mjerenog objekta.[2]

Prema tehničkim karakteristikama uređaja, u idealnim uvjetima najveća moguća udaljenost mjerenja iznosi 80 dok u nesavršenim uvjetima maksimalna udaljenost iznosi 45 metara, što dakako ovisi i o korištenju crvenih naočala i filtera na samom uređaju. Preciznost mjerenja u uobičajenim uvjetima iznosi  $\pm 1,5\text{mm}$  dok u otežanim uvjetima rada iznosi  $\pm 2,5\text{mm}$ . Kod indirektnog mjerenja, prikazanog slikom 4.2., maksimalni kut iznosi, a isti kut je i pri korištenju u funkciji libele. Za mjerenje kuta pak ima mogućnost mjerenja do  $360^\circ$  uz preciznost  $0,1^\circ$ .



Sl. 4.1. Bosch GLM 80 Professional laserski daljinomjer sa pripadajućom opremom

Laserska dioda ovog daljinomjera emitira crvenu svjetlost valne duljine 635nm. Sama laserska dioda je relativno male snage, 1mW što se ubraja u lasere klase 2 i znači da nema potrebe za nošenjem zaštite za oči i nema opasnosti od ozljede oka u slučaju da se uređaj normalno koristi[14]. Uređaj se napaja Li-Ion baterijom kapaciteta 1250 mAh što u konačnici omogućava do 25000 mjerenja sa jednim punjenjem. Uređaj posjeduje i IP54 certifikat što znači da je otporan na prskanje vodom i na prašinu.



Sl. 4.2. Prikaz neizravnog mjerenja udaljenosti [2]

#### 4.1.2. Gossen Mavolux 5032C USB

Uređaj Gossen Mavolux 5032C USB, prikazan slikom 4.3., je precizni svjetlomjer njemačke tvrtke GOSSSEN Foto und Lichtmesstechnik GmbH. Uređaj je prvenstveno namijenjen za općenita mjerenja i najmanji je od četiri uređaja iz linije svjetlomjera tvrtke Gossen. Uređajem je moguće

mjeriti osvijetljenost te ,uz poseban dodatak, luminanciju. Osvijetljenost je fotometrijska fizikalna veličina kojom se opisuje upadanje svjetlosti na neku plohu i izražava se u luxima. Luminancija je također fotometrijska fizikalna veličina kojom se iskazuje svjetlosni intenzitet svjetlosti koja putuje u određenom smjeru na jedinici površine izražava se u kandelama po metru kvadratnom.



Sl. 4.3. Svjetlomjer Gossen Mavolux 5032C USB [15]

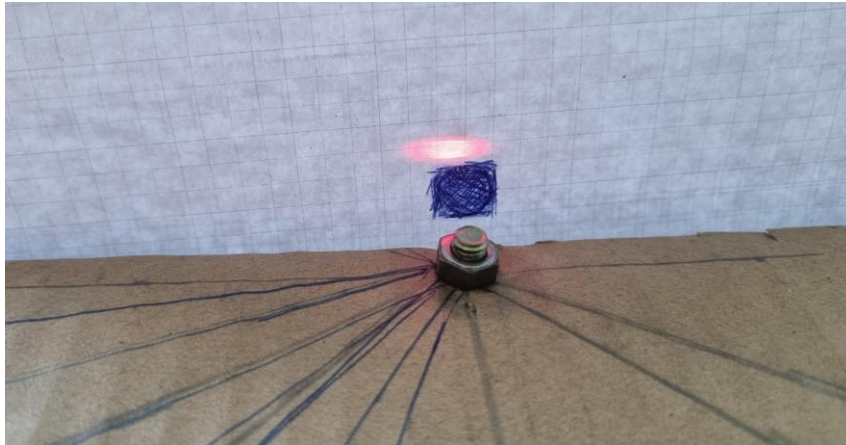
Prema tehničkim karakteristikama [15], mjerenje osvijetljenosti moguće je u rasponu od 0,1 lx do 199900 lx dok je raspon mjerenja luminancije od 1 cd/m<sup>2</sup> sve do 199900 cd/m<sup>2</sup>. Uređaj ima mogućnost mjerenja dva puta u sekundi automatski ili ručno. Preciznost uređaja iznosi ±3% od očitane vrijednosti te ±1 znamenka.

Važno je napomenuti da preciznost uređaja prilikom mjerenja osvijetljenosti pripada u klasu C svjetlomjera prema DIN 5032-7 standardu dok prilikom korištenja dodatka za mjerenje luminancije preciznost uređaja nema klasifikaciju. Za potrebe mjerenja u industriji moguće je uz uređaj naručiti DakS certifikat o tvorničkoj kalibraciji međutim, ovisno o učestalosti uporabe uređaja preporuča se uređaj recalibrirati svakih 12 do 24 mjeseci prema postupku priloženom uz sami uređaj.

Ovaj uređaj ima mogućnost pohrane do maksimalno 100 izmjerenih vrijednosti koje se putem USB kabela mogu prenijeti na računalo radi daljnje obrade. Napajanje uređaja moguće je putem USB priključka ili putem 1,5V AA baterije a zbog štednje energije uređaj se automatski gasi nakon 4 minute rada.

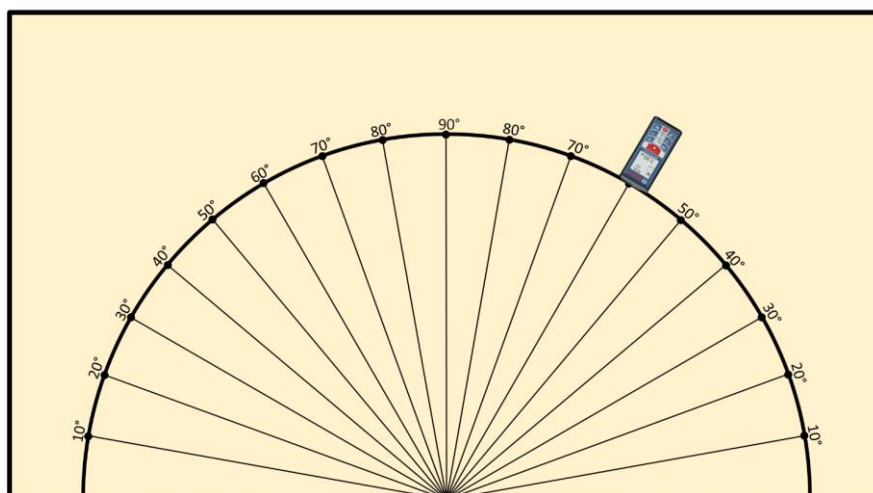
## 4.2. Analiza izmjerene udaljenosti s obzirom na kut mjerenja

Za ovo eksperimentalno mjerenje korišten je uređaj Bosch GLM 80 te podloga sa ucrtanim kružnim lukom podijeljenim na devet jednakih dijelova od  $10^\circ$  do  $90^\circ$ . Mjerenje je provedeno unutar zgrade Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija.



Sl. 4.4. Predmet mjerenja – ucrtani plavi kvadrat na listu bijelog papira postavljen s unutarnje strane prozora

Predmet mjerenja, prikazan na slici 4.4., je ucrtani tamno plavi kvadrat na listu bijelog papira postavljen s unutarnje strane prozora. Udaljenost se mjerila tako što se prednja ivica daljinomjera poravna sa ucrtanim kružnim lukom na podlozi, laserska dioda mjernog uređaja se postavi točno iznad oznake kuta na kružnom luku, kako je prikazano slikom 4.5, te se usmjeri prema središtu ucrtanog kvadrata kako je prikazano slikom 4.4. Mjerenja su provedena 10 puta i to kružno sa ciljem da se u mjerene rezultate uvede moguće postojanje sustavnih i slučajnih pogrešaka.



Sl. 4.5. Tlocrt mjernog postava; laserski daljinomjer poravnat sa oznakom na kružnom luku i usmjeren na predmet mjerenja.



Izmjerene vrijednosti pod različitim kutovima u svih 10 krugova mjerenja dane su tablicom 4.1.:

Tablica 4.1. Izmjerene udaljenosti[m] – papir s unutarnje strane prozora.

Kut / Mjerenje	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10°	0,5339	0,5385	0,5375	0,5401	0,5383	0,5394	0,5371	0,5359	0,5383	0,5371
20°	0,5374	0,5379	0,5382	0,5412	0,5367	0,5405	0,5428	0,5386	0,5365	0,5391
30°	0,5393	0,5411	0,5402	0,5408	0,5367	0,5404	0,5395	0,5397	0,5390	0,5404
40°	0,5459	0,5434	0,5459	0,5425	0,5434	0,5449	0,5446	0,5442	0,5459	0,5436
50°	0,5459	0,5431	0,5447	0,5454	0,5455	0,5459	0,5453	0,5451	0,5436	0,5442
60°	0,5458	0,5445	0,5453	0,5469	0,5431	0,5436	0,5451	0,5441	0,5447	0,5447
70°	0,5461	0,5462	0,5465	0,5475	0,5449	0,5448	0,5450	0,5430	0,5438	0,5443
80°	0,5462	0,5445	0,5453	0,5457	0,5453	0,5449	0,5445	0,5431	0,5434	0,5447
90°	0,5470	0,5435	0,5441	0,5438	0,5445	0,5444	0,5427	0,5429	0,5426	0,5441

Za svaki kut izračunata je aritmetička sredina izmjerenih vrijednosti, te srednje kvadratno odstupanje od aritmetičke sredine. S obzirom da je udaljenost pod svakim kutom bila jednaka, već naoko je vidljivo veće odstupanje izmjerenih vrijednosti kod kutova 10°, 20° i 30°. Navedeni parametri se računaju za sve izmjerene vrijednosti te nakon toga za vrijednosti od 40° do 90° kako bi se detaljnije uočila promjena traženih vrijednosti.

Aritmetička sredina ili prosjek računa se prema izrazu 4-1:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (4-1)$$

gdje je  $n$  broj članova niza, a  $x_i$  je  $i$ -ti član niza po redu.

Srednje kvadratno odstupanje ili standardna devijacija računa se prema izrazu 4-2:

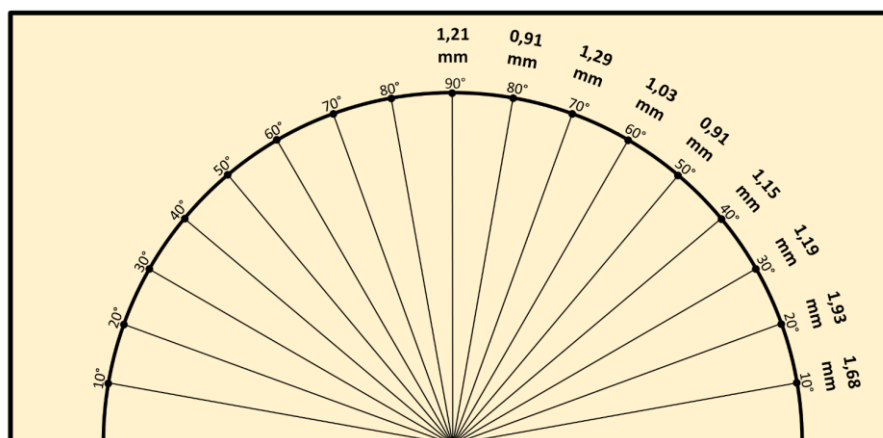
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4-2)$$

Izračunati podaci za svaki kut posebno dani su tablicom 4.2. na sljedećoj stranici.

Tablica 4.2. Izračunate vrijednosti aritmetičke sredine i srednjeg kvadratnog odstupanja – slučaj kada je papir s unutarnje strane prozora.

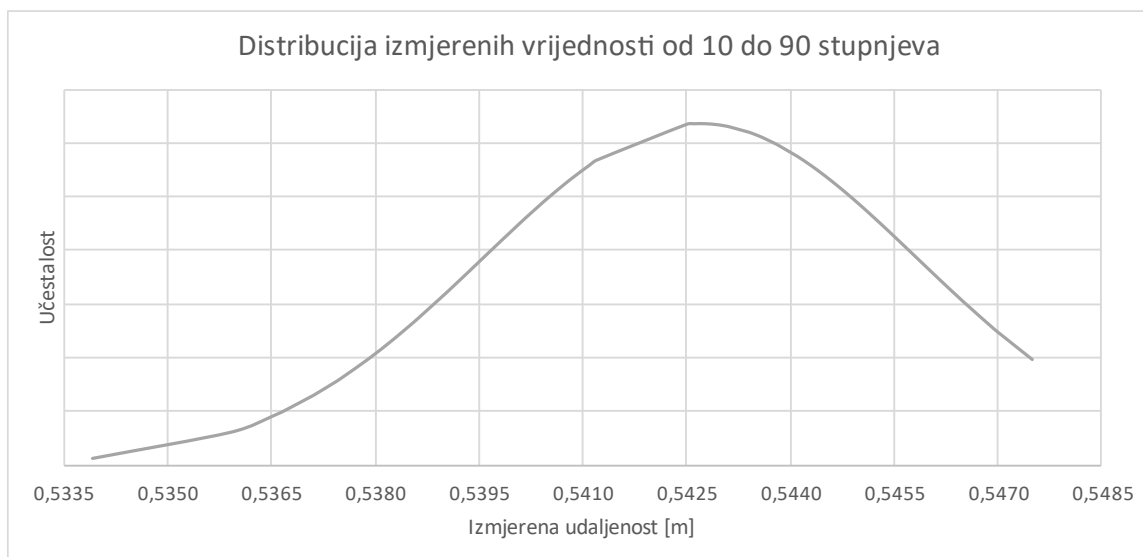
Kut	Aritmetička sredina [m]	Aritmetička sredina [cm]	Srednje kv. odstupanje [m]	Srednje kv. odstupanje [mm]
10°	0,53761	53,761	0,00168	1,68
20°	0,53889	53,889	0,00193	1,93
30°	0,53971	53,971	0,00119	1,19
40°	0,54443	54,443	0,00115	1,15
50°	0,54487	54,487	0,00091	0,91
60°	0,54478	54,478	0,00103	1,03
70°	0,54521	54,521	0,00129	1,29
80°	0,54476	54,476	0,00091	0,91
90°	0,54396	54,396	0,00121	1,21

Iz tablice 4.2. može se zaključiti da se aritmetička sredina mjerenja za pojedini kut kreće od 53,76 cm do maksimalno 54,52 cm. Najveće odstupanje od aritmetičke sredine pojavljuje kod mjerenja pod kutovima od 10° i 20°; 1,68 mm i 1,93 mm dok se najmanje odstupanje pojavljuje kod mjerenja pod kutovima od 50° i 80° i iznosi 0,91 mm. Odstupanja od aritmetičke sredine za svaki pojedini kut grafički su prikazana slikom 4.6.



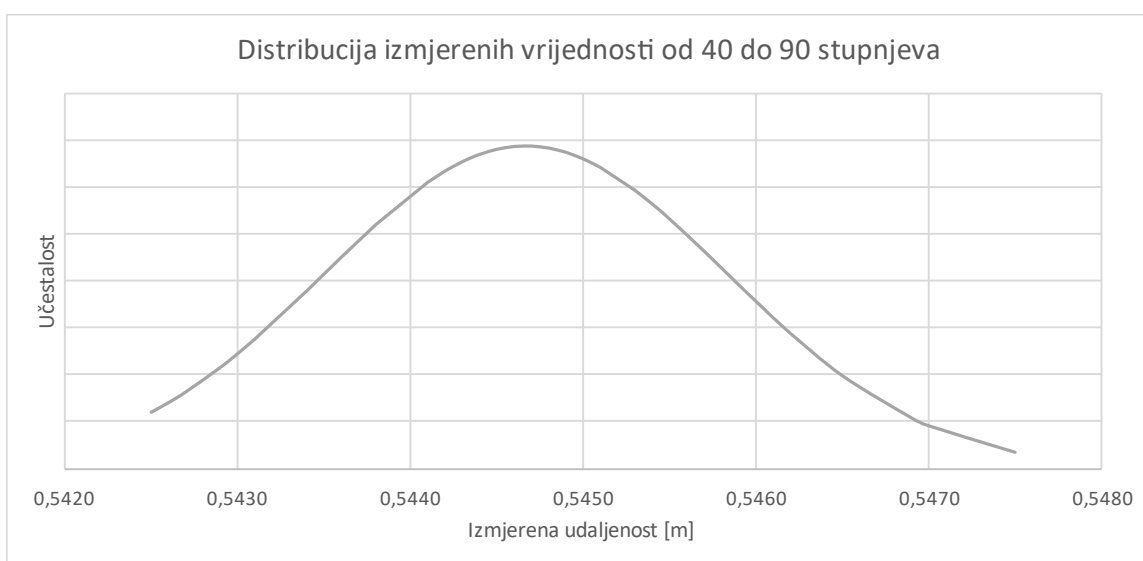
Sl. 4.6. Odstupanje od aritmetičke sredine izraženo u mm i navedeno iznad oznake za pojedini kut

U slučaju da se računa aritmetička sredina i standardna devijacija na cijelom uzorku, odnosno u račun se uzmu sve izmjerene vrijednosti pod kutovima od 10° do 90°, tada se aritmetička sredina mijenja i iznosi 54,27 cm dok standardna devijacija iznosi 3,14 mm. Na slici 4.7. prikazan je graf Gaussove distribucije svih izmjerenih vrijednosti.



Sl. 4.7. Graf distribucije izmjerenih vrijednosti za sve kutove

U drugom slučaju, ukoliko se kao uzorak uzmu vrijednosti izmjerene pod kutovima od 40° do 90°, aritmetička sredina iznosit će 54,47 cm dok standardna devijacija u tom slučaju iznosi 0,116 cm odnosno 1,16 mm a graf distribucije izmjerenih vrijednosti dan je slikom 4.8.



Sl. 4.8. Graf distribucije izmjerenih vrijednosti za kutove 40 do 90 stupnjeva

Prilikom mjerenja udaljenosti pod kutom uočeno je izduženje osvjetljene točke na papiru i to takvo da što je kut bliže 0 ili 180 stupnjeva točka postaje šira odnosno postaje ovalna kako je prikazano slikom 4.9. Kada je daljinomjer okomit na površinu do koje se mjeri točka postaje blago izdužena u visinu sa vidljivo ravnim bočnim rubovima, kako je prikazano slikom 4.10. dalje u tekstu



Sl. 4.9 Osvijetljena točka je izdužena prilikom mjerenja pod kutom od 10 stupnjeva

Izduženje točke najizraženije je bilo prilikom mjerenja pod kutom od 10 stupnjeva zatim 20 i 30 stupnjeva. Širine točke izmjerene su mjernom vrpcom sa podjelom od po 1 mm i zabilježeni su sljedeći rezultati dani tablicom 4.3.:

Tablica 4.3. Izmjerene vrijednosti širine točke prilikom mjerenja pod različitim kutovima

Kut	Širina točke[mm]
10°	20,0
20°	9,0
30°	6,0
40°	4,5
50°	4,0
60°	3,5
70°	3,2
80°	3,0
90°	2,5

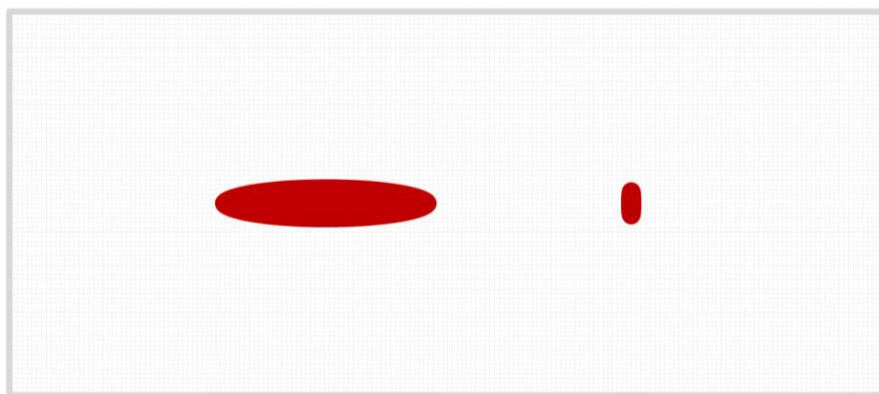
Konačno, iz priloženih tablica i grafova može se zaključiti da rezultati dobiveni mjerenjem pod kutovima od 10, 20 i 30 stupnjeva uvode značajnija odstupanja od prosječne vrijednosti uzorka, što je vidljivo u širini i rasponu vrijednosti na X-osi grafa na slici 4.6. a što je i bila pretpostavka zbog izduženja točke na papiru koje uvodi moguću pogrešku za širinu izdužene točke u odnosu na normalni oblik točke. Ovo označava moguću pogrešku za širinu izdužene točke u odnosu na normalni oblik točke.



Sl. 4.10 Osvijetljena točka prilikom mjerenja pod kutom od  $90^\circ$  u odnosu na predmet mjerenja

Ukoliko se iz proračuna izostave rezultati kutova 10, 20 i 30 stupnjeva, razlika u širini točke na papiru se smanjuje na samo 2 mm. Prema tablici 4.2. prosječne vrijednosti mjerenja za kutove od 40 do 90 stupnjeva razlikuju se manje od 1 mm. Prosječno odstupanje od aritmetičke sredine uzorka tada se smanji sa 3,14 mm na 1,16 mm što je unutar deklarirane preciznosti za mjerenje u normalnim uvjetima i koja iznosi  $\pm 1,5$  mm za uređaj Bosch GLM 80. Valja napomenuti da je prostorno i predmetno ograničenje dovelo do mjerenja na malim udaljenostima koje potencijalno uvode dodatnu grešku.

Izduženje točke na papiru najuočljivije je kod prijelaza sa 40 na 30 stupnjeva pa zatim na 20 i posebice na 10 stupnjeva, prikazano ranije slikom 4.9. gdje se širina točke povećala za 2,2 puta u odnosu na širinu točke kod kuta  $20^\circ$ . Širina točke kada je uređaj okomit na površinu mjerenja iznosila je samo 2,5 mm dok je za kut od  $10^\circ$  širina iznosila gotovo 10 puta više, odnosno 20 mm. Uočava se da povećanje širine točke nije linearno te da se za kutove od 90 do 40 stupnjeva točka relativno malo izdužuje dok za kutove 30 do 10 stupnjeva izduženje značajno povećava sa smanjenjem kuta. Prema podacima iz tablice 4.3. ekstremi izduženja osvjetljene točke prikazani su grafički u mjerilu slikom 4.11.



Sl. 4.11 Osvijetljena točka – ekstremi; slijeva kod kuta od 10 stupnjeva, a s desna kod kuta od 90 stupnjeva

### **4.3. Analiza izmjerene udaljenosti s obzirom na kut mjerenja kada se mjerna točka nalazi iza vizualno prozirne površine – stakla**

Još jedna od prepreka koje se javljaju kod laserskih uređaja za mjerenje jest problem mjerenja kroz staklo, odnosno prozirne površine. Pretpostavka je da mjerenje do prozirne staklene površine uopće ne bi bilo moguće da iza nje ne stoji neka površina koja odbija svjetlost. Ukoliko iza stakla stoji neprozirna površina pretpostavka je da će rezultati odstupati značajnije nego kod mjerenja sa papirnom ispred stakla. Cilj je bio provjeriti do kojeg upadnog kuta se dobiju precizne vrijednosti. Očekivana udaljenost je za 24 mm veća od mjerenja kada se papir nalazio s unutarnje strane stakla. Dodatnih 24 mm su posljedica debljine dva stakla po 4 mm te 16 mm razmaka između njih.

Za ovo eksperimentalno mjerenje, kao i za mjerenje u potpoglavlju 4.2. korišten je laserski mjerni uređaj Bosch GLM 80 te podloga sa ucrtanim kružnim lukom podijeljenim na devet jednakih dijelova od  $10^\circ$  do  $90^\circ$ . Mjerenje je provedeno unutar zgrade Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija na istom mjestu kao i mjerenje u prethodnom potpoglavlju ali s jednom razlikom, predmet mjerenja je ucrtani tamno plavi kvadrat na listu bijelog papira postavljen s vanjske strane prozora.

Udaljenost se mjerila jednako kao i u prošlom postupku, tako da se prednja ivica daljinomjera poravna sa ucrtanim kružnim lukom na podlozi, laserska dioda uređaja se postavi točno iznad oznake kuta na kružnom luku te se usmjeri prema središtu ucrtanog kvadrata kako je prethodno prikazano slikom 4.5.

Mjerenja su provedena 10 puta i to kružno sa ciljem da se u mjerene rezultate uvede moguće postojanje sustavnih i slučajnih pogrešaka. Izmjerene vrijednosti u svih 10 krugova mjerenja dane su tablicom 4.4. Jednako kao i u prethodnom mjerenju, za svaki kut računat će se aritmetička sredina izmjerenih vrijednosti, te srednje kvadratno odstupanje od aritmetičke sredine odnosno standardna devijacija.

Tablica 4.4. Izmjerene udaljenosti[m] – papir s unutarnje strane prozora

Kut / Mjerenje	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10°	1,0692	1,0675	1,0693	1,0709	1,0739	1,0693	1,0699	1,0691	1,0694	1,0676
20°	1,0287	1,0270	1,0247	1,0239	1,0193	1,0227	1,0228	1,0255	1,0237	1,0207
30°	0,5539	0,5564	0,5564	0,5527	0,5569	0,5559	0,5571	0,5573	0,5542	0,5549
40°	0,5612	0,5626	0,5627	0,5618	0,5612	0,5673	0,5629	0,5631	0,5605	0,5625
50°	GREŠKA	0,5644	0,5654	0,5701	0,5663	0,5637	0,5668	0,5669	0,5639	0,5701
60°	0,5699	0,5700	0,5687	0,5687	0,5684	0,5686	0,5681	0,5689	0,5691	0,5695
70°	0,5703	0,5716	0,5694	0,5700	0,5701	0,5678	0,5701	0,5701	0,5689	0,5709
80°	0,5720	0,5716	0,5696	0,5717	0,5701	0,5708	0,5708	0,5715	0,5705	0,5709
90°	0,5650	0,5635	0,5670	0,5655	0,5658	0,5663	0,5658	0,5661	0,5666	0,5631

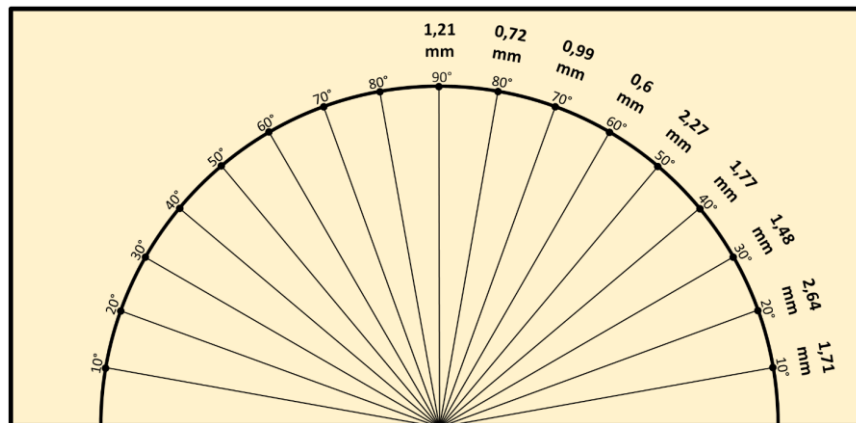
Slično kao i u prethodnom mjerenju, već naoko je vidljivo da postoji znatno veće odstupanje izmjerenih vrijednosti kod kutova 10° i 20° te manje odstupanje kod kuta 30°, a posebice u odnosu na prethodno mjerenje gdje se papir nalazio ispred stakla.

Kako bi se utvrdile sličnosti i razlike s prethodnim mjerenjem, računat će se svi ranije navedeni parametri za sve izmjerene vrijednosti te nakon toga za vrijednosti od 40 do 90 stupnjeva kako bi se detaljnije uočila promjena traženih vrijednosti kada se eliminiraju rezultati koji će prema pretpostavci, slično kao u prethodnom mjerenju, značajnije odstupati od prosjeka. Aritmetička sredina i standardna devijacija za svaki kut posebno dani su tablicom 4.5.:

Tablica 4.5. Izračunate vrijednosti – papir s vanjske strane prozora

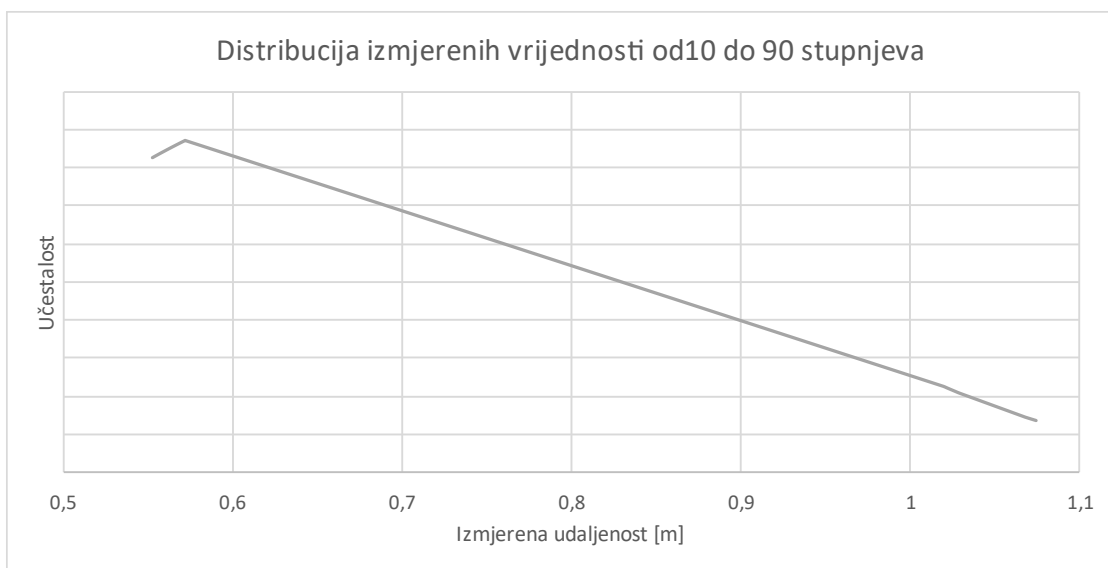
Kut.	Aritmetička sredina [m]	Aritmetička sredina [cm]	Srednje kv. odstupanje [m]	Srednje kv. odstupanje [mm]
10°	1,06961	106,96	0,00171	1,71
20°	1,02390	102,39	0,00264	2,64
30°	0,55557	55,56	0,00148	1,48
40°	0,56258	56,26	0,00177	1,77
50°	0,56640	56,64	0,00227	2,27
60°	0,56899	56,90	0,00060	0,60
70°	0,56992	56,99	0,00099	0,99
80°	0,57095	57,10	0,00072	0,72
90°	0,56547	56,55	0,00121	1,21

Promatrajući podatke iz tablice 4.5. može se zaključiti da se aritmetička sredina za 10 mjerenja za pojedini kut mijenja i kreće se od 55,56 cm do najviše 106,96 cm pritom se najveće odstupanje od aritmetičke sredine pojavljuje kod mjerenja pod kutovima od 20° i 50° i iznosi 2,64 mm i 2,27 mm. Najmanje odstupanje se pojavljuje kod mjerenja pod kutovima od 60° i 80° te iznosi 0,6 mm i 0,72 mm. Odstupanja od aritmetičke sredine za svaki pojedini kut grafički su prikazana slikom 4.12.



Sl. 4.12. Odstupanje od aritmetičke sredine izraženo u mm i navedeno iznad oznake za pojedini kut

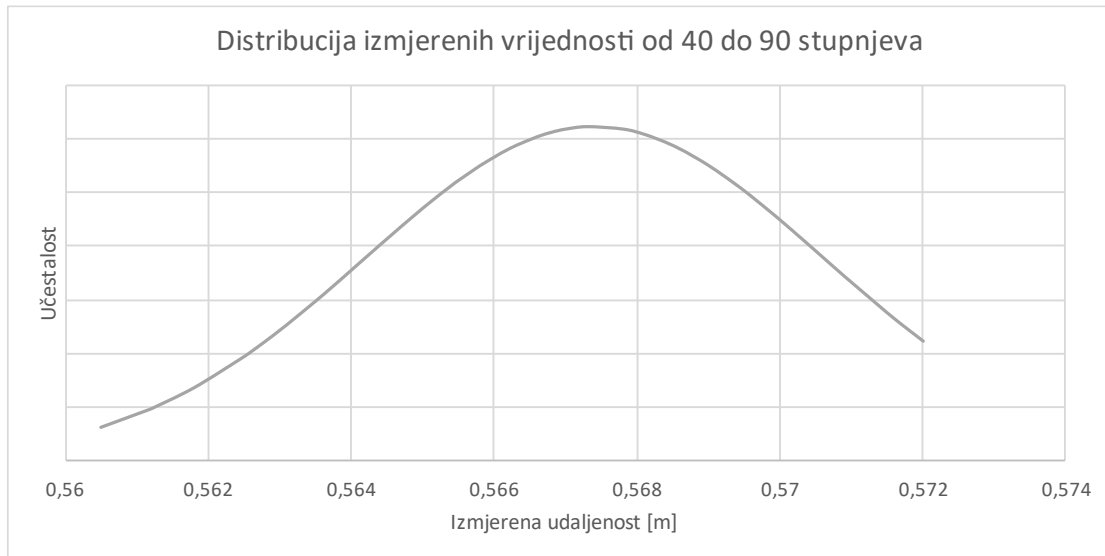
U slučaju da se računa aritmetička sredina i standardna devijacija na cijelom uzorku, odnosno u račun se uzmu sve izmjerene vrijednosti pod kutovima od 10° do 90°, tada se aritmetička sredina mijenja i iznosi 67,38 cm dok standardna devijacija tada iznosi 20,11 cm. Na slici 4.13. prikazan je graf Gaussove distribucije svih izmjerenih vrijednosti.



Sl. 4.13. Graf distribucije izmjerenih vrijednosti za sve kutove



U drugom slučaju, ukoliko se kao uzorak uzmu vrijednosti izmjerene pod kutovima od 40° do 90° aritmetička sredina iznosit će 56,74 cm dok standardna devijacija u tom slučaju iznosi značajno manje nego kod vrijednosti od 10 do 90 stupnjeva, samo 0,3201 cm odnosno 3,2 mm, a graf distribucije izmjerenih vrijednosti dan je slikom 4.14. i značajno manje je spljošten:



Sl. 4.14. Graf distribucije izmjerenih vrijednosti za kutove 40 do 90 stupnjeva

Konačno, iz priloženih tablica i grafova u poglavlju 4.3. može se zaključiti da rezultati dobiveni mjerenjem pod kutovima od 10, 20 stupnjeva uvode velika odstupanja od prosječne vrijednosti cijelog uzorka, što je vidljivo po obliku grafa na slici 4.13. Rezultati potvrđuju pretpostavku o postojanju odstupanja što se može zaključiti prema izduženju točke na papiru. Izduženje ukazuje na pogrešku za širinu izdužene točke u odnosu na normalni oblik točke. Izduženje nastaje i zbog kuta loma svjetlosti koja do papira prolazi kroz dvije staklene plohe.

Primijećeno je i da se prilikom mjerenja pod kutovima 10 i 20 stupnjeva svjetlost djelomično odbija od prvu staklenu plohu i prikazuje se na zidu pokraj plohe. U tom slučaju daljinomjer je očitavao udaljenosti neznatno veće od 1m što je potvrđeno i mjerenjem mjernom vrpcom

Ukoliko se iz proračuna izostave rezultati mjerenja pod kutovima od 10, 20 i 30 stupnjeva, prosječno odstupanje od aritmetičke sredine uzorka smanjit će se značajno, sa 20,11 cm na 3,2 mm što je gotovo neznatno veće od tvornički deklarirane preciznosti za mjerenje u otežanim uvjetima koja iznosi  $\pm 2,5$  mm za uređaj Bosch GLM 80. Nadalje, ukoliko se usporede rezultati mjerenja pod kutovima 40 do 90 stupnjeva kada je papir bio s unutarnje strane prozora s onima kada se nalazio s vanjske strane dolazi se do razlike u udaljenostima od 2,27 cm odnosno 22,7 mm dok je očekivana i stvarna razlika bila 24 mm. Ovim rezultatom dokazalo se da uređaj griješi za 1,3 mm

što je prema tehničkim karakteristikama unutar dozvoljene pogreške za rad u normalnim uvjetima. S obzirom da je mjerni postav bio prilično grubo i nedovoljno precizno izrađen za ovu svrhu, pretpostavka je da bi izmjereni rezultati bili i još precizniji sa manjim odstupanjima da se koristio precizniji mjerni postav izrađen od čvršćeg materijala.

#### **4.4. Analiza intenziteta utjecaja sunčeve svjetlosti na mjerenje laserskim daljinomjerom**

Sljedeći problem koji se pojavljuje prilikom mjerenja sa laserskim daljinomjerima jest problem mjerenja pod izravnim sunčevim svjetlom. Pretpostavka je bila da pod izravnim sunčevim svjetlom neće biti moguće mjerenje na udaljenostima navedenim u tehničkim karakteristikama uređaja. Ovim eksperimentalnim mjerenjem će se utvrditi utjecaj izravne sunčeve svjetlosti na maksimalnu udaljenost mjerenja i ovisnost udaljenosti o sposobnosti oka pojedinog mjeritelja.

Za ovo eksperimentalno mjerenje korišten je laserski mjerni uređaj Bosch GLM 80 te svjetlomjer Gossen Mavolux 5032C USB. Mjerenje je provedeno unutar i izvan zgrade Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija te u prolazu Julija Knifera pokraj zgrade fakulteta. Mjerenje je provedeno u tri dijela, tako da se prvo mjerila udaljenost do crnog granita u sjeni dok je mjeritelj izložen sunčevoj svjetlosti, zatim do bijelog znaka na ulazu u dvorište fakulteta koji je kao i mjeritelj izložen izravnoj sunčevoj svjetlosti. Posljednji dio ovog mjerenja jest mjerenje unutar zgrade gdje niti predmet mjerenja niti mjeritelj nisu izloženi izravnoj sunčevoj svjetlosti.

Prva dva dijela mjerenja provela su četiri mjeritelja kako bi se vjernije prikazala ovisnost maksimalne udaljenosti o sposobnosti oka pojedinog mjeritelja da uoči točku na određitu dok je mjerenje u sjeni proveo samo jedan mjeritelj. Prije mjerenja udaljenosti na svakoj lokaciji svjetlomjerom su izmjerene i zabilježene vrijednosti osvijetljenosti i luminancije. Postupak mjerenja svjetlomjerom prikazan je slikama 4.15 i 4.16.



Sl. 4.15. Postupak mjerenja osvijetljenosti, svjetlomjer pokazuje vrijednost osvijetljenosti od 92700 lx.

Prvo mjerenje, do sivog granita, izvršeno je u prolazu Julija Knifera pored zgrade FERIT-a. Prije mjerenja izmjerena je osvijetljenost 7370 lx dok je luminancija iznosila 422 cd/m<sup>2</sup>. Zbog lakšeg pronalaska točke na zidu mjeritelji su se postepeno udaljavali od zida do najveće udaljenosti pri kojoj su uspjeli uočiti točku i pritom izvršili nekoliko proizvoljnih mjerenja danih tablicom 4.6.

Tablica 4.6. Izmjerene vrijednosti maksimalne udaljenosti u metrima – sivi granit u sjeni

Mjeritelj 1	Mjeritelj 2	Mjeritelj 3	Mjeritelj 4
2,666	3,520	3,019	2,915
8,506	9,825	8,896	9,154
10,756	11,787	12,281	15,226
14,363	13,245	19,192	19,398
17,279	15,057	-	20,856
21,075	-	-	-

Prema podacima u tablici može se uočiti da niti jedan mjeritelj nije uspio izmjeriti deklariranih 45 metara za rad u otežanim uvjetima. Vidljivo je da su sva četiri mjeritelja uspjela izmjeriti udaljenost veću od 15 m dok su dva mjeritelja uspjela izmjeriti udaljenost veću od 20 m. Prosječna maksimalna udaljenost sva četiri mjeritelja iznosi 19,045 m.

Drugo mjerenje izvršeno je do bijelog znaka na ulazu u dvorište fakulteta koji je kao i mjeritelj izložen izravnoj sunčevoj svjetlosti. Postupak mjerenja se ponavlja kao u prvom mjerenju. Svjetlomjerom je izmjerena vrijednost osvjetljenosti od 92700 lx dok je izmjerena luminancija iznosila 14250 cd/m<sup>2</sup>.

U ovom mjerenju mjeritelji su u nekoliko mjerenja mjerili udaljenosti da bi došli do maksimalne udaljenosti koja je dana tablicom 4.7.:

Tablica 4.7. Izmjerene vrijednosti maksimalne udaljenosti u metrima – bijeli znak na suncu

Mjeritelj 1	Mjeritelj 2	Mjeritelj 3	Mjeritelj 4
4,642 m	5,246 m	6,054 m	7,334 m

Prema podacima u tablici 4.7. vidljivo je da niti jedan mjeritelj nije uspio izmjeriti navedenih 45 metara za rad u otežanim uvjetima niti dostići rezultate kada je predmet mjerenja bio u sjeni. Vidljivo je da su tri mjeritelja uspjela izmjeriti udaljenost veću od 5 m dok je jedan mjeritelj izmjerio manje od 5 m. Dva mjeritelja uspjela su izmjeriti udaljenost veću od 6 m. Prosječna maksimalna udaljenost sva četiri mjeritelja iznosi 5,819 m.



Sl. 4.16. Postupak mjerenja luminancije, svjetlomjer pokazuje vrijednost luminancije od 14250 cm/m<sup>2</sup>.

Treće i posljednje mjerenje izvršeno je unutar zgrade fakulteta, na hodniku koji je čitavom dužinom zaklonjen od izravne sunčeve svjetlosti. Postupak mjerenja se ponavlja kao u prvom i drugom mjerenju. Svjetlomjerom je izmjerena vrijednost osvjetljenosti od 429 lx dok je luminancija iznosila 89 cd/m<sup>2</sup>. Ovo mjerenje je izvršio samo jedan mjeritelj uz prisustvo ostala tri

mjeritelja zato što je maksimalna udaljenost koju je bilo moguće izmjeriti bila ograničena duljinom samog hodnika te je iznosila 57,55 m a sva tri mjeritelja su uspjela uočiti točku na toj udaljenosti.

#### 4.5. Promjena veličine osvijetljene točke u odnosu na udaljenost

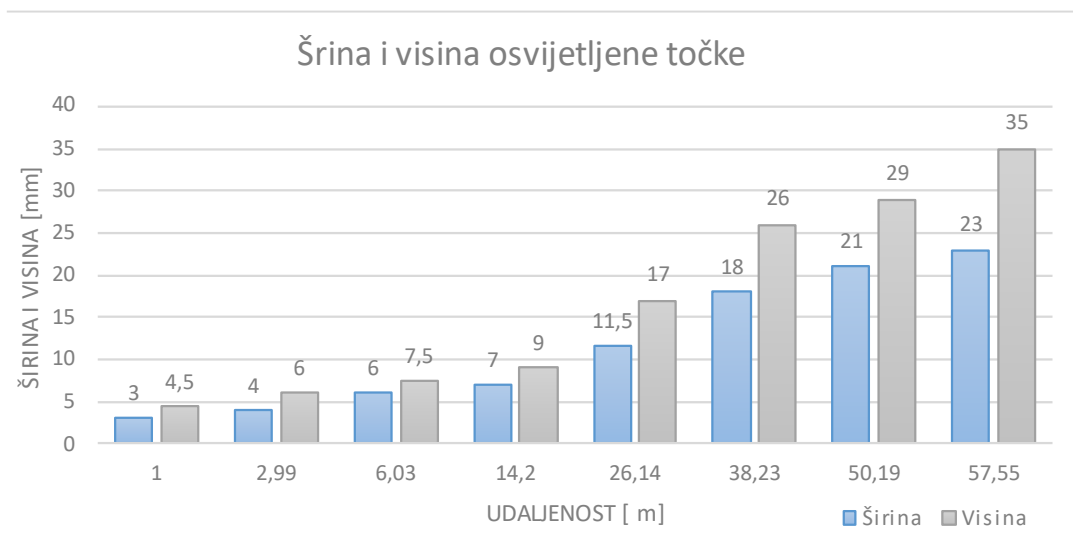
Posljednje eksperimentalno mjerenje provedeno je je unutar fakulteta, na hodniku koji je čitavom dužinom zaklonjen od izravne sunčeve svjetlosti. Cilj ovog mjerenja bio je uočiti promjenu veličine osvijetljene točke na zidu do kojega se mjerila udaljenosti u odnosu na udaljenost.

Prema tehničkim karakteristikama uređaja Bosch GLM 80 [2], na 10 m udaljenosti promjer točke iznosi približno 6 mm dok na 80 m promjer iznosi približno 48 mm. Taj podatak govori kako se veličina točke mijenja za 0,6 mm po metru udaljenosti. Dani podatak bit će uspoređen sa izmjerenim vrijednostima danim u tablici 4.8. Za mjerenje veličine točke korištena je papirna mjerna vrpca sa podjelom od po 1 mm.

Tablica 4.8. Izmjerene vrijednosti veličine točke u centimetrima

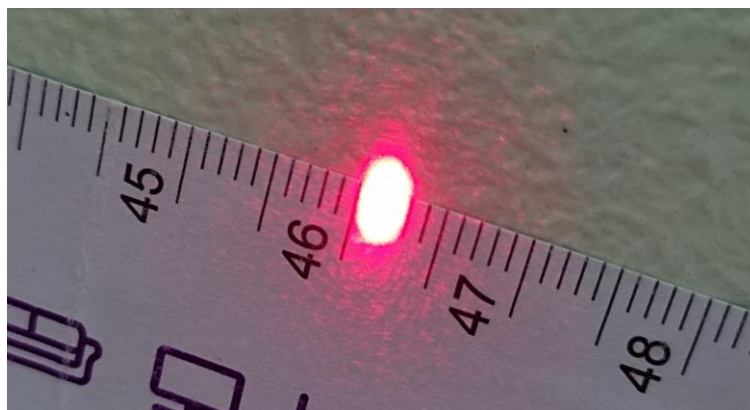
Udaljenost [m]	Visina [mm]	Širina [mm]
1,00	4,5	3,0
2,99	6,0	4,0
6,03	7,5	6,0
14,20	9,0	7,0
26,14	17,0	11,5
38,23	26,0	18,0
50,19	29,0	21,0
57,55	35,0	23,0

Prema podacima u tablici 4.8., prema grafu 4.17. te slikama 4.18. i 4.19- vidljivo je da točka nema pravilan oblik kruga već je blago izdužena u visinu pa joj se stoga ne može mjeriti jedan promjer već je bilo potrebno mjeriti visinu i širinu osvijetljene točke na zidu.



Sl. 4.17. Širina i visina osvijetljene točke za svaku mjerenu udaljenost.

Može se utvrditi da je u eksperimentalnom mjerenju veličina točke već na 2,99 m visinom premašila navedenih 6 mm pri 10 m udaljenosti, a već na 6,03 m je premašila navedenu vrijednost po svojoj širini. Duljina hodnika ograničila je maksimalnu udaljenost mjerenja na 57,55 m gdje je osvijetljena točka na zidu bila 35 mm visoka te 23 mm široka. Stupčastim dijagramom na slici 4.17. prikazane su širina i visina točaka na pojedinim udaljenostima.



Sl. 4.18. Ovalan oblik točke pri mjerenju sa udaljenosti od 1 m.

Analizom podataka iz tehničkih karakteristika dolazi se do podatka da se promjer točke povećava za 0,6 mm po metru udaljenosti. Nadalje, analizom podataka iz tablice 4.8. na udaljenosti od 57,55 metara dolazi se do podatka da se visina točke povećava za 0,608 mm, dok se širina povećava za 0,4 mm po metru udaljenosti. Na većim udaljenostima postaje primjetno rasipanje svjetlosti oko svijetle točke, kako je vidljivo na slici 4.19, a to se događa zbog karakteristika leće laserskog daljinomjera.



Sl. 4.19. Nepravilan oblik osvijetljene točke na udaljenosti 57,55 m, uočava se rasipanje svjetlosti.

Zaključno, iako povećanje osvijetljene točke na većim udaljenostima znatno olakšava uočavanje točke, ono može dovesti do neželjenih mjernih nesigurnosti zato što u slučaju mjerenja udaljenosti do predmeta koji nema potpuno ravne površine može dovesti da na jednom dijelu predmeta mjerenja osvijetljena točka bude bliže ili dalje nego što stvarno jest pa se u tom slučaju može očitati pogrešna udaljenost.

## 5. ZAKLJUČAK

Laserski daljinomjeri počeli su se intenzivno koristiti početkom devedesetih godina prošlog stoljeća nakon što je predstavljen prvi laserski daljinomjer Leica DISTO. Od tada se neprestano razvijaju i unaprjeđuju ali se i dalje osnovni problemi primjene laserske tehnologije u mjeriteljstvu zadržavaju. To problemi su redom, problem mjerenja kada je upadni kut laserske zrake premal u odnosu na predmet mjerenja, problem mjerenja do prozirnih materijala, i kroz njih te problem mjerenja poluprozirnih materijala. Najčešći problem koji se pojavljuje jest slaba vidljivost osvijetljene točke pod određenim uvjetima osvjetljenosti i luminancije.

Ciljano osmišljenim mjernim pokusima dokazana je pojava većih mjernih nesigurnosti prilikom mjerenja pod kutovima manjim od 40 stupnjeva u odnosu na predmet mjerenja te je otkrivena pojava izduženja točke pri tim istim kutovima. Dokazano je da se mjerenjem kroz prozirne površine unosi dodatna mjerna nesigurnost, a posebice kada je upadni kut laserske zrake manji od 40 stupnjeva. Sljedećim mjernim pokusom dokazana je nemogućnost uočavanja osvijetljene točke pod uvjetima velikih vrijednosti osvjetljenosti i luminancije što je u konačnici znatno ograničilo maksimalnu udaljenost koju se može mjeriti pod takvim uvjetima. Utvrđeno je da laserski daljinomjer nije u mogućnosti precizno mjeriti udaljenosti do poluprozirnih materijala, kao što je pivska pjena zbog same strukture pjene. Također prilikom mjerenja uočeno je da osvijetljena točka ima ovalan oblik, a ne okrugao kako je specificirano. Na većim udaljenostima uočeno je zbog samih karakteristika leće daljinomjera rasipanje svjetlosti oko osvijetljene točke.

Unatoč problemima koji se pojavljuju prilikom korištenja, laserski daljinomjeri u današnje vrijeme predstavljaju vrlo važan komad opreme za bilo koga tko se bavi mjerenjima udaljenosti zato što ne samo da omogućuje mjerenje udaljenosti na brži i jednostavniji način od tradicionalnih mjernih vrpca, već i ima razne mogućnosti pohrane podataka i obrade istih. Naravno, uzevši u obzir da su uvjeti pod kojima se mjeri pogodni za rad sa laserskim daljinomjerom.



## LITERATURA

- [1] B. Wauters, "A Brief History of the Laser Distance Meter (LDM)", Leica Geosystems AG, Švicarska, 19.02.2019, Dostupno na: <https://shop.leica-geosystems.com/blog/brief-history-laser-distance-meter-ldm> [Pristupljeno: 7.8.2022.]
- [2] "Bosch GLM Professional Original Instructions", Robert Bosch GmbH, Leinfelden-Echterdingen Njemačka, Tooled-Up.com, 7.8.2013., Dostupno na: <https://www.tooled-up.com/artwork/ProdPDF/Bosch%20glm-80.pdf> [Pristupljeno: 30.5.2022.]
- [3] GLM 150-27 Professional Laserski daljinomjer, Robert Bosch GmbH, Leinfelden-Echterdingen Njemačka, Bosch Professional električni alati i pribor, 2021. Dostupno na: <https://www.bosch-professional.com/hr/hr/products/glm-150-27-c-0601072Z00> [Pristupljeno: 6.6.2022.]
- [4] Hrvatska enciklopedija, Laser, Dostupno na: <https://enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=35494> [Pristupljeno 15.9.2022.]
- [5] Z. Lasić, Primjena laserskih uređaja, Geodetski fakultet - Zavod za primjenjenu geodeziju, Zagreb, 2008.
- [6] LVR Optical, "BLOG: Laser Pulses; emissions and exposure", LVR Optical Limited, Bridgewater Place, Harmer Hill, Ujedinjeno Kraljevstvo, 2014., Dostupno na: <https://www.lvroptical.com/blog-Laser-pulses.html> [Pristupljeno: 18.5.2022.]
- [7] J.A. Santos Dias Fonseca, A. Baptista, M.J. Martins, J.P. Torres, Distance Measurement Systems Using Lasers and Their Applications, Applied Physics Research, vol. 9, Canadian Center of Science and Education, 2017.
- [8] M. Nejad, S. Olyae, "Comparison of TOF, FMCW and Phase-Shift Laser Range-Finding Methods by Simulation and Measurement", Quarterly Journal of Technology and Education, Vol.1, No.1, Jesen 2006.
- [9] M.C. Amann i suradnici, "Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement", Optical Engineering, Vol. 40, No. 1, 1.1.2000.
- [10] T. Bosch, M. Lescure, "Experimental determination of the useful reflection coefficient of non cooperative targets for a time-of-flight laser rangefinder," Optical Review Vol. 2, No. 4, str. 289–291, Kolovoz 1995.
- [11] D. Nitzan, A. Brain, R. Duda, "The measurement and use of registered reflectance and range data in scene analysis", Proceedings of IEEE Vol. 65, No. 2, str. 206–220, 1977.

- [12]RIEGL, “Operation of a Pulsed Laser Distance Meter, General-Information-Distancemeter.pdf”, Riegl Laser Measurement Systems GmbH, Njemačka, 2001., Dostupno na: [http://www.riegl.com/uploads/tx\\_pxriegldownloads/General-Information-Distancemeter.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegldownloads/General-Information-Distancemeter.pdf) [Pristupljeno: 11.08.2022]
- [13]K. Habschied, H. Glavaš; E.K. Nyarko, K. Mastanjević, “Complementing Digital Image “Analysis and Laser Distance Meter in Beer Foam Stability Determination”, Fermentation 2021, 7, 113. Dostupno na: <https://doi.org/10.3390/fermentation7030113> [Pristupljeno: 11.08.2022]
- [14]Laser Safety Facts, “Laser Classes”, Lasers Safety Facts, Sjedinjene Američke Države, Dostupno na: <https://www.lasersafetyfacts.com/laserclasses.html> [Pristupljeno: 20.05.2022]
- [15]Gossen, “Mavolux 5032 C USB: The precision luxmeter”, Gossen Foto - und Lichtmesstechnik GmbH, Nurnberg, Njemačka, 2022., Dostupno na: <https://gossen-photo.de/en/mavolux-5032-c-usb/> [Pristupljeno: 31.5.2022.]

## SAŽETAK

Laserski daljinomjeri predstavljaju mjernu opremu koja radi na principu *Time-Of-Flight* ili na principu faznog pomaka. Analizirani su tehnički aspekti laserskih daljinomjera te su osmišljeni mjerni pokusi kojima je cilj ukazati na mjerne nesigurnosti prilikom mjerenja pod kutom i koje je dizajniran mjerni postav na kartonskoj ploči, te prikazati utjecaj različitih uvjeta osvjetljenosti i luminancije na maksimalnu udaljenost mjerenja. Svi postupci ilustrirani su grafičkim putem a glavna preporuka je da bi kut mjerenja trebao biti veći od 40 stupnjeva za najpreciznije rezultate.

**Ključne riječi:** laserski daljinomjer, mjerna oprema, mjerna nesigurnost, kut mjerenja

## **ABSTRACT**

Laser rangefinders are measuring devices that work on the Time-Of-Flight principle or on the phase shift principle. The technical aspects of laser rangefinders were analyzed and measurement experiments were designed with aim to indicate the measurement uncertainty when measuring at an angle for which a measuring setup was designed on a piece of cardboard and to show the influence of different illumination and luminance conditions on maximum measuring distance. All procedures are illustrated graphically and the main recommendation is that measuring angle should be greater than 40 degrees for the most accurate results

**Keywords:** laser rangefinder, measuring equipment, measurement uncertainty, measuring angle

## **ŽIVOTOPIS**

Lovro Egredžija rođen je 1999. godine u Osijeku. Pohađa Osnovnu školu Petrijevcima u Petrijevcima. Nakon završetka osnovne škole, 2014. godine upisuje Elektrotehničku i prometnu školu Osijek, smjer Tehničar za računalstvo. U srednjoj školi aktivno sudjeluje u projektima na lokalnoj i međunarodnoj razini te školu završava 2018. godine s odličnim uspjehom. Nakon srednje škole, upisuje preddiplomski sveučilišni studij računarstva na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku.