

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Marko Horvatek

**Razvoj modularnog laserskog
interferometra za mjerenje
pomaka**

Zagreb, 2019.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu. Rad je napravljen na Katedri za mjerenje i kontrolu Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu, pod vodstvom doc. dr. sc. Marka Katića, te je predan na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2018./2019.

Marko Horvatek

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|-------------|----------|--|
| A | - | Pojačanje |
| BW | Hz | Propusnost operacijskog pojačala |
| C_j | F | Električni kapacitet |
| f | Hz | Frekvencija |
| $f(-3dB)$ | Hz | Granična frekvencija pojačala |
| f_{BW} | Hz | Granična frekvencija propusnosti operacijskog pojačala |
| f_{ost} | - | Decimalni dio kod zaokruživanja na cijeli broj |
| GBP | Hz | Umnožak propusnosti pojačanja |
| I_D | A | Električna struja fotodiode |
| L | M | Duljina |
| N_{pruga} | - | Broj interferencijskih pruga |
| R_i | Ω | Električni otpor |
| R_f | Ω | Električni otpor povratne veze operacijskog pojačala |
| U_i | V | Električni napon |
| λ | M | Valna duljina |

SADRŽAJ

| | |
|---|----|
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. CILJEVI RADA | 3 |
| 3. OPTIČKA INTERFEROMETRIJA | 4 |
| 3.1. Interferencija svjetlosti..... | 4 |
| 3.2. Vrste interferometrijskih sustava | 6 |
| 3.2.1. Statički interferometri | 6 |
| 3.2.2. Dinamički interferometri..... | 6 |
| 3.3. Michelsonov interferometar | 7 |
| 3.4. Twyman-Greenov interferometar | 8 |
| 4. KONCEPTUALNO RJEŠENJE..... | 10 |
| 4.1. Izvor svjetlosti..... | 11 |
| 4.2. Optičke i mehaničke komponente..... | 12 |
| 4.3. Detektor i elektroničke komponente | 13 |
| 5. EKSPERIMENTALNI DIO | 15 |
| 5.1. Preliminarna ispitivanja | 15 |
| 5.2. Karakteristika fotodiode u kombinaciji s operacijskim pojačalom..... | 16 |
| 5.3. Zahtjevi pri odabiru fotodiode i operacijskog pojačala | 17 |
| 5.4. Simulacija ponašanja odabranih komponenti | 19 |
| 5.5. Ispitivanje sustava fotodiode BPV10 i pojačala OPA380 | 20 |
| 5.6. Razvoj sustava za određivanje smjera gibanja..... | 22 |
| 5.6.1. Pretvorba analognog signala u digitalni..... | 24 |
| 5.6.2. Detekcija smjera i iznosa pomaka..... | 26 |
| 5.7. Ispitivanje prototipa dinamičkog laserskog interferometra | 30 |
| 6. RASPRAVA..... | 35 |
| 7. ZAKLJUČAK..... | 37 |
| 8. LITERATURA | 38 |
| SAŽETAK..... | 40 |
| SUMMARY | 41 |

POPIS SLIKA

| | | |
|----------|---|----|
| Slika 1 | Rezultat konstruktivne i destruktivne interferencije valova..... | 4 |
| Slika 2 | Vidljivi dio elektromagnetskog spektra [1]..... | 5 |
| Slika 3 | Shematski prikaz statičkog interferometra [5] | 6 |
| Slika 4 | Promjena u razlici faza valova koji dolaze na detektor dinamičkog interferometra pri pomaku pomičnog zrcala [6] | 7 |
| Slika 5 | Pojednostavljeni prikaz Michelsonovog interferometra [7]..... | 7 |
| Slika 6 | Interferencijski uzorak na zaslonu Michelsonovog interferometra [9] | 8 |
| Slika 7 | Interferencijski uzorak na zaslonu Twyman-Greenovog interferometra [7]..... | 9 |
| Slika 8 | Shematski prikaz modela interferometra..... | 10 |
| Slika 9 | Pojednostavljeni shematski prikaz jedno stabiliziranog He-Ne lasera [4]..... | 11 |
| Slika 10 | Thorlabs HTPS-EC-1 laserski izbor svjetlosti | 11 |
| Slika 11 | Karakteristike Thorlabs HTPS-EC-1 laserskog izvora svjetlosti [14] | 12 |
| Slika 12 | KM100 podesivi nosač zrcala [15]..... | 12 |
| Slika 13 | Primjer detekcije smjera kretanja s obzirom na odnos amplituda signala s fotodioda u određenom trenutku vremena..... | 14 |
| Slika 14 | Promatranje napona na otporniku pri svjetlosnoj pobudi fotodiode [17]..... | 15 |
| Slika 15 | DET36A/M shema [18]..... | 15 |
| Slika 16 | Shema spajanja diode na operacijsko pojačalo TL081 [3]..... | 17 |
| Slika 17 | Shema simuliranog kruga operacijskog pojačala ADA4891 [24]..... | 19 |
| Slika 18 | Simulirani impulsni odaziv kruga operacijskog pojačala ADA4891 [24] | 20 |
| Slika 19 | Simulirani frekvencijski odaziv kruga operacijskog pojačala ADA4891 [24] | 20 |
| Slika 20 | Komponente interferometra prilikom ispitivanja | 21 |
| Slika 21 | Nosač fotodiode Vishay BPV10..... | 21 |
| Slika 22 | CAD model nosača (lijevo) i nosač s ugrađenim fotodiodama (desno)..... | 22 |
| Slika 23 | Akvizicijska kartica DAS6033 [25] | 23 |
| Slika 24 | Izlazni signal iz enkodera pri različitim smjerovima kretanja [26]..... | 24 |
| Slika 25 | Usporedba izlaznih signala sa Schmittovih sklopova pri ulaznom sinusnom signalu frekvencije 200 kHz..... | 25 |
| Slika 26 | Usporedba izlaznih signala sa Schmittovih sklopova pri ulaznom sinusnom signalu frekvencije 4 MHz | 26 |
| Slika 27 | Shema spajanja LS7183 i dijagram stanja za različite načine rada [29] | 27 |
| Slika 28 | Stabilan i nestabilan izlazni signal sklopa LS7183 | 27 |
| Slika 29 | Shema i vremenski dijagram kruga za detekciju smjera i pomaka enkodera [30] | 28 |
| Slika 30 | Početni dio dizajniranog sustava za detekciju smjera i pomaka | 29 |
| Slika 31 | Dijagram toka elektroničkih sklopova za pretvorbu sinusnog signala s fotodiode u impulse smjera..... | 30 |
| Slika 32 | Interferencijske pruge na detektoru interferometra | 31 |
| Slika 33 | Testiranje elektroničkih sklopova za obradu signala na testnoj pločici | 32 |
| Slika 34 | Razlike u vrijednostima brojila za niz vremenskih intervala | 33 |
| Slika 35 | Pomak iz početne pozicije u drugu poziciju..... | 33 |
| Slika 36 | Povratak iz druge u početnu poziciju | 33 |

POPIS TABLICA

| | | |
|-----------|---|----|
| Tablica 1 | Usporedba operacijskih pojačala | 18 |
| Tablica 2 | Usporedba odabranih fotodioda s prethodno ispitanom diodom DET36A/M | 19 |
| Tablica 3 | Smjer kretanja interferencijske pruga kod detekcije okidnog brida signala A | 24 |
| Tablica 4 | Smjer kretanja interferencijske pruga kod detekcije okidnog brida signala B | 24 |
| Tablica 5 | Rezultati ispitivanja ponovljivosti brojanja | 34 |

1. UVOD

Mjerenje duljine jedan je od ključnih preduvjeta za razvoj modernog, tehnički razvijenog društva. Razvojem civilizacije i povećanjem kompleksnosti tehnologija koje se koriste javlja se potreba za sve većom točnošću određivanja jedinice duljine. Razvojem tehnika mjerenja i težnjom za povećanjem točnosti mjerenja javlja se mogućnost izrade proizvoda o kakvima se do prije par desetaka godina nije moglo ni sanjati. U relativno kratkom razdoblju od 200 godina tehnologija se razvila od strojeva temeljenih na parnom stroju, do elektroničkih čipova, koji mogu sadržavati više od milijarde poluvodičkih elemenata na površini veličine kovanice.

Kako bi zadovoljili sve strože zahtjeve tehnike naspram mjeriteljstva duljine, mjerni se sustavi konstantno razvijaju. Unatoč konstantnom razvoju novih tehnologija, sustav laserskog interferometra proteklih dvadesetak godina zauzeo je i održao poziciju kao jedan od osnovnih uređaja u dimenzionalnom mjeriteljstvu. Pomoću ovog sustava moguće je mjeriti duljinu, pravocrtost i male kutove, a velika fleksibilnost sustava omogućuje da se relativno jednostavno prilagodi za mjerenje mnogih drugih dimenzionalnih značajki predmeta mjerenja.

Katedra za mjerenje i kontrolu, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, posjeduje interferometrijski laserski sustav Renishaw ML10 koji omogućuje mjerenje linearnih ili kutnih pomaka duž određene osi, a u laboratoriju je u uporabi gotovo svakodnevno. Njegova je primjena široka, od mjerenja pomaka, umjeravanja mjernih letvi, pa sve do ispitivanja točnosti CNC strojeva.

Kao i većina komercijalno dostupnih sustava, navedeni je sustav zatvorenog tipa. Sustav je napravljen kao crna kutija (eng. „black box“), što znači da nije moguć utjecaj na komponente sustava koje utječu na rezultat. Pri kontroli u određenom pogonu ili laboratoriju korištenje ovakvog sustava nije problematično, već je preporučljivo, jer osoba koja upravlja sustavom ima manji broj varijabli koje je potrebno pratiti i usklađivati, što rezultira jednostavnijim mjerenjem i smanjenjem utjecaja mjeritelja na rezultat. S druge strane, pri znanstveno-istraživačkom radu javlja se potreba da „zavirimo u sustav“ i modificirajući različite parametre pratimo kako oni utječu na određene dijelove mjernog sustava i konačno na sam rezultat mjerenja. Često se javlja i potreba da se sustav potpuno prilagodi pojedinom mjernom zadatku: mjerenju vrlo malih pomaka s visokom rezolucijom i malom brzinom, ili velikih pomaka s nižom rezolucijom. S obzirom na nedostatak komercijalno dostupnih

rješenja modularnog sustava laserskog interferometra, javlja se potreba za razvijanje vlastitog sustava prema potrebama Katedre za mjerenje i kontrolu, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

2. CILJEVI RADA

Opći cilj rada je istražiti mogućnost korištenja komercijalno dostupnih elektroničkih, optičkih i mehaničkih komponenti za izradu interferometrijskog laserskog mjernog sustava. Motivacija za korištenje pojedinačnih komponenti umjesto gotovih sklopova je stvaranje modularnog sustava kod kojeg se rad svake komponente može pojedinačno nadzirati. Uz to modularni sustav omogućuje zamjenu ili nadogradnju pojedinih dijelova sustava drugim kompatibilnim komponentama, ukoliko se za to ukaže potreba.

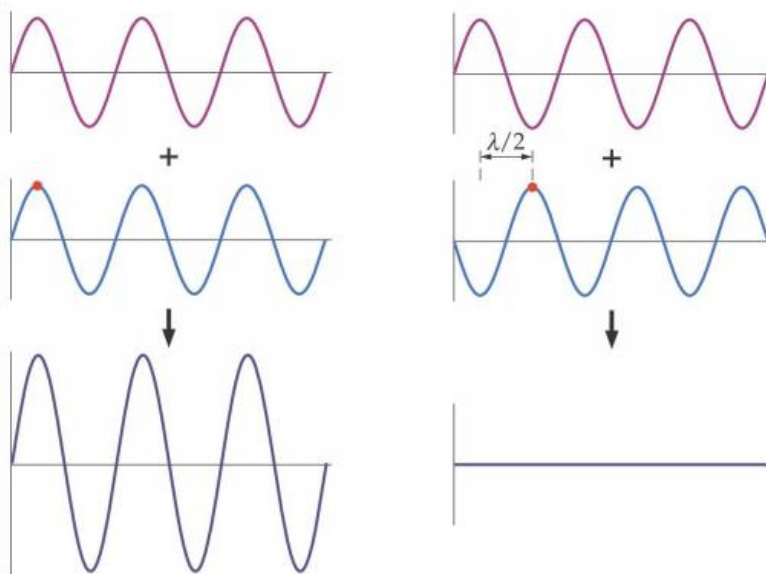
Specifični ciljevi ovoga rada su:

- odabir optičkih, mehaničkih i elektroničkih komponenti pogodnih za realizaciju sustava modularnog dinamičkog interferometra,
- ispitivanje odabranih elektroničkih komponenti u svrhu utvrđivanja karakteristika bitnih za rad sustava,
- ispitivanje rada prototipnog sustava nakon odabira svih komponenti potrebnih za njegovu izradu.

3. OPTIČKA INTERFEROMETRIJA

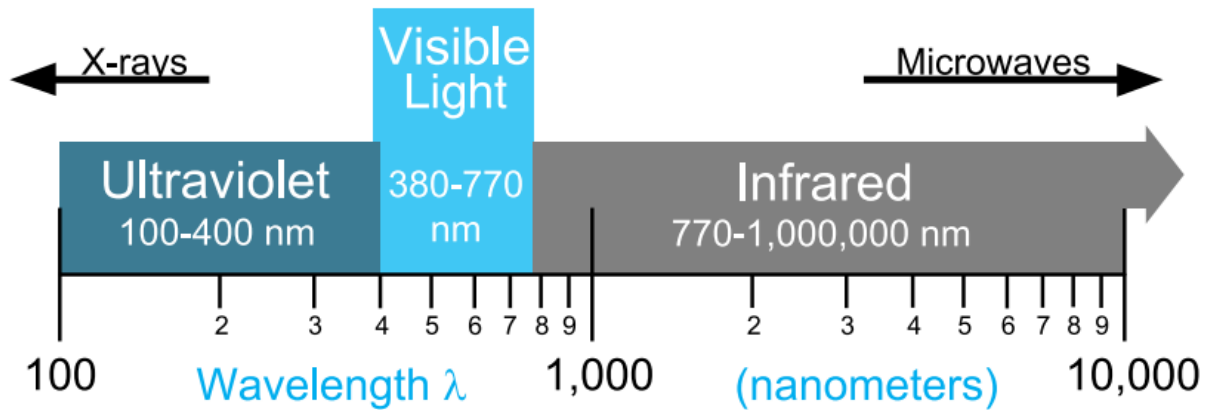
3.1. Interferencija svjetlosti

Interferencija valova je pojava algebarskog zbrajanja dva ili više valova koji se nalaze u određenom vremenskom trenutku u istoj točki prostora. Ova pojava događa se kod svih valova, bili oni mehanički ili elektromagnetski. Osnovni preduvjet je koherentnost valova, što podrazumijeva da imaju vremenski konstantnu razliku u fazi, identične valne duljine te (u idealnom slučaju) identične amplitude. Slika 1 prikazuje primjere konstruktivne i destruktivne interferencije valova. Prvi primjer prikazuje interferenciju valova kod kojih nema razlike u fazi. Rezultat je val dvostruko veće amplitude od početnih valova. Drugi primjer prikazuje valove s faznim pomakom $\lambda/2$ kod kojih pri interferenciji dolazi do međusobnog poništavanja valova.



Slika 1 Rezultat konstruktivne i destruktivne interferencije valova

Pojam vidljiva svjetlost označava relativno uski dio spektra elektromagnetskog zračenja vidljivog ljudskom oku. Kod većine ljudi oko može raspoznati valne duljine od 380 do 780 nm (Slika 2).



Slika 2 Vidljivi dio elektromagnetskog spektra [1]

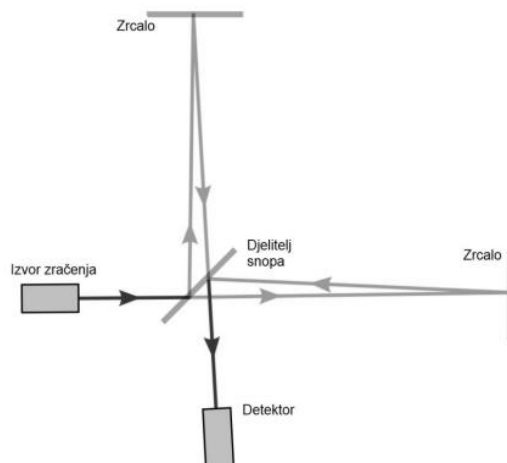
Interferometrija je skupina tehnika kojima se valovi, najčešće elektromagnetski, superponiraju u svrhu dobivanja informacija [2]. Izrazito je važna metoda pri istraživanju astronomije, optike, mjeriteljstva, oceanografije, seizmologije, kao i u istraživanjima u mnogim drugim poljima znanosti. Interferometri, tj. uređaji koji za mjerenje koriste pojavu interferometrije u širokoj su upotrebi u znanosti i industriji za mjerenje malih pomaka, indeksa loma svjetlosti i hrapavosti površine [3].

3.2. Vrste interferometrijskih sustava

Interferometrijske sustave moguće je podijeliti s obzirom na informaciju o promjeni faze koju mjerimo [4]. Pri tome je moguće kontinuirano mjeriti promjenu faze pri promjeni optičkog puta ili analizirati relativni odnos faznih razlika za nepromjenjivi optički put. U prvom slučaju riječ je o dinamičkim, a u drugom slučaju o statičkim interferometrijskim sustavima [5].

3.2.1. Statički interferometri

Statički interferometri pružaju informaciju o faznoj razlici za optički put nepromjenjive veličine u vremenu. Shematski prikaz osnovnog modela statičkog interferometra moguće je vidjeti na slici 3. Osnovna razlika statičkih s obzirom na dinamičke interferometre je to što u pravilu ostvaruju veće vidno polje, u svrhu ispitivanja relativne fazne razlike između optičkih zraka. Ukoliko bi oba zrcala interferometra bila idealno ravna, polje interferencijskih pruga bilo bi jednoliko, no ukoliko ispitno zrcalo nije idealno ravno zbog varijacije u visini doći će do promjene duljine optičkog puta unutar vidnog polja interferometra. Analizom pozicija interferencijskih pruga unutar interferencijskog polja moguće je s visokom točnosti izmjeriti varijaciju visina zrcala [5].

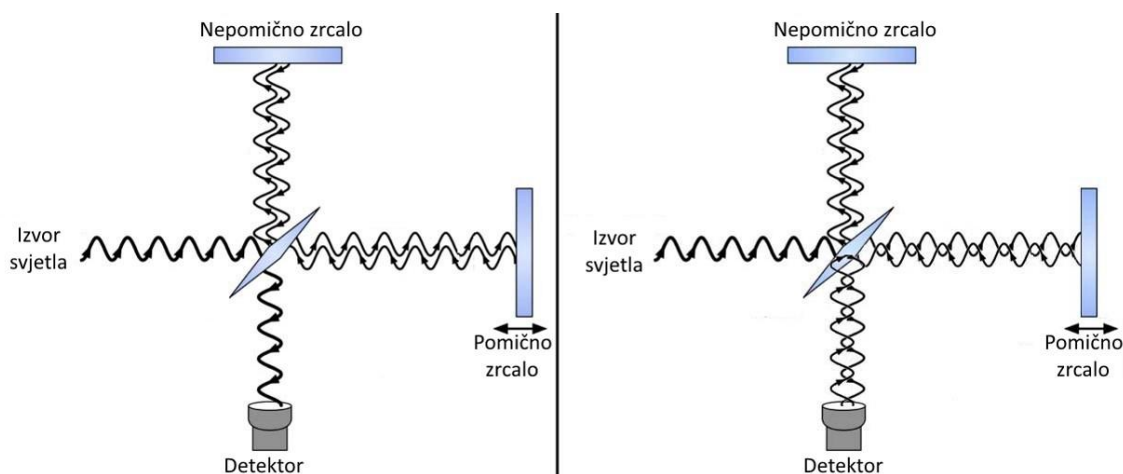


Slika 3 Shematski prikaz statičkog interferometra [5]

3.2.2. Dinamički interferometri

Dinamički interferometri za razliku od statičkih mjere pomak, odnosno promjenu duljine. Jedan od krakova (nepomično zrcalo) koristi se kao referentni, a drugi krak se sastoji od pomičnog zrcala koje se postavlja na element čiji se pomak želi izmjeriti. Pomak zrcala u ispitnom kraku dovodi do promjene fazne razlike između referentnog i ispitnog kraka, što

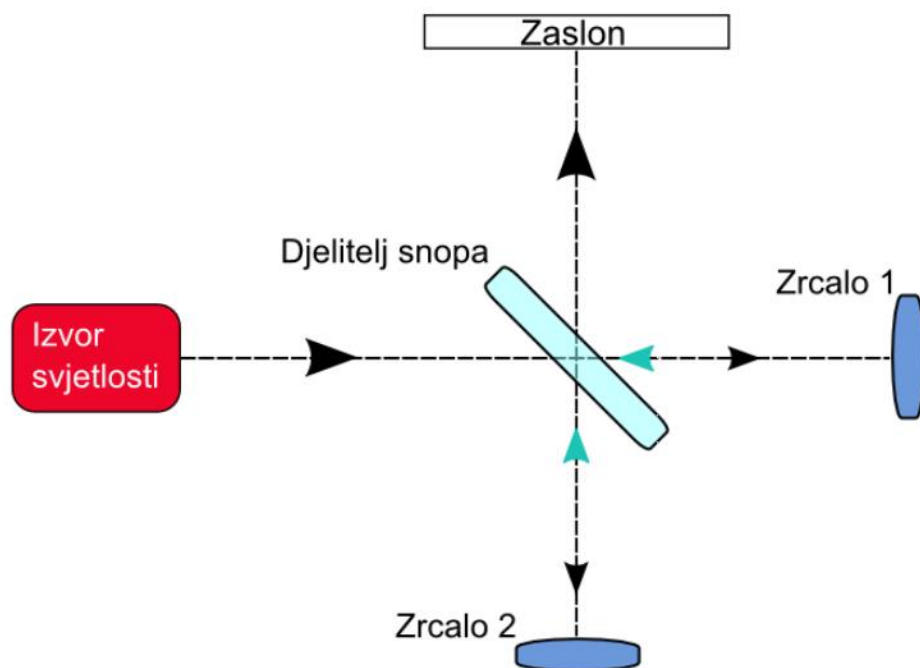
rezultira promjenom intenziteta ponovno kombiniranog vala (Slika 5). Prateći ovu promjenu, moguće je odrediti pomak zrcala preko broja ciklusa promjena intenziteta od minimalnog od maksimalnog iznosa [4].



Slika 4 Promjena u razlici faza valova koji dolaze na detektor dinamičkog interferometra pri pomaku pomičnog zrcala [6]

3.3. Michelsonov interferometar

Američki znanstvenik Albert Abraham Michelson predstavio je 1892. godine u Međunarodnom uredu za utege i mjere prvi prototip interferometra. Sastojao se sastojao od izvora svjetlosti, djelitelja snopa, dva zrcala i zaslona za detekciju (Slika 5).



Slika 5 Pojednostavljeni prikaz Michelsonovog interferometra [7]

Michelsonova izvedba jedna je od najjednostavnijih izvedba interferometra. Kod nje izvor emitira divergirajući snop svjetla prema djelitelju snopa (eng. „beam splitter“) koji ga razdvaja u dva snopa jednakog intenziteta. Jedan snop je usmjeren na pomično zrcalo 2, a drugi na fiksno zrcalo 1. Nakon refleksije snopova od zrcala (prikazano svjetlo plavom bojom na slici), oni se vraćaju do djelitelja snopa koji ih usmjerava prema zaslonu. S obzirom da su oba snopa stvorena istim izvorom svjetla, oni su međusobno koherentni, tj. imaju jednaku frekvenciju, polarizaciju i odnos faza. Budući da su snopovi divergentni (šire se kroz prostor u obliku sfernih valnih fronti), kada su nakon refleksije od zrcala snopovi dovedeni u istu točku prostora njihovom interferencijom nastaju svijetle i tamne koncentrične kružnice koje se ocrtavaju na zaslonu (Slika 6) [8].

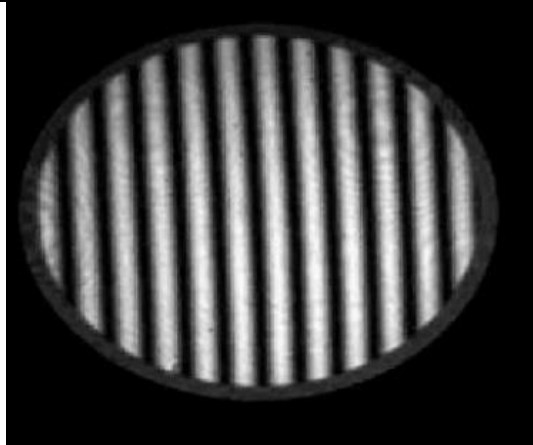


Slika 6 Interferencijski uzorak na zaslonu Michelsonovog interferometra [9]

3.4. Twyman-Greenov interferometar

Za razliku od Michelsonovog interferometra koji koristi divergentnu zraku svjetlosti, Twyman-Greenov interferometar koristi kolimiranu zraku, što rezultira nastajanjem ravnih i paralelnih interferencijskih pruga na zaslonu kao što je prikazano na slici 7.

Isto kao i kod Michelsonovog interferometra udaljenost zrcala 1 od djelitelja snopa je konstantna te zraku svjetlosti koja se odbija od zrcala 1 koristimo kao referencu. Udaljenost zrcala 2 od djelitelja snopa je varijabilna, što znači da je moguće utjecati na prevaljeni put snopa s zrcala 2 do zaslona. Pomicanjem zrcala 2 mijenja se odnos faza snopova na zaslonu (Slika 4), što uzrokuje da se na određenoj točki zaslona interferencija izmjenjuje od destruktivne (tamna linija), do konstruktivne (svijetla linija) [10].



Slika 7 Interferencijski uzorak na zaslonu Twyman-Greenovog interferometra [7]

Ukoliko se pri pomicanju zrcala 2 mjeri koliko se puta u određenoj točki prostora izmijenila linija interferencije iz svijetle u tamnu moguće je odrediti udaljenost za koju je pomaknuto zrcalo 2. Uz emitiranu svjetlost poznate valne duljine λ , udaljenost L za koju je pomaknuto zrcalo moguće je izračunati pomoću izraza:

$$L = (N_{pruga} + f_{ost}) \times \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

Pri tome je:

L - duljina za koju je pomaknuto zrcalo 2

N_{pruga} - broj interferencijskih pruga koje su se izmijenile

f_{ost} - ostatak do intenziteta pruge istovjetnog početnom ($0 < f < 1$)

λ - valna duljina emitirane svjetlosti

Iz formule je moguće izračunati da je, ukoliko se želi izmjeriti pomak od 1 mm potrebno prebrojati više od 3000 prijelaza iz konstruktivne u destruktivnu interferenciju, odnosno prijelaza iz svijetlog u tamno polje. Kako bi se proces ubrzao i automatizirao u današnje vrijeme koriste se fotodiode ili CCD senzori za proces detekcije intenziteta svjetlosti.

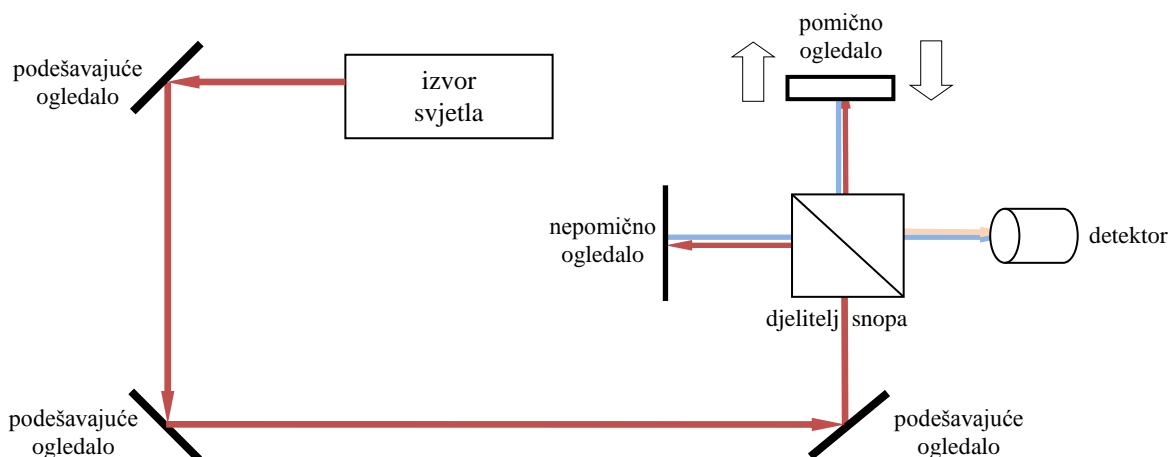
Pri mjerenju interferometrom uobičajeno se koriste izvori vidljive svjetlosti valne duljine od 400 nm do 700 nm, što uzrokuje linije interferencije od 200 nm do 350 nm. Iz jednadžbe 1 vidljivo je da je samim brojanjem interferencijskih pruga moguće postići rezoluciju 200-350 nm [3].

Veću rezoluciju moguće je postići ukoliko mjerimo ostatak f_{ost} , koji se dobije dodatnom podjelom linija interferencije. Time je moguće doći do rezolucije od 0,001 linije, što je otprilike veličina jednog atoma. [8]

Kako bi se dodatno povećala rezolucija, moguće je koristiti izvor svjetlosti manje valne duljine. Kombinacijom navedenih metoda moguće je koristiti interferometrijske mjerne uređaje za mjerenja duljina manjih od nanometra [11].

4. KONCEPTUALNO RJEŠENJE

Pri razradi modela interferometra odlučeno je koristiti izmijenjenu verziju Twyman-Greenovog interferometra, vidljivu na slici 8. Za izvor svjetla koristiti će se helij-neonski (He-Ne) laserski izvor. Razlog korištenja laserskog izvora je što on daje monokromatsko, koherentno i usmjereno zračenje u vidljivom djelu spektra [7]. Prije samog ulaska u interferometar, laserska se zraka odbija od dva podešavajuća zrcala. Iako većina postava interferometra u literaturi ne sadrži ova dva zrcala [12], odlučeno ih je dodati kako bi se laserska zraka mogla podesiti na pravilnu visinu s obzirom na podlogu, te u isto vrijeme kako bi ulazila u interferometar usmjerena paralelno s podlogom. Ova zrcala nisu nužna za samu izvedbu, ali uvelike olakšavaju inicijalno podešavanje interferometra. Kako bi se omogućio pomak pomičnog ogledala u smjeru kolinearnom sa smjerom laserske zrake koja dolazi na pomično ogledalo koristiti će se linearna kuglična vodilica kojom će biti omogućeno precizno vođenje. Kao detektor interferencijskih pruga biti će korištene fotodiode zbog iznimno kratkog vremena odaziva koje je potrebno kako bi se mogli pratiti pomaci kolica vodilice pri brzinama izazvanim pokretanjem kolica rukom.



Slika 8 Shematski prikaz modela interferometra

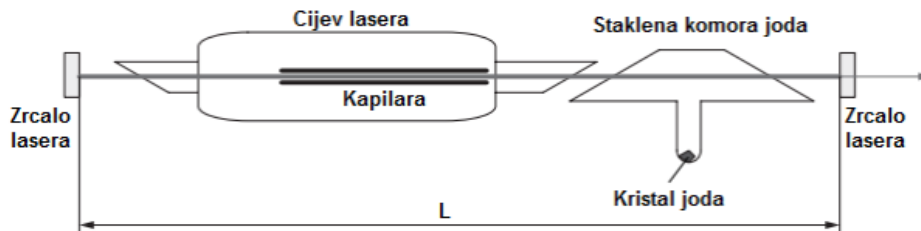
Pri shematskom prikazu modela interferometra na slici 8 zraka svjetlosti iz lasera prikazana je crvenom bojom. Odbijene zrake svjetlosti od pomičnog i nepomičnog zrcala prikazane su svijetlo plavom bojom. U stvarnosti se ove zrake svjetlosti odbijaju od ogledala pod istim kutom pod kojim su upale s obzirom na upadnu ravninu. Zbog lakšeg prikaza na shematskom prikazu na slici 8 zrake su prikazane pomaknute u prostoru, kao da se ne

reflektiraju iz iste točke zrcala. Ovo vrijedi i za zraku narančaste boje koja nastaje odbijanjem zrake koja dolazi od pomičnog zrcala na djelitelju snopa.

4.1. Izvor svjetlosti

U suvremenim interferometrijskim sustavima za izvor svjetla uglavnom se koriste helij-neonski (He-Ne) laseri. Prednosti ovog tipa je njegova velika pouzdanost i sjajna optička svojstva. Šum izlaznog snopa je malen naspram ostalih vrsta lasera uz odličnu stabilnost i koherentnost snopa do duljine od nekoliko kilometara [13]. Pod mane se može ubrojiti to što su jedni od najmanje učinkovitih lasera [7].

Jodno stabilizirani He-Ne laser (Slika 9) specijalna je vrsta He-Ne lasera koji se koristi za realizaciju standarda duljine. Kristal joda djelomično apsorbira svjetlosnu zraku, a moduliranjem frekvencije lasera i kasnijom fazno osjetljivom demodulacijom uklanja se šum i dobiva se laserska zraka stabilizirane frekvencije. Jodno stabilizirani laser, najtočniji je način definiranja mjerne jedinice duljine – metra [7].



Slika 9 Pojednostavljeni shematski prikaz jodno stabiliziranog He-Ne lasera [4]

Pregledom postojeće opreme u laboratoriju katedre za mjerenje i kontrolu odlučeno je korištenje He-Ne lasera HTPS-EC-1 proizvođača Thorlabs kao izvora svjetlosti (Slika 10). Razlog je njegova relativno velika izlazna snaga s obzirom na ostale He-Ne lasere dostupne u laboratoriju. Osim toga na izlaz odabranog lasera postavljena je spojnica koja omogućuje jednostavno spajanje optičkog vodiča pomoću kojeg se značajno olakšava pozicioniranje izvora svjetlosti. Karakteristike ovog modela lasera moguće je vidjeti na slici 11[14].



Slika 10 Thorlabs HTPS-EC-1 laserski izbor svjetlosti

| Item # | HTPS | HTPS-EC |
|-----------------------------|-------------------------------|---------|
| Wavelength | 633/612/604/594/543 nm | |
| Min Output Power | 4.0/2.5/0.5/0.6/0.3 mW | |
| Maximum Output Power | 10.0 mW | |
| Noise (30 Hz – 10 MHz) | <1% rms | |
| Polarization | Linear > 500:1 | |
| Mode Structure | TEM ₀₀ > 99% | |
| Beam Diameter | 0.77/0.76/0.75/0.74/0.71 mm | |
| Beam Divergence | 1.05/1.03/1.02/1.02/0.97 mrad | |
| Beam Drift ¹ | <0.2 mrad | |
| Long Term Beam Drift | <0.05 mrad | |
| Longitudinal Mode Spacing | 428 MHz | |
| Starting Voltage | <10 kV (DC) | |
| Operating Voltage (DC) | 2200 V | |
| Operating Current | 5.25 mA | |
| Series Resistors in Housing | 94 KΩ | |
| Shock | 15 g for 11 msec | |
| CDRH/CE Classification | IIb/3B | |
| Weight | 5000 g | |

Slika 11 Karakteristike Thorlabs HTPS-EC-1 laserskog izvora svjetlosti [14]

4.2. Optičke i mehaničke komponente

S obzirom na velik broj modularnih Thorlabs optičkih komponenti dostupnih u laboratoriju tijekom izrade ovog rada odlučeno je koristiti optičke komponente proizvođača Thorlabs zajedno s pripadnim nosačima. Korištena su zrcala Thorlabs ME1-G01 i djelitelj snopa CM1_BS013.

Od mehaničkih komponenti korišteno je postolje, tj. bazna ploča, uz elemente za pozicioniranje i podešavanje proizvođača Thorlabs. Odlučeno je koristiti sve komponente istog proizvođača kako bi se izbjegli problemi s nekompatibilnim prihvata različitim setova nosača. Uloga postolja je da omogućuje pravilno učvršćivanje i precizno pozicioniranje komponenti na željeno mjesto. Za ovu namjenu odabrana je eksperimentalna ploča Thorlabs MB12. Noseći elementi BA, PH i UPH serije korišteni su za postavljanje optičkih elemenata na odgovarajuću visinu i međusobnu udaljenost. Kako bi se omogućilo precizno podešavanje kutova nagiba zrcala korišteni su KM100 podesivi nosači (Slika 12).



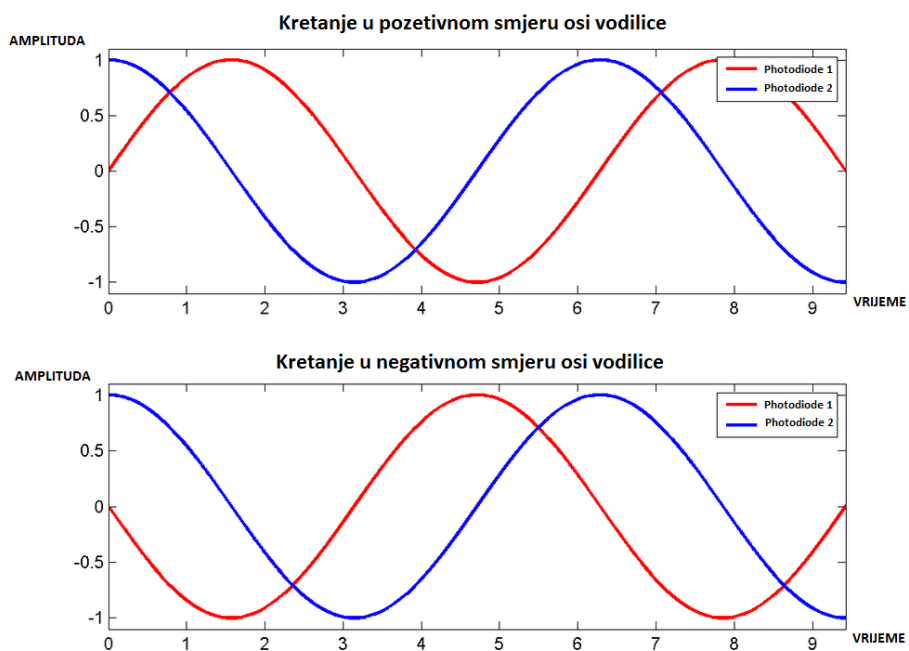
Slika 12 KM100 podesivi nosač zrcala [15]

4.3. Detektor i elektroničke komponente

Kao detektor u interferometrijskim sustavima najčešće se koriste CCD kamere i fotodiode. Ostali elektronički elementi korišteni za detekciju svjetlosti (fotootpornici i fototranzistori) uglavnom nisu dovoljno brzi za ovu primjenu.

Za razliku od kamere koja bilježi osvjetljenje na površini detektora u radnoj rezoluciji, fotodioda pretvara prosječno osvjetljenje površine detektora u vrijednost električne struje. To znači da je pri detekciji kamerom moguće odrediti raspored intenziteta svjetlosti na površinu detektora, dok je kod fotodiode moguće odrediti samo vrijednost intenziteta, ali ne i njegovu raspodjelu po površini detektora.

Kod dinamičkih interferometara nužno je odrediti broj i smjer interferencijskih pruga koje se pomiču kroz određenu točku na površini detektora. S obzirom na relativno visoku frekvenciju titranja interferencijskih pruga, koja iznosi oko 3,16 MHz kod brzine pomaka zrcala jedan metar u sekundi (uz korištenje izvora svjetlosti valne duljine 633 nm), fotodioda se nameće kao logičan izbor [16]. Koristeći fotodiodu dovoljno je pratiti njen intenzitete kako bi se odredio broj prijeđenih interferencijskih pruga, što je mnogo jednostavniji i pouzdaniji pristup od praćenja velikog broja aktivnih elemenata na površini CCD kamere. Zbog ograničenja fotodiode da prati prosječni intenzitet na aktivnoj površini nije moguće pomoću jedne fotodiode odrediti smjer kretanja interferencijskih pruga. Za detekciju smjera kretanja interferencijskih pruga može se koristiti druga identična fotodioda postavljena na određenu udaljenost od prve okomito na smjer kretanja interferencijskih pruga. Pri tome se kreira fazni pomak između signala fotodiode iznosa $\lambda/4$ koji omogućuje detekciju smjera kretanja s obzirom na to koji od signala prethodi onom drugom. Primjer signala s faznim pomakom $\lambda/4$ te veličina signala u vremenu pri kretanju u oba smjera prikazan je na slici 13.



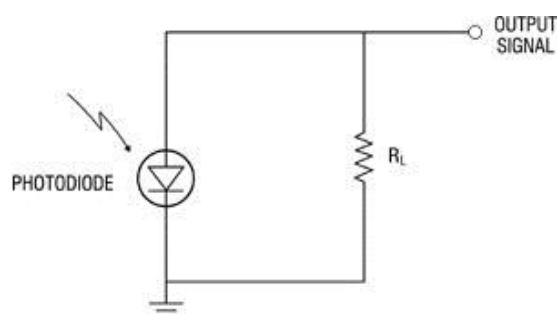
Slika 13 Primjer detekcije smjera kretanja s obzirom na odnos amplituda signala s fotodioda u određenom trenutku vremena

S obzirom na više fotodioda različitih karakteristika korištenih tijekom eksperimenata detaljnije informacije o svakoj od njih biti će dane u eksperimentalnom dijelu ovoga rada.

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. Preliminarna ispitivanja

Kako bi se istražila mogućnost korištenja fotodiode kao detektora dinamičkog interferometra odlučeno je eksperimentalno odrediti njeno ponašanje. Prva i najjednostavnija mogućnost praćenja signala s fotodiode je promatranje pada napona na otporniku postavljenom serijski s fotodiodom (Slika 14).

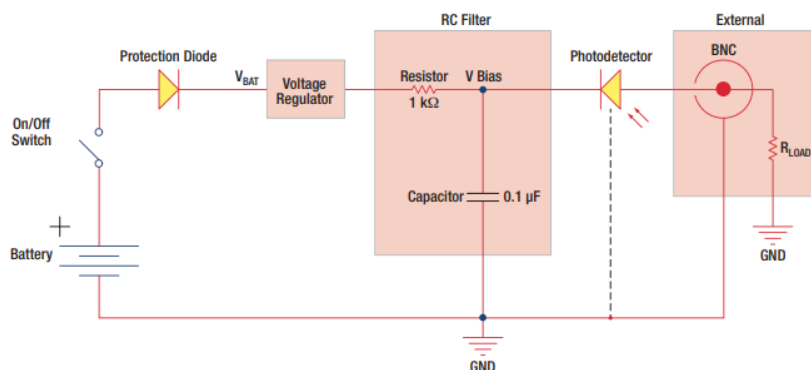


Slika 14 Promatranje napona na otporniku pri svjetlosnoj pobudi fotodiode [17]

Pri tomu će pad napona U_L na otporniku iznosa otpora R_L kroz koji teče struja I_D koju generira fotodioda iznositi:

$$U_L = I_D * R_L \quad (2)$$

S obzirom na postojeću opremu u laboratoriju odabrana je fotodioda Thorlabs DET36A/M, kao najprikladnija za provođenje ovog preliminarnog ispitivanja. Tijekom ispitivanja praćen je napon na otporniku pomoću digitalnog laboratorijskog voltmetra Keithley 2002. S obzirom da fotodioda sadrži u sebi integriranu bateriju i sklop za negativno polariziranje diode (eng. „negative bias“) shema povezivanja se razlikuje od one prikazane slikom 14 i prikazana je na slici 15.



Slika 15 DET36A/M shema [18]

Razlog negativne polarizacije fotodiode je što tako spojena fotodioda daje veoma linearnu karakteristiku izlazne struje s obzirom na količinu svjetlosti koja pada na njenu aktivnu površinu.

Promatrajući odaziv fotodiode na različite intenzitete i brzine titranja svjetlosti primijećena je značajna razlika s obzirom na veličinu otpora R_L . Pri korištenju otpora veličine jednog megaoma dobiven je izlazni signal amplitude od otprilike 12V, dok je kod korištenja otpora 50 oma dobiven izlazni signal u razini par stotina mikrovolta. U prvom slučaju odaziv je bio linearan sve do vrijednosti ulazne frekvencije od nekoliko kiloherca, dok je u drugom slučaju bio linearan i na vrijednostima od nekoliko stotina kiloherca. Rezultat eksperimenta potvrdio je obrnuto proporcionalnu povezanost maksimalne propusnosti sustava i veličine otpora na kojem je praćen pad napona. Korištenjem formule 3 moguće je izračunati f_{BW} , tj. najveću frekvenciju do koje je moguće očekivati relativno linearan odaziv.

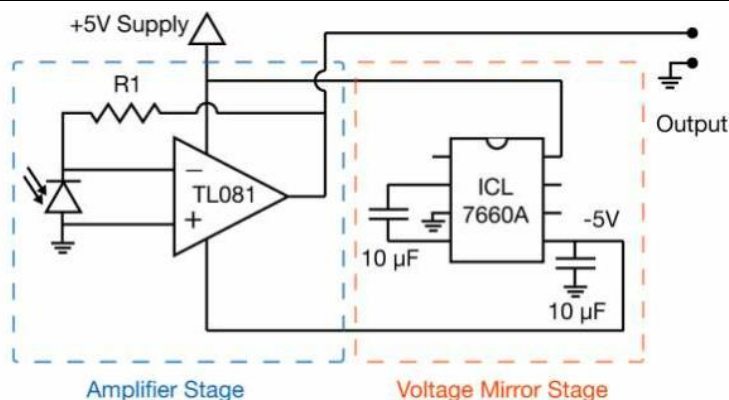
$$f_{BW} = \frac{1}{2 * \pi * R_{LOAD} * C_j} \quad (3)$$

Pri tome je R_{LOAD} iznos otpora na kojem se mjeri pad napona, a C_j unutrašnji kapacitet fotodiode. Moguće je izračunati da je pri vrijednosti otpora $R_{LOAD} = 1 \text{ MHz}$ i parametara $C_j = 40 \text{ pF}$ maksimalna frekvencija propusnosti $f_{BW} = 3978,9 \text{ Hz}$.

5.2. Karakteristika fotodiode u kombinaciji s operacijskim pojačalom

Kako bi se postigla linearnost odaziva na većem rasponu frekvencija, uz amplitudu signala koju je lako moguće pratiti (reda veličine nekoliko volta) odlučeno je promotriti karakteristiku fotodiode priključene na operacijsko pojačalo [19]. U obzir su uzeta široko dostupna pojačala te je odabrano pojačalo TL081, s vrijednosti „Unity-gain bandwidth“ = 3 MHz što ga čini najbržim široko dostupnim pojačalom koje je pronađeno.

Pojačalo je spojeno kao na slici 16, te testirano uz niz vrijednosti otpora između $R1 = 100 \text{ k}\Omega$ i $R1 = 1 \text{ M}\Omega$. Korištenjem operacijskog pojačala dobiven je linearni odaziv na većem rasponu frekvencija u odnosu na eksperiment bez operacijskog pojačala.



Slika 16 Shema spajanja diode na operacijsko pojačalo TL081 [3]

5.3. Zahtjevi pri odabiru fotodiode i operacijskog pojačala

Kako bi se računski predvidjelo ponašanje operacijskog pojačala moguće je koristiti izraze:

$$f(-3dB) = \sqrt{\frac{GBP}{4 * \pi * R_f * C_D}} \quad (4)$$

$$GBP = A * BW$$

Navedenom jednadžbom moguće je izračunati frekvenciju na kojoj će pojačanje pojačala pasti za 3 decibela - $f(-3dB)$. Ova frekvencija označava najveću upotrebljivu frekvenciju pojačala (eng. „cutoff frequency“). Pri tome R_f označava vrijednost otpornika u povratnoj vezi, a C_D kapacitet fotodiode. GBP (eng. „gain bandwidth product“) označava produkt iznosa pojačanja pojačala A i njegove propusnosti pri tom pojačanju BW . Pojačanje operacijskog pojačala je moguće izraziti kao omjer veličine izlaznog napona V_{out} i veličine ulaznog napona na pojačalo V_{in} ili kao omjer otpora povratne veze R_f i otpora na ulazu pojačala R_{in} , kao što je prikazano na slijedećoj formuli [16].

$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_f}{R_{in}} \quad (5)$$

Iz navedenih jednadžbi nameće se zaključak da postoje dva načina da se poveća maksimalna radna frekvencija operacijskog pojačala. Prvi je da se utječe na pojačalo i zamijeni postojeće za pojačalo s većim GBW . Pri tome treba obratiti pozornost na povećanje iznosa šuma kod odabira pojačala brzina većih od nužno potrebne. Drugi pristup je pokušati utjecati na iznos kapaciteta fotodiode te odabirom fotodiode malog kapaciteta koja je predviđena za velike brzine pobude povećati maksimalnu frekvenciju. Pri ovom pristupu treba imati na umu da manji kapacitet uglavnom znači smanjenje aktivne površine diode što pak

rezultira manjom strujom koju fotodioda generira. Manja generirana struja rezultira potrebom korištenja pojačanja većeg iznosa, tj. povećanjem otpora R_f kako bi se održala amplituda izlaznog signala jednake veličine [20]. Promatrajući navedene formule moguće je uočiti sukob u zahtjevima na pojačalo i fotodiodu. Poželjno je imati pojačalo minimalnog GBP , no s druge strane to stvara potrebu za ulaznom strujom većeg iznosa, koju je moguće stvoriti samo na način da se koristi fotodioda veće aktivne površine. Fotodioda veće aktivne površine će nužno imati veći unutarnji kapacitet koji će ograničiti maksimalnu frekvenciju do koje se može sustav koristiti. S druge strane ukoliko se koriste fotodiode izrazito male aktivne površine njihov kapacitet dolazi u red veličine nekoliko pikofarada, pri čemu kapacitet vodova i spojeva tiskane pločice može znatno utjecati na ukupni kapacitet na ulazu pojačala. S obzirom da je pri korištenju takvih fotodioda nužno koristiti pojačala relativno velikog GBP i velike vrijednosti otpornika povratne veze, utjecaj kapaciteta na ulazu pojačala može značajno smanjiti maksimalnu frekvenciju sustava [16].

Iz sukoba navedenih zahtjeva proizlazi potreba za pronalaskom minimalne vrijednosti GBP pri kojoj je moguće odabrati fotodiode dovoljno malog kapaciteta da ne utječu značajno na maksimalnu frekvenciju, a s druge strane dovoljno velike aktivne površine da proizvedu struju dovoljnog iznosa.

Proračunom je određena optimalna vrijednost GBP od oko 100 MHz, te je sukladno tome odabrano adekvatno operacijsko pojačalo uz fotodiode visoke osjetljivosti i minimalnog kapaciteta. Odabrano je operacijsko pojačalo OPA380 [21] i dvije sukladne fotodiode malog kapaciteta: Vishay BPV10 [22] i Hamamatsu S5971 [23]. Obje fotodiode odlikuje izrazito mali kapacitet te usko vidno polje koje omogućuje eliminaciju šumova iz okoline. Ostale karakteristike fotodioda moguće je vidjeti u tablici 2 gdje su uspoređene s Thorlabs DET36A/M fotodiodom, dok su u tablici 1 uspoređena operacijska pojačala OPA380 i TL081.

Tablica 1 Usporedba operacijskih pojačala

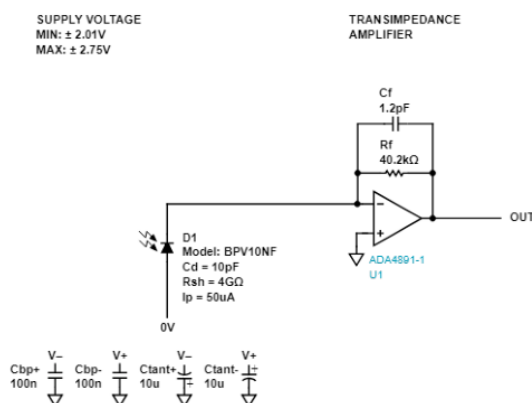
| | TL082 | OPA380 |
|---------------------|--|---|
| Vrsta napajanja | Dvostruko | jednostruko |
| Napon napajanja | od -15 do 15 V | od 0 do 5,5V |
| GPB | 3 MHz | 90 MHz |
| Napon ulaznog šuma | 18 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ za $f=1\text{kHz}$ | 67 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ za $f = 10\text{kHz}$ |
| Struja ulaznog šuma | 0,01 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ za $f = 1\text{kHz}$ | 10 fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ za $f=10\text{kHz}$ |

Tablica 2 Usporedba odabranih fotodioda s prethodno ispitanom diodom DET36A/M

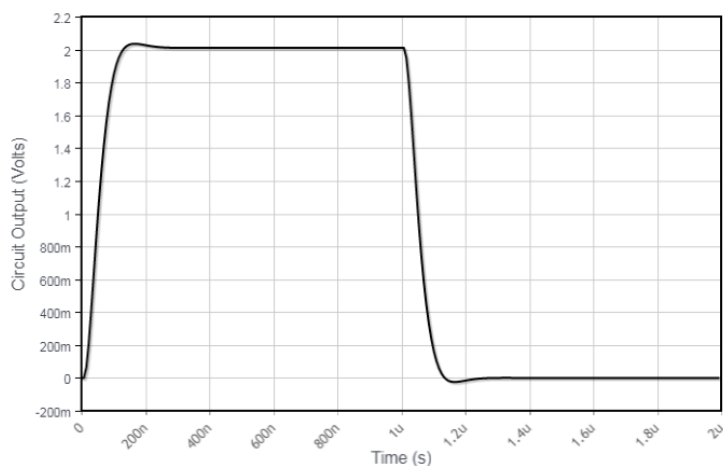
| | DET36A/M | BPV10 | S5971 |
|--|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Aktivna površina | 13 mm ² | 0,78 mm ² | 1,2 mm ² |
| Raspon valnih duljina | 350-1100 nm | 380-1100 nm | 320-1060 nm |
| Valna duljina maksimalne osjetljivosti | 970 nm | 950 nm | 900 nm |
| Najveća osjetljivost | 0,65 A/W | 0,55 A/W | 0,44 A/W |
| Kapacitet | 40 pF ($V_{BIAS} = 10V$) | 3,8 pF ($V_{BIAS} = 5V$) | 3 pF ($V_{BIAS} = 10V$) |
| Napon negativne polarizacije | 10V | 5V | 10V |

5.4. Simulacija ponašanja odabranih komponenti

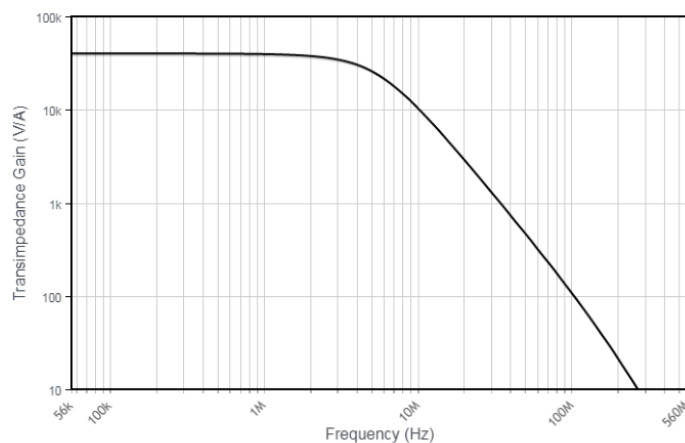
Kako bi se dodatno provjerilo ponašanje fotodioda u kombinaciji s odabranim operacijskim pojačalom moguće je sustav simulirati korištenjem „Photodiode Circuit Design Wizard“ [24] kompanije Analog Devices. Pri tome je simuliran odaziv operacijskog pojačala u kombinaciji s odabranom fotodiodom uz parametre izvora svjetla slične realnim uvjetima u laboratoriju. S obzirom da simulator ne nudi mogućnost odabira pojačala OPA380, odabrano je operacijsko pojačalo ADA4891-1 veoma sličnih karakteristika. Uz pretpostavku korištenja fotodiode BPV10 koja pri maksimalnom osvjetljenju laserske zrake odabranog lasera generira struju od oko 50 μ A, izračunate su vrijednosti otpornika i kondenzatora povratne veze, uz traženu maksimalnu ulaznu frekvenciju $f = 2$ MHz i traženu izlaznu amplitudu signala od 2 V. Shematski prikaz simuliranog pojačala moguće je vidjeti na slici 17, dok se na slikama 18 i 19 nalaze grafovi odaziva pojačala na impulsni ulazni signal, odnosno frekvencijskog odaziva operacijskog pojačala.



Slika 17 Shema simuliranog kruga operacijskog pojačala ADA4891 [24]



Slika 18 Simulirani impulsni odaziv kruga operacijskog pojačala ADA4891 [24]

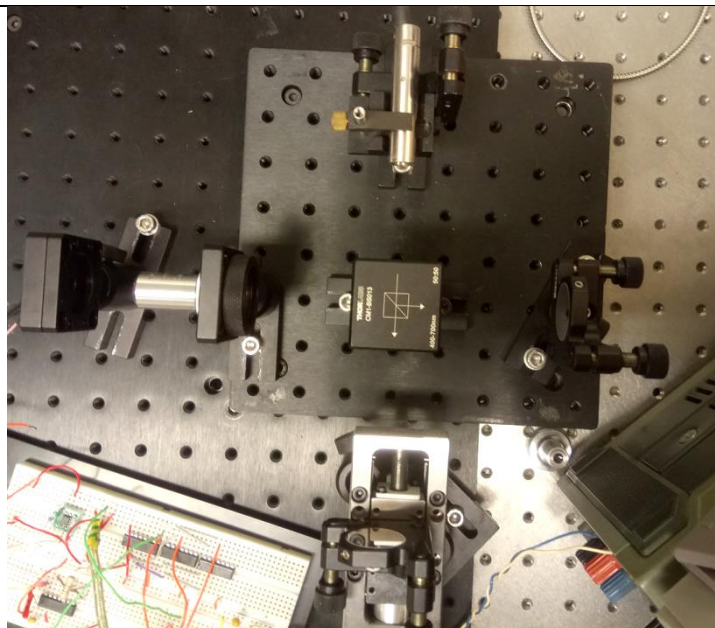


Slika 19 Simulirani frekvencijski odaziv kruga operacijskog pojačala ADA4891 [24]

Simulacijom je utvrđeno da izlazne karakteristike odgovaraju proračunatim parametrima pojačala te predstavljaju značajno poboljšanje nad odzivom pojačala TL081. Potvrđeno je da je pojačalo OPA380 odabir na kojem je moguće temeljiti daljnji razvoj.

5.5. Ispitivanje sustava fotodiode BPV10 i pojačala OPA380

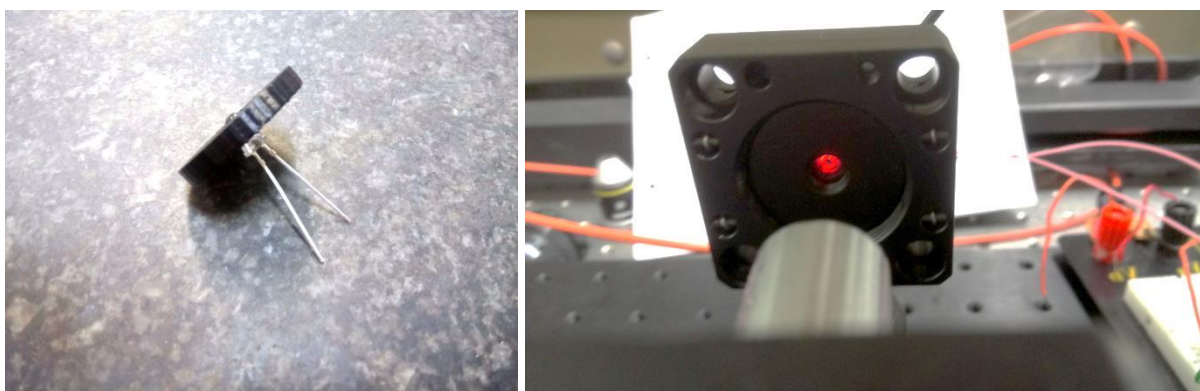
Nakon provođenja simulacije odabrane komponente su ispitane koristeći optičke i mehaničke Thorlabs komponente, koje čine dinamički interferometar. Pri tome je pomično zrcalo postavljeno na Newport CONEX-MFACC sustav za linearnu translaciju upravljani servomotorom (Slika 20). Servomotor je preko USB upravljačkog sklopa povezan na računalo s kojeg je preko programa CONEX-CC Utility moguće jednostavno zadavanje brzine i pomaka zrcala.



Slika 20 Komponente interferometra prilikom ispitivanja

Kako bi se pri testiranju uklonila mogućnost utjecaja vibracija iz okoline interferometrijski sustav je postavljen u prostoriju s odvojenim temeljima, na stol s radnom površinom koja je odvojena od poda zračnim jastucima.

Pri pripremi ispitivanja uočen je problem da u laboratoriju ne postoji adekvatan prihvat fotodiode. Za razliku od Thorlabs detekora DET36A/M koji dolazi u kućištu s prihvatom pogodnim za postavljanje na Thorlabs nosače, fotodiode su pristigle u standardnom TO18 pakiranju. Kako bi se omogućilo pozicioniranje fotodiode na Thorlabs nosače konstruiran je prihvat s konusnom rupom u koju je utisnuta fotodioda (Slika 21). Nosač je konstruiran u programskom paketu Catia, a izrađen je na 3D pisaču FFF tehnologije.



Slika 21 Nosač fotodiode Vishay BPV10

Ispitivanjem je dokazano kako je pomoću detektora Vishay BPV10 i Hamamatsu S5971 moguće pratiti pomake pomičnog zrcala do brzina od 2.5 mm/s što je maksimalna brzina kretanja korištenog sustava za linearnu translaciju. Pri toj brzini kretanja zrcala (uz

pretpostavku valne duljine laserske zrake 633 nm) frekvencija titranja interferometrijskih pruga iznosi $f = 7898,9$ Hz (vidi jednadžbu 1 iz poglavlja 3.3).

5.6. Razvoj sustava za određivanje smjera gibanja

Pomak zrcala moguće je odrediti brojanjem interferencijskih pruga, no da bi se odredio smjer pomaka zrcala potrebno pratiti još jedan parametar. Postoji više načina da se odredi smjer kretanja u određenom trenutku, ali jedan od najjednostavnijih je koristiti još jednu fotodiodu, te prateći u isto vrijeme međusoban odnos ulaznih signala s fotodioda odrediti smjer kretanja.

Neki od izazova koji se pojavljuju pri razvoju ovakvog sustava su:

- izraditi adekvatan nosač s mjestima za dvije fotodiode
- koristiti dva pojačala za pojačanje dva ulazna signala
- dizajnirati akvizicijski sustav kojim je moguće detektirati smjer i iznos pomaka

Zbog zahtjeva za korištenjem dva signala u novoj iteraciji dizajna odabrano je operacijsko pojačalo OPA2380, identičnih karakteristika kao OPA380. Razlika između ovih pojačala je što izvedba OPA2380 objedinjuje dva pojačala OPA380 unutar istog kućišta, time smanjujući broj komponenti na ispitivačkoj pločici.

Nosač fotodioda konstruiran je modificiranjem postojećeg nosača za jednu fotodiodu i također je izrađen na 3D pisaču FFF tehnologije (Slika 22).



Slika 22 CAD model nosača (lijevo) i nosač s ugrađenim fotodiodama (desno)

S obzirom na nedostatak komercijalno dostupnih rješenja za potrebe akvizicije odlučeno je krenuti u razvoj vlastitog sustava. Pri tome je odlučeno koristiti akvizicijsku karticu PCI-DAS6033 (Slika 23) dostupnu u laboratoriju Katedre za mjerenje i kontrolu. Ova kartica omogućuje praćenje vrijednosti na analognim ulazima ili prebrojavanje dolaznih

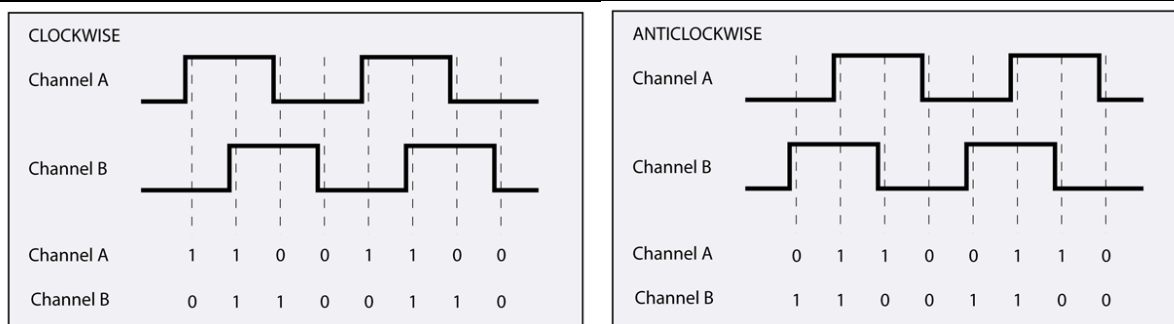
impulsa na dva integrirana 16-bitna brojila. Zbog brzine ulaznog signala kontinuirano očitavanje analognih ulaza zahtijevalo bi korištenje značajnog dijela procesorske snage. Kako ne bi ovisili o snazi računala koje obavlja ovu operaciju odlučeno je dizajnirati elektronički sklop koji će pratiti izlaze s pojačala dioda i sukladno njihovom međusobnom odnosu davati po jedan impuls na izlazu A kod prijelaza svijetle pruge u tamnu u pozitivnom smjeru te po jedan impuls na izlazu B kod prijelaza u negativnom smjeru osi linearne vodilice.

Akvizijska kartica je konfigurirana na način da prati broj impulsa na ulazima oba brojila. Na njih će biti spojeni izlazi A i B sklopa za obradu signala. Pri tome brojilo jedan prati broj impulsa u pozitivnom smjeru, a brojilo dva broj impulsa u negativnom smjeru. Njihova razlika daje podatak o trenutnoj relativna pozicija pomičnog zrcala s obzirom na poziciju početka mjerenja.



Slika 23 Akvizicijska kartica DAS6033 [25]

Prilikom gibanja pomičnog zrcala konstantnom brzinom interferencijske pruge se također gibaju konstantnom brzinom. Ukoliko se diode postave na pozicije u prostoru na kojima će fazni pomak između signala na diodi A i diodi B biti četvrtina valne duljina relativno jednostavno je moguće odrediti smjer pomaka koristeći princip rada sličan optičkom enkoderu. Na slici 24 moguće je vidjeti dva primjera signala s optičkog enkodera, u prvom slučaju (lijevo na slici) enkoder se okreće u smjeru kazaljke na satu te pri tome signal kanala A vremenski prethodi signalu kanala B. U drugom primjeru (desno na slici) smjer kretanja enkodera je suprotan kazaljki na satu te pri tome on generira signal B koji vremenski prethodi signalu A.



Slika 24 Izlazni signal iz enkodera pri različitim smjerovima kretanja [26]

Prateći logičko stanje signala A na gornjim i donjim okidnim bridovima signala B, te logičko stanje signala B na gornjim i donjim okidnim bridovima signala A moguće je odrediti smjer kretanja i broj prijeđenih okidnih bridova u svakom od smjerova. U slijedećim tablicama moguće je vidjeti detektirani smjer kretanja pri detekciji okidnog brida signala A (Tablica 3) te pri detekciji okidnog brida signala B (Tablica 4).

Tablica 3 Smjer kretanja interferencijske pruga kod detekcije okidnog brida signala A

| Okidni brid signala A | | | | |
|-----------------------|----------------|---|---|---|
| | Logičko stanje | | | |
| Signal A | 1 | 0 | 1 | 0 |
| Signal B | 0 | 1 | 1 | 0 |
| Smjer kretanja | ↑ | | ↓ | |

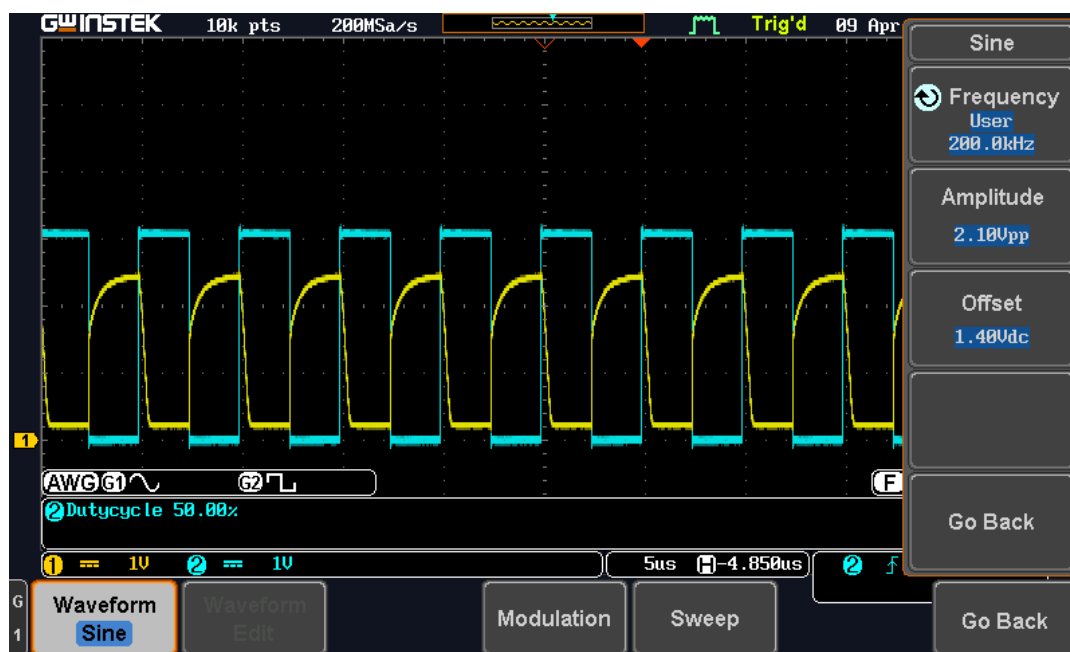
Tablica 4 Smjer kretanja interferencijske pruga kod detekcije okidnog brida signala B

| Okidni brid signala B | | | | |
|-----------------------|----------------|---|---|---|
| | Logičko stanje | | | |
| Signal A | 1 | 0 | 1 | 0 |
| Signal B | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Smjer kretanja | ↑ | | ↓ | |

5.6.1. Pretvorba analognog signala u digitalni

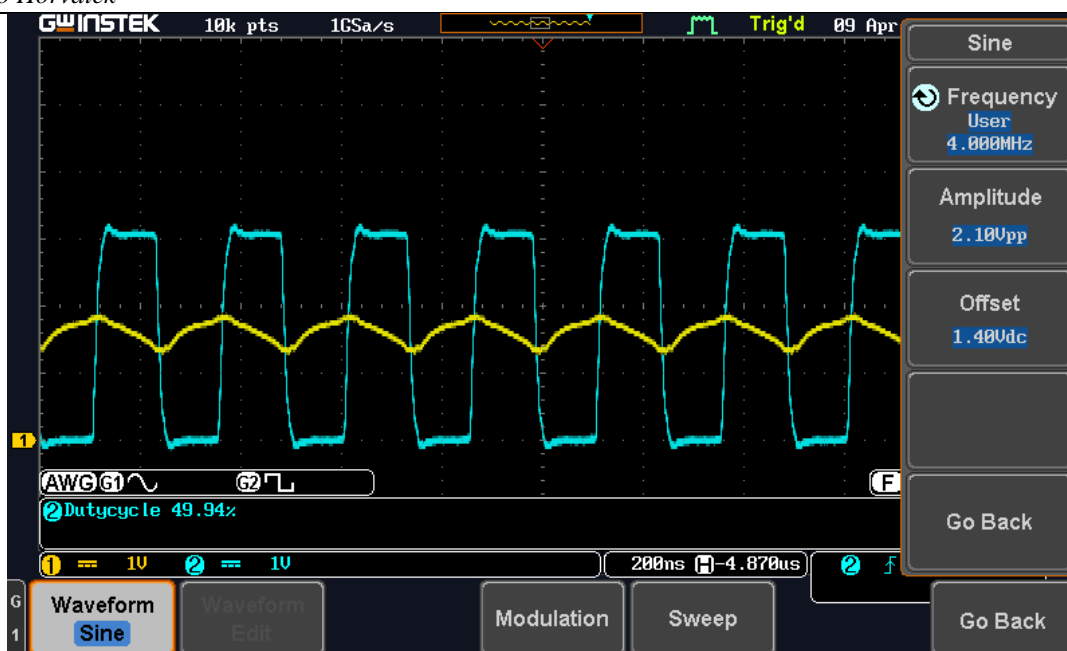
Kako bi prethodno opisanom metodom bilo moguće pratiti smjer kretanja potrebno je prvo izvršiti pretvorbu analognog signala s fotodiode u digitalni signal. Kao logičan izbor za ovu funkciju nameće se Schmittov okidni sklop [27]. Osim što pretvara analogni signal u digitalni ovaj sklop ima karakteristiku histereze, koja omogućava filtriranje malih šumova u signalu i izbjegavanje titranja izlaznog signala kod iznosa ulaznog signala bliskih pragu prelaska iz jednog logičkog stanja u drugo.

Inicijalni dizajn uključivao je Schmittov okidni sklop SN74LS14. Ubrzo je uočeno da je sklop prespor za ovu primjenu, s obzirom da je već na brzinama većim od $f = 100$ kHz dolazilo do značajne promjene oblika i smanjenja amplitude izlaznog signala. Zamjenom sklopa SN74LS14 SN74LVC2G17DBVR veće brzine riješen je problem odaziva na višim frekvencijama. Usporedba izlaznih signala s SN74LS14 (žuta boja na slici) i SN74LVC2G17DBVR (plava boja na slici) uz jednaku pobudu frekvencije 200 kiloherca vidljiva je na slici 25. Na slici je moguće uočiti da je signal s SN74LS14 suprotne polarizacije od signala sa SN74LVC2G17DBVR, što je posljedica invertera ugrađenog na izlaze integriranog kruga SN74LS14.



Slika 25 Usporedba izlaznih signala sa Schmittovih sklopova pri ulaznom sinusnom signalu frekvencije 200 kHz

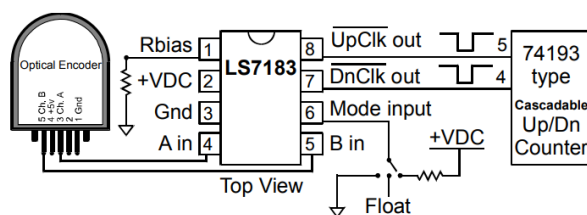
SN74LVC2G17DBVR je ispitan na pobudu sinusnim signalom do frekvencija 4MHz te je utvrđeno da daje iskoristiv izlaz pravokutnog oblika (signal plave boje na slici 26) na toj frekvenciji. S obzirom na zadovoljavajuću brzinu odaziva integriranog kruga, SN74LVC2G17DBVR će biti korišten u daljnjem razvoju kao pretvornik analognog u digitalni signal.

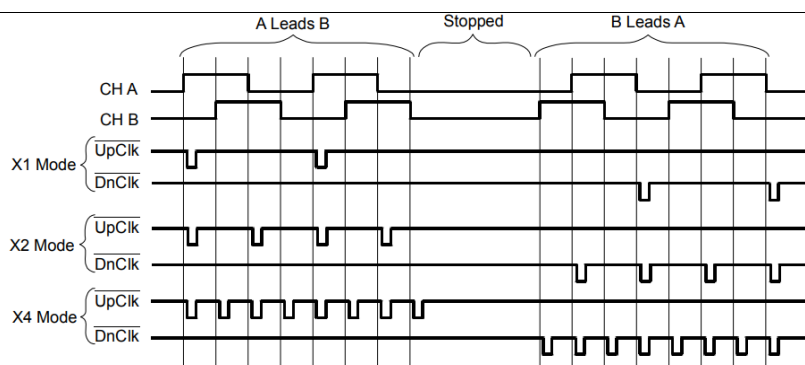


Slika 26 Usporedba izlaznih signala sa Schmittovih sklopova pri ulaznom sinusnom signalu frekvencije 4 MHz

5.6.2. Detekcija smjera i iznosa pomaka

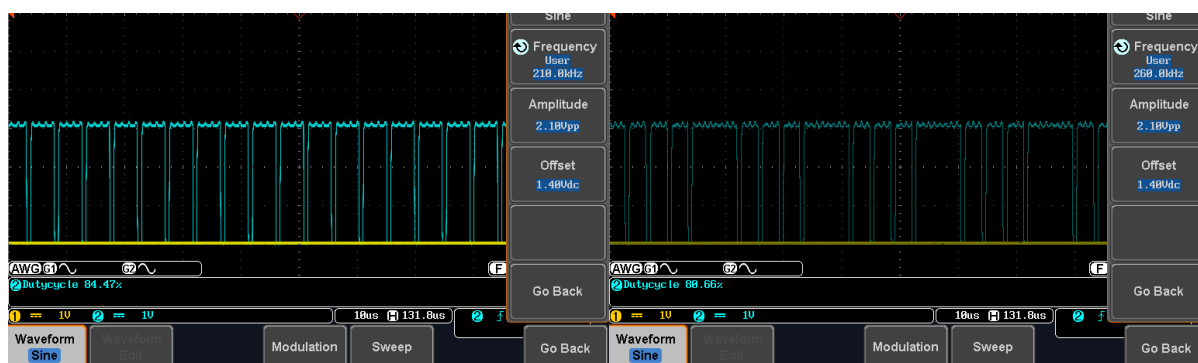
Kako bi se iz pravokutnih signala dobivenih Schmittovim sklopovima utvrdio smjer i iznos pomaka nužno je koristiti zaseban sklop za ovu namjenu [28]. Od komercijalno dostupnih rješenja moguće je koristiti sklop LS7183 dizajniran za korištenje u kombinaciji s optičkim enkoderima koji imaju vrlo sličan oblik izlaznog signala. Sklop LS7183 u sebi objedinjuje ulazni filtar i digitalne logičke sklopove koji s obzirom na odnos signala A i B prema tablicama 1 i 2 daju na jedan od dva izlaza impuls pri svakom okidnom bridu ulaznih signala. S obzirom na to u kojem se smjeru kreće pomično zrcalo, tj. koji od ulaznih signala vremenski prethodi onom drugom, sklop će davati impulse na izlaz broj jedan odnosno na izlaz broj dva. Na narednoj slici (Slika 27) vidljiv je način spajanja integriranog kruga LS7183 s ostalim komponentama kao i vremenski dijagram stanja izlaza u odnosu na ulazne signale za sva 3 načina rada.





Slika 27 Shema spajanja LS7183 i dijagram stanja za različite načine rada [29]

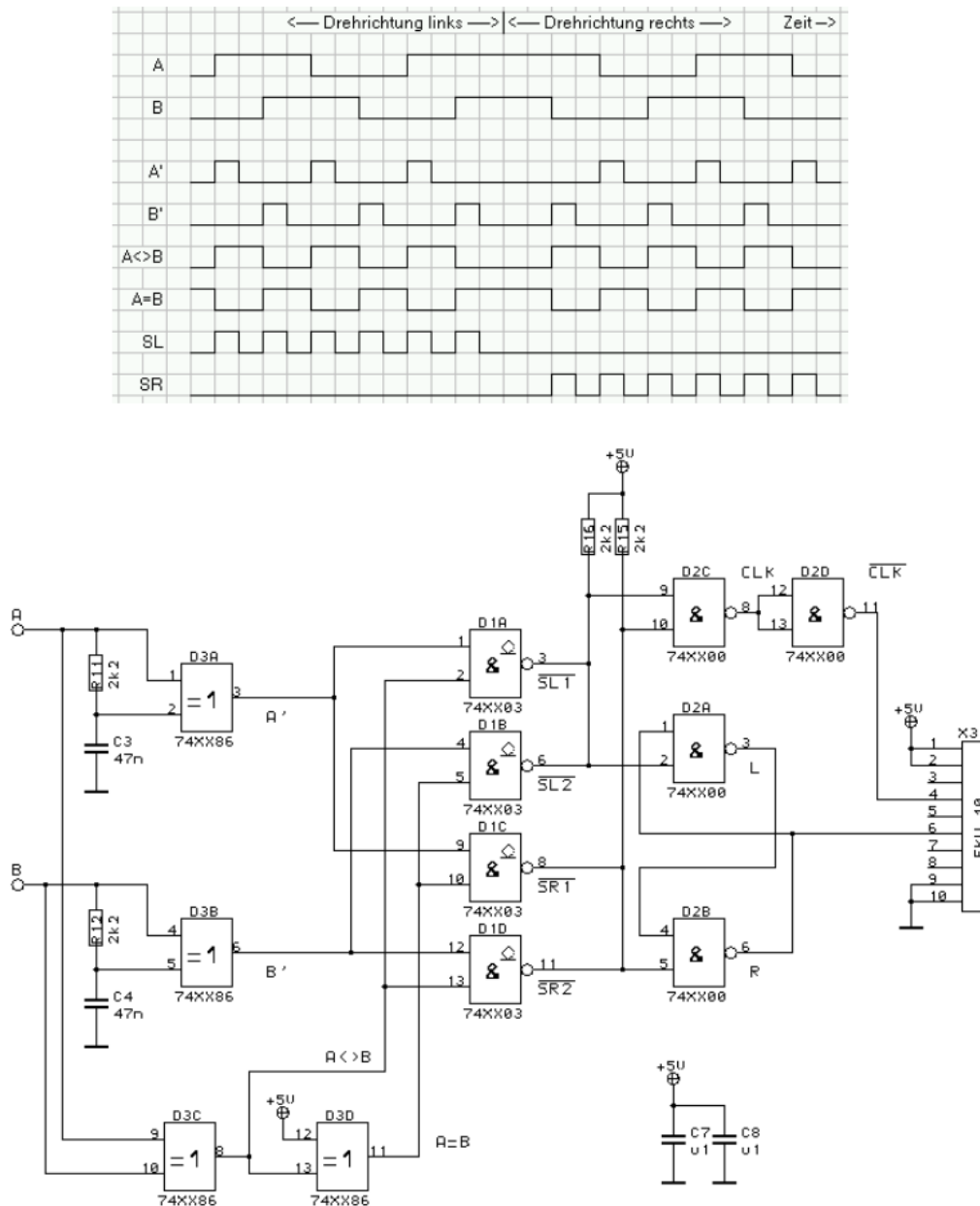
Sklop LS7183 dizajniran je za rad na brzinama do $f = 1$ MHz [29]. U laboratoriju je ispitan ovaj integrirani krug koristeći generator pravokutnog signala s dva izlaza koji su fazno pomaknuti za 90° . Ispitivanjem je utvrđena maksimalna stabilna brzina kod sva tri moda rada oko $f = 210$ kHz (Slika 28), pri tome je su korišteni otpornici $R_{bias} = 5$ k Ω i $R_{bias} = 10$ k Ω . Primjer stabilnog izlaznog signala (lijevo) i nestabilnog izlaznog signala (desno) moguće je vidjeti na slici 28.



Slika 28 Stabilan i nestabilan izlazni signal sklopa LS7183

Želja za većom modularnošću sustava, kao i ograničenje frekvencije na 210 kHz presudni su faktori za odustajanje od korištenja LS7183 u dizajnu i razvijanje specijaliziranog elektroničkog sklopa za ovu namjenu.

Koristeći literaturu [27] [28] pronađena je shema s dizajnom sklopa [30] slične namjene. Ova shema je posebno zanimljiva jer pokazuje da je pomoću svega 3 logička integrirana kruga i nekoliko pasivnih elemenata moguće napraviti sklop slične namjene. Shemu sklopa moguće je vidjeti na slici 29. Slika osim toga prikazuje digitalne veličine u određenom dijelu sklopa pri pobudi ulaza A i B kvadratnim signalima pomaknutim u fazi za 90° .

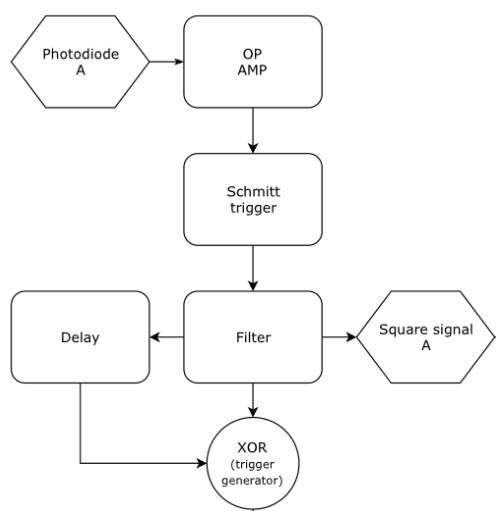


Slika 29 Shema i vremenski dijagram kruga za detekciju smjera i pomaka enkodera [30]

Ispitivanjem elektroničke sheme u laboratoriju utvrđeno je da ona radi u skladu s očekivanjem na brzinama reda veličine nekoliko kiloherca. Kako bi se iskoristila navedena shema u dizajniranju interferometrijskog sustava potrebno je riješiti dva problema. Prvi je što interferometar zahtjeva sklop veće brzine pri čemu je ovaj dizajn prespor za direktnu implementaciju. Drugi problem je što se tražene izlazne veličine razlikuju od onih prikazanih u tablicama 1 i 2. Naime, dizajn sa navedene sheme na izlazu 1 daje logičku vrijednost ovisno o smjeru kretanja, a na izlazu 2 daje impuls u trenutku kad sustav detektira prolazak jedne interferencijske pruge. Pri tome, da bi znali u kojem smjeru se kreće zrcalo i za koji iznos, potrebno je pratiti izlaz 1 kako bi se odredio smjer te broj impulsa s izlaza 2 kako bi se odredio pomak u tom smjeru.

S obzirom na velik broj promjena koje su potrebne da bi se dizajn prilagodio potrebama sustava u razvoju, odlučeno je razviti vlastiti elektronički sustav.

Početni dio dizajnirane sheme prikazan je dijagramom toka na slici 30. Ulazni signal s fotodiode prvo pojačava operacijsko pojačalo, čiji je izlaz spojen na Schmittov okidni sklop koji pretvara sinusni oblik signala s fotodiode u pravokutni signal razine napona 5 volti. Nakon Schmittovog sklopa slijedi filtar koji uklanja impulse brzine veće od 5 MHz (smetnje). Nakon filtra signal se grana. Jedan dio odlazi u logičke sklopove, a drugi ulazi u sklop za stvaranje kašnjenja te nakon toga prolazi kroz logička vrata „isključivo ILI“ koja stvaraju impulse pobude na svakom uzlaznom i silaznom okidnom bridu pravokutnog signala. Ovi impulsi kasnije se u logičkim sklopovima kombiniraju s veličinom signala s filtra kako bi se odredio smjer kretanja [27].

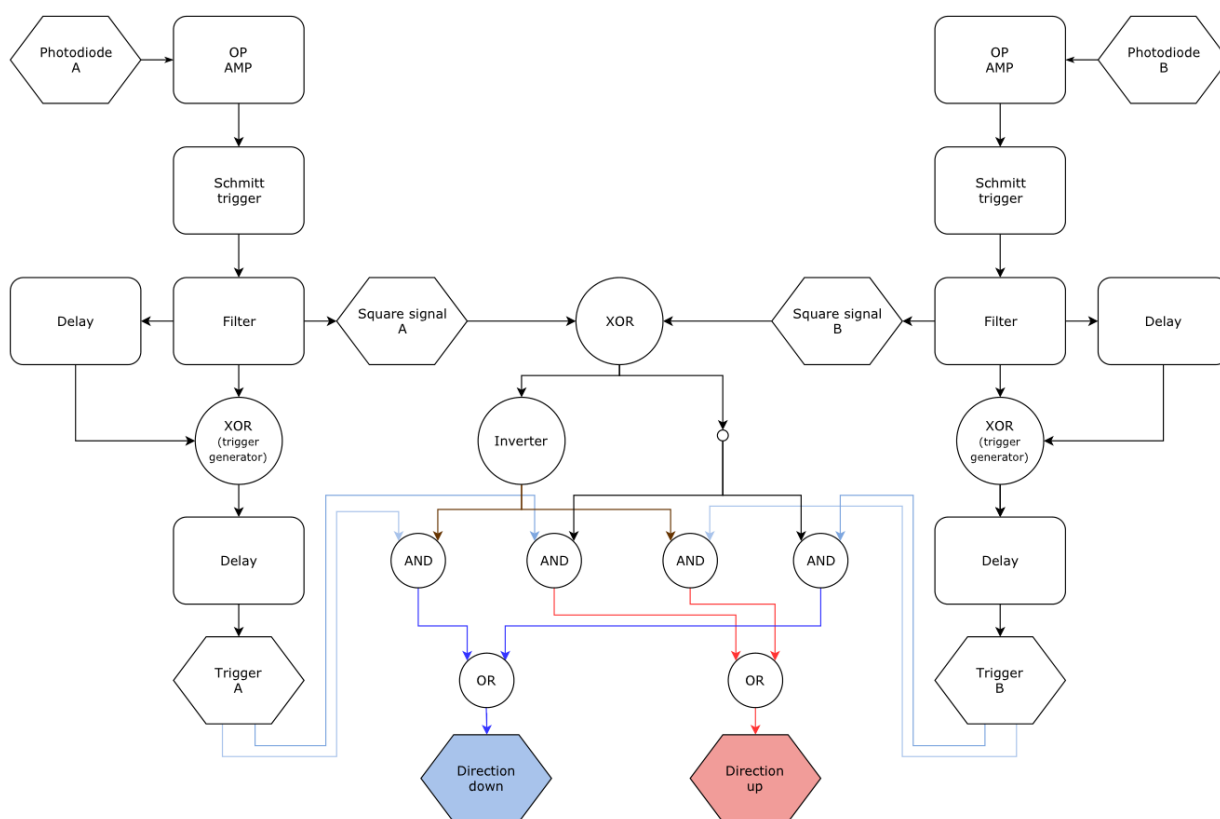


Slika 30 Početni dio dizajniranog sustava za detekciju smjera i pomaka

Kao filtar i sklop za kašnjenje u početnom dizajnu korišten je integrirani krug MC14490. Njime je moguće izvesti filtriranje smetnji, a radi na način da prati logičko stanje ulaza u 4 točke vremena udaljene za određeni vremenski interval. Ukoliko je ulaz u sve 4 točke vremena u istom stanju izlaz prelazi u logičko stanje tog iznosa ili ukoliko već je u njemu ostaje nepromijenjen. Ako je u bilo kojoj točki vremena utvrđeno drugo logičko stanje na ulazu, izlaz će ostati nepromijenjen. Ovim filtrom planirano je uklanjanje bilo kakvih smetnji frekvencije veće od maksimalne dizajnirane frekvencije kretanja sustava. Pri testiranju utvrđeno je da maksimalna frekvencija takta integriranog kruga MC14490 iznosi oko 3 megaherca. S obzirom na preporuku proizvođača da frekvencija takta bude 8 do 10 puta veća od maksimalne ulazne frekvencije signala maksimalna ulazna frekvencija ovog sklopa je

oko 300 kiloherca. To daje maksimalnu brzinu pomaka zrcala od oko 95 mm/s pri korištenju izvora svjetla valne duljine 633 nm. Pri ovom eksperimentu očekuju se manje brzine pomaka te će biti korišten integrirani krug MC14490, no pri daljnjem razvoju sustava postoji mogućnost da ovaj sklop postane prespor za dizajn, te će ga biti potrebno zamijeniti za adekvatni brži sklop.

Cjelovit dijagram toka koji prikazuje sklopove potrebne za pretvorbu signala s fotodiode u impulse prijednog puta moguće je vidjeti na slici 31.



Slika 31 Dijagram toka elektroničkih sklopova za pretvorbu sinusnog signala s fotodiode u impulse smjera

Dijagramom na slici 31 prikazan je cjelokupni tok signala, pri čemu su ulazni i izlazni signali iz nekog sklopa prikazani šesterokutima, digitalni sklopovi pravokutnicima zaobljenih rubova, a digitalni logički sklopovi prikazani su poljima u obliku krugova.

5.7. Ispitivanje prototipa dinamičkog laserskog interferometra

Ovo ispitivanje je također provedeno u prostoriji s temeljima odvojenim od ostatka zgrade, te s interferometrijskim sustavom postavljenim na radnu površinu stola odvojenu od

pona zračnim jastucima. Shema sa slike 31 postavljena je na testnoj pločici u laboratoriju, pri čemu su na ulazu korištene fotodiode BPV10.

Kako bi se postiglo osvjetljenje obje fotodiode s laserskom zrakom korišten je mikroskopski objektiv povećanja 20x, koji divergira zraku preko aktivne površine obje fotodiode (Slika 32). Kao i u prethodnom eksperimentu pomično zrcalo je pomicano konstantnim brzinama koristeći Newport sustav za linearnu translaciju duljine 25 mm.



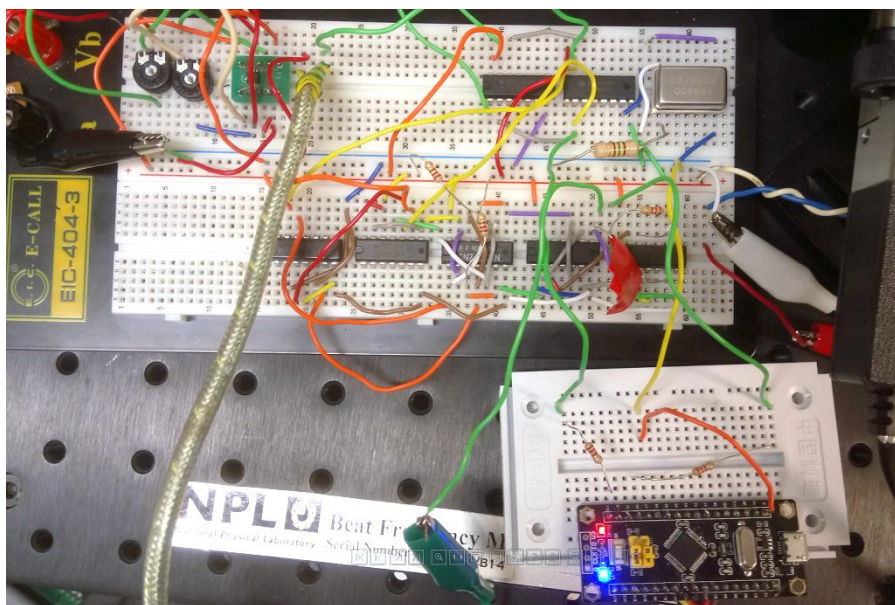
Slika 32 Interferencijske pruge na detektoru interferometra

Prije samog ispitivanja važno je podesiti pozicije fotodiode tako da njihov međusobni položaj u prostoru stvara fazni pomak 90° signala s prve fotodiode u odnosu na drugu. To je moguće učiniti zakretanjem polimernog nosača fotodiode unutar metalnog okvira nosača. Pri postavljanju fotodiode na pravilnu poziciju u prostoru bitno je usmjeriti njihovu aktivnu površinu okomito na smjer laserske zrake kako bi one proizvele maksimalnu količinu struje za određenu snagu laserske zrake. Ovaj korak je izrazito važan zbog prethodnog izbora usmjerenih fotodiode kod kojih zakret od nekoliko stupnjeva može bitno smanjiti iznos generirane struje.

S obzirom da se kao pretvornik sinusnog signala u pravokutni koristi Schmittov sklop fiksnih granica prelaska iz jednog logičkog stanja u drugo, važno je podesiti amplitude ulaznih signala na sklop tako da signali s fotodiode A i fotodiode B budu jednakih amplituda. Ovo podešavanje moguće je napraviti zaokretanjem promjenjivih otpornika spojenih na operacijsko pojačalo. Zakretanjem, tj. promjenom njihovog otpora mijenja se otpor povratne veze operacijskog pojačala koji definira razinu pojačanja te mijenja amplitudu izlaznog signala. Optimalnu veličinu amplituda moguće je eksperimentalno utvrditi na način da se pomično zrcalo giba konstantnom brzinom, a pomoću osciloskopa se promatra izlaz sa jednog od Schmittovih okidnih sklopova. Prilikom kretanja kontinuiranom brzinom sinusni signal s

fotodiode trebao bi uzrokovati na izlazu Schmittovog sklopa pravokutni signal pozitivne i negativne poluperiode jednakog vremenskog trajanja, tj. ostvarivati radni ciklus od 50% (eng. „duty cycle“). Ukoliko je trajanje pozitivne poluperiode izlaza veće od negativne potrebno je smanjiti ulaznu amplitudu, a ukoliko je trajanje negativne poluperiode veće potrebno je povećati amplitudu ulaznog signala.

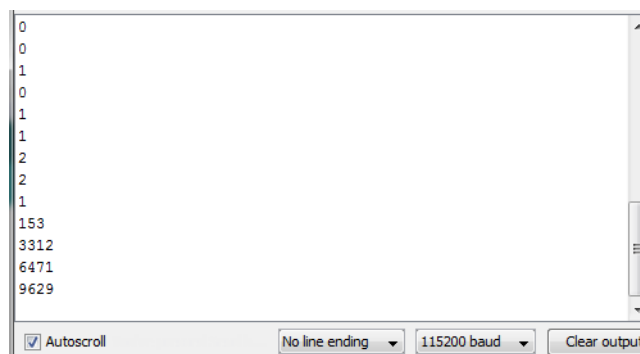
Elektroničke komponente postavljene su na ispitnu pločicu kao što je prikazano na slici 33.



Slika 33 Testiranje elektroničkih sklopova za obradu signala na testnoj pločici

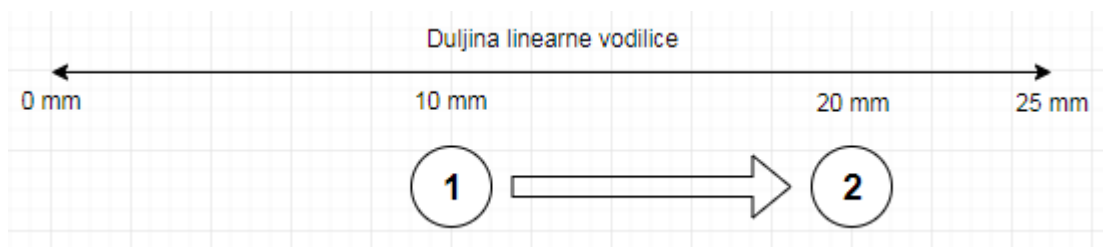
Na slici, osim integriranih krugova s digitalnim logičkim sklopovima, vidljiv je u donjem desnom uglu i programibilni mikrokontroler STM32F103. U eksperimentu je kao uređaj za brojanje impulsa korišten navedeni mikrokontroler i akvizicijska kartica DAS6033. Promatranjem rezultata postignutih jednim i drugim brojačem utvrđeno je da nema značajne razlike između rezultata postignutih pri korištenju mikrokontrolera STM32F103 i akvizicijske kartice. Razlog ispitivanja mikrokontrolera kao alternative akvizicijske kartice je što iako akvizicijska kartica DAS6033 ispunjava sve zahtjeve i jednostavna je za konfiguraciju, ima relativno visoku cijenu s obzirom na ostale komponente, a koristeći ju samo kao brojilo koristimo izrazito mali postotak njenih mogućnosti, što ju čini neisplativom za ovu primjenu. Mikrokontroler STM32F103 moguće je programirati koristeći Arduino IDE, što bitno pojednostavljuje proces izrade i testiranja programa. Korištenjem navedenog programerskog okruženja kreiran je program koji broji impulse na jednom i drugom ulazu, te u vremenskom intervalu od jednu sekundu javlja serijskom vezom računalu razliku broja impulsa pristiglih na ulazima, iz čega je jednostavno moguće odrediti trenutnu poziciju pomičnog zrcala.

Pomoću „Serial Monitor“ alata Arduino programskog okruženja (Slika 34) moguće je pratiti rezultate koji pristižu serijskom vezom. Svaki od pristiglih rezultata prikazan je u novom redu, što omogućuje jednostavno prikupljanje i daljnju obradu podataka.



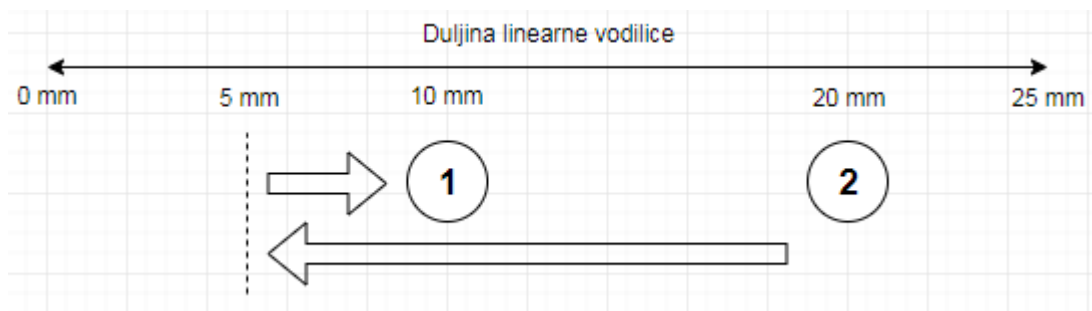
Slika 34 Razlike u vrijednostima brojila za niz vremenskih intervala

Cilj eksperimenta je utvrđivanje da li je prototipom dinamičkog interferometra moguće pratiti pomake pomičnog zrcala duž vodilice duljine 25 mm do brzine 2.5 mm/s. Pomično zrcalo je na početku ispitivanja dovedeno s početka vodilice na udaljenost 10 mm od početka vodilice te su vrijednosti brojila interferencijskih pruga poništene. Pomoću servomotora zrcalo je pomaknuto na poziciju 20 mm od početka vodilice, kao što je prikazano na slici 35 te je vrijednost razlike brojila biti zabilježena.



Slika 35 Pomak iz početne pozicije u drugu poziciju

Potom je zrcalo pomaknuto u početnu poziciju na način da je prvo dovedeno u poziciju 5 mm od početka zrcala, a tek zatim u početnu poziciju od 10 mm od početka vodilice (Slika 36).



Slika 36 Povratak iz druge u početnu poziciju

Ovakvim postupkom dovođenja u početnu poziciju eliminira se utjecaj zračnosti navojnog vretena koje pomiče zrcalo. Pri povratku u početnu poziciju vrijednost razlike brojila je zabilježena. Ispitivanje se sastoji od 10 ponavljanja.

Kako bi se osigurala ponovljivost pozicioniranja na potrebne položaje korišten je sustav Newport CONEX-MFACC, ovaj sustav sastoji se od CONEX-CC istosmjernog servomotora s kontrolerom, te čelične linearne vodilice MFA-CC. Sustav jamči dvostranu ponovljivost pozicioniranja uz tipično odstupanje od $\pm 0,15 \mu\text{m}$ te maksimalno odstupanje $\pm 0,75 \mu\text{m}$. Koristeći formulu 1 moguće je izračunati da će maksimalna greška pozicioniranja koju uzrokuje sustav CONEX-MFACC uzrokovati pomak od 2,37 interferencijskih pruga pri korištenju lasera valne duljine 633 nm.

Tablica 5 Rezultati ispitivanja ponovljivosti brojanja

| Ponavljanje | Početna pozicija | Druga pozicija | Povratak prva pozicija |
|-----------------------|------------------|----------------|------------------------|
| 1 | 0 | 31948 | 0 |
| 2 | 0 | 31947 | -1 |
| 3 | 0 | 31948 | 0 |
| 4 | 0 | 31949 | 1 |
| 5 | 0 | 31949 | 1 |
| 6 | 0 | 31947 | 2 |
| 7 | 0 | 31948 | 0 |
| 8 | 0 | 31949 | 1 |
| 9 | 0 | 31948 | -1 |
| 10 | 0 | 31948 | 0 |
| Aritmetička sredina | 0 | 31948,1 | 0,3 |
| Standardna devijacija | 0 | 0,74 | 0,95 |
| Raspon | 0 | 2,00 | 3,00 |

Tablicom 5 prikazana je očitana razlika brojača u pozicijama jedan, dva i nakon povrata u prvu poziciju. Broj interferencijskih pruga nije preračunat u duljinu puta jer je pri ispitivanju korišten laser Thorlabs HTPS-EC-1 promjenjive valne duljine čija točna valna duljina u trenutku ispitivanja nije poznata.

6. RASPRAVA

Rezultati ispitivanja pokazuju da postoji određeno rasipanje rezultata mjerenja na pozicijama dva i pri povratku na poziciju jedan. S obzirom da niti jedno ponavljanje ispitivanja nije ukazalo na značajno veće odstupanje od ostalih moguće je zaključiti da je rasipanje posljedica neponovljivog pozicioniranja klizača linearne vodilice te zračnosti i fleksibilnosti sustava. Kako bi se sa sigurnošću utvrdio razlog rasipanja predlaže se ispitivanje pri kojem se pozicija pomičnog zrcala pratili drugim sustavom laserskog interferometra veće točnosti. S obzirom na maksimalno odstupanje točnosti pozicioniranja klizača linearne vodilice $\pm 0,75 \mu\text{m}$, moguće je zaključiti da rasipanje rezultata ispitivanja ulazi unutar tolerancija pozicioniranja klizača vodilice te je moguće potvrditi da sustav za brojanje interferencijskih pruga radi ispravno za pomake do 15 mm udaljenosti pri pomicanju pomičnog zrcala brzinom do 2,5 mm/s.

Ispitivanjem ponovljivosti brojača prijeđenih interferencijskih pruga zaokružen je razvoj prototipa laserskog dinamičkog interferometra. Na početku istraživanja definirane su mehaničke i većina optičkih komponenti sustava, a kasnije su istraživanjem, simuliranjem i nizom ispitivanja pronađene optičke i elektroničke komponente potrebne za izradu funkcionalnog laserskog interferometra.

Pozitivnim rezultatom ispitivanja brojača interferencijskih pruga moguće je zaključiti da je uspješno razvijen prototip modularnog sustava dinamičkog laserskog interferometra. Ovaj rezultat otvara vrata daljnjem razvoju sustava, pri čemu je moguće ukazati na nekoliko potencijalnih smjerova ispitivanja i razvoja.

Kao prvi nameće se povezivanje broja pruga interferometra s mjernom jedinicom metra. Kako bi se to omogućilo potrebno je kao izvor svjetla interferometra koristiti laserski izvor poznate valne duljine, uz praćenje uvjeta okoliša kako bi se odredio indeks loma zraka. U ovom radu nisu se pratili okolišni uvjeti te nije poznavana točna valna duljina laserskog izvora. Iako su ova dva preduvjeta osnovna za mjerenje bilo kojim laserskim interferometrom, pri ispitivanju funkcionalnosti prototipa oni nemaju značajnu ulogu. Za ispitivanje funkcionalnosti prototipa važna je stabilnost laserskog izvora na određenoj frekvenciji, kako ne bi došlo do pomaka u interferometrijskim prugama zbog promjene frekvencije, tj. valne duljine izvora. Uz uvjet stabilnosti frekvencije sam iznos valne duljine nema potrebe poznavati, iz razloga što ovim radom nisu provedena mjerenja prototipom interferometra, već

je ispitivana njegova funkcionalnost i ponovljivost. Iz istog razloga nije bilo potrebe uzeti u obzir indeks loma zraka. Kako bi bilo moguće koristiti dinamički interferometar za mjerenje pomaka, nužno je odrediti točnu valnu duljinu korištene laserske zrake, te pratiti okolišne uvjete kako bi se odredio indeks loma zraka kroz koji laserska zraka putuje.

Drugi smjer istraživanja je razvoj sustava za pomoć pri inicijalnom podešavanju uređaja. U toku ispitivanja, razina amplitude signala s operacijskog pojačala podešavana je promjenom udaljenosti fotodioda od divergentne leće, te promjenom otpora povratne veze operacijskog pojačala. S obzirom da je pri podešavanju amplitude bitno zadržati razliku u fazi od 90° između signala s fotodioda, inicijalno podešavanje sustava je postupak koji zahtjeva preciznost i strpljenje ispitivača. Takav postupak nije intuitivan i ne može ga provesti korisnik koji nije upoznat s načinom radom prototipa interferometra. Kako bi se pojednostavio postupak i omogućilo inicijalno podešavanje sustava od strane bilo kojeg istraživača predlaže se stvaranje smjernica za inicijalno podešavanje interferometra uz automatizaciju djela procesa. Imajući na umu da u ovom sustavu korišteni mikrokontroler STM32F103 ima velik broj analognih i digitalnih ulaza, moguće je upotrijebiti ga kao uređaj za mjerenje radnog ciklusa (eng. „duty cycle“) pravokutnog signala, koji prateći ulazni signal automatizirano podešava pojačanje operacijskih pojačala kako bi ulazni signal u Schmittov sklop uvijek bio optimalne amplitude. Uz to prateći pojačanje i snagu ulaznih signala mikrokontroler može sugerirati potrebne slijedeće korake pri podešavanju sustava.

S obzirom na karakteristike odabranih komponenti ovaj prototip dinamičkog interferometra ima potencijal za mjerenje višestruko većih pomaka od onih koji su ispitani u ovom radu. Svakako bi bilo korisno ispitati sustav na pomacima većih iznosa kako bi se potencijalno omogućilo ispitivanje udaljenosti od nekoliko metara ovim sustavom. Time bi se omogućilo na primjer umjeravanje mjernih letvi duljine nekoliko metara. Osim većih pomaka, ovaj sustav trebao bi omogućiti korištenje brzina višestruko većih od brzine 2,5 mm/s na kojoj je provedeno ispitivanje. Ova brzina korištena je zbog ograničenja brzine sustava za linearnu translaciju na 2.5 mm/s. S obzirom na komponente sustava koje su dizajnirane za korištenje na većim brzinama, otvara se mogućnost ispitivanja rada sustava na većim vodilicama s većim brzinama pomaka.

7. ZAKLJUČAK

U sklopu ovog rada odabrane su komponente za izradu modularnog sustava dinamičkog interferometra. Prilikom procesa odabira elektroničkih i optomehaničkih komponenti svaka od njih je ispitana zasebno ili ukoliko je za to postojala potreba u obliku sklopa s odgovarajućim komponentama.

S obzirom na nedostatak komercijalno dostupnih elektroničkih sklopova specijaliziranih za ovu namjenu razvijen je sustav za pretvaranje analognog u digitalni te potom u impulsni signal koji označava smjer i pomak interferencijskih pruga. Koristeći ovakav pretvornik moguće je jednostavno akvizicijskom karticom ili mikrokontrolerom pratiti smjer i pomak pomičnog zrcala interferometra.

Kako bi se ispitale karakteristike sustava, provedeno je ispitivanje ponovljivosti prototipa modularnog dinamičkog interferometra. Rasipanje ostvarenih rezultata nalazi se unutar granica točnosti pozicioniranja sustava za linearnu translaciju Newport CONEX-MFACC, čime se utvrdio ponovljiv rad sustava modularnog interferometra pri brzinama od 2.5 mm/s i pomacima iznosa do 15 mm. S obzirom na karakteristike odabranih komponenti, sustav je moguće koristiti na većim brzinama od ispitanih; pretpostavlja se da maksimalna moguća brzina sustava iznosi 500 mm/s pri pomacima iznosa do jednog metara.

8. LITERATURA

- [1] A Ryer, V Light: Light measurement handbook, 1997.
- [2] Bunch, Bryan H; Hellemans, Alexander: The History of Science and Technology. Houghton Mifflin Harcourt, 2004.
- [3] Petar Bulat, Nadogradnja jednoosnog mjernog uređaja laserskim interferometrom [Diplomski rad], Zagreb, 2017.
- [4] Dobosz, M., & Kożuchowski, M., Overview of the laser-wavelength measurement methods, Warsaw, 1998.
- [5] Marko Katić, Razvoj sustava za interferencijsko umjeravanje etalona duljine metodom faznih pomaka [doktorski rad], Zagreb, 2013.
- [6] <https://www.muelaner.com/laser-interferometers/> (20.4.2019)
- [7] Zvonimir Petković, Praktična realizacija definicije metra, Zagreb, 2013.
- [8] D. Malacara, M. Servín, Z. Malacara, Interferogram Analysis for Optical Testing, 2005.
- [9] <https://www4.uwsp.edu/physastr/kmenning/Phys385/Lect20.html>, University of Wisconsin - Stevens Point (20.4.2019.)
- [10] Alberto Grbac, Izrada interferencijskog sustava za umjeravanje valne duljine lasera [diplomski rad], Zagreb, 2018.
- [11] Lewis, Andrew J: Absolute length measurement using multiple-wavelength phasestepping interferometry, Imperial College, London, 1994.
- [12] Kenneth G. Libbrecht and Eric D. Black, A Laser Interferometer for the Undergraduate Teaching Laboratory Demonstrating Picometer Sensitivity, California, 2014.
- [13] George Birnbaum, Frequency Stabilization of Gas Lasers, 1967.
- [14] HTPS, HTPS-EC Tunable HeNe Laser Systems Operating Manual, Thorlab, Inc.
- [15] <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=KM100> (20.4.2019.)
- [16] Filip Tavernier, Michiel Steyaert, High-Speed Optical Receivers with Integrated Photodiode in Nanoscale CMOS, Heverlee, 2011.
- [17] https://pe2bz.philpem.me.uk/Lights/-%20Laser/Info-999-LaserCourse/C04-M08-OpticalDetectors/mod04_08.htm (20.4.2019.)
- [18] DET36A(/M) Si Biased Detector User Guide, Thorlabs, Rev F, June 30, 2017.
- [19] L. Riobó, F. E. Veiras, P. Sorichetti, Wideband Transimpedance Amplifiers for Optoelectronics: Applications to Dynamic Interferometry, Buenos Aires, 2017.
- [20] Xavier Ramus, Transimpedance Considerations for High-Speed Amplifiers, Texas Instruments Application Report, 2009.
- [21] Precision, High-Speed Transimpedance Amplifier OPA380 OPA2380, Texas Instruments, SBOS291G, 2007.
- [22] Vishay BPV10 datasheet, Revision 08-Feb-17, 2017.
- [23] Hamamatsu high-speed photodiodes S5971 S5972 S5973 series datasheet, 2015.
- [24] <https://www.analog.com/designtools/en/photodiode/> (20.4.2019.)
- [25] PCI-DAS6031 and PCI-DAS6033 User's Guide, Measurement Computing, Revision 7A, 2012.

- [26] <http://www.creative-robotics.com/quadrature-intro> (20.4.2019.)
- [27] E. R. Peck, S. W. Obetz, Length Measurement by Reversible Fringe Counting, Illinois, 1953.
- [28] J. Diz-Bugarin, I. Outuuro-González, J. B. Vázquez-Dorrío, J. L. Valencia-Álvarez, J. Blanco-García, Design of a New Microcontroller-Based Vernier Fringe Counter for Interferometric Measurement of Laser Wavelength, 2016.
- [29] LS7183 / LS7184 Data Sheet, US DIGITAL, Rev. 07.12.06, 2006.
- [30] <https://www.elektrik-trick.de/sminterf.htm>, (20.4.2019.)

SAŽETAK

Autor: Marko Horvatek

Naslov rada: Razvoj modularnog laserskog interferometra za mjerenje pomaka

Laserski interferometar od svoje pojave pa do danas zauzeo je i održao poziciju kao jedan od osnovnih uređaja u dimenzionalnom mjeriteljstvu. Ovim sustavom moguće je mjeriti velik broj različitih dimenzionalnih veličina kao što su duljina, pravocrtnost i mali kutovi, a njegova velika fleksibilnost omogućuje jednostavno prilagođavanje mjerenju mnogih drugih dimenzionalnih značajki predmeta mjerenja. Prilikom znanstveno-istraživačkog rada često se javlja potreba da se sustav prilagodi pojedinom mjernom zadatku poput mjerenja vrlo malih pomaka visokom rezolucijom i malom brzinom, ili mjerenje velikih pomaka s nižom rezolucijom. S obzirom na nedostatak komercijalno dostupnih laserskih interferometra s dovoljnom otvorenosću sustava i fleksibilnošću podešavanja, pojavila se potreba za razvijanjem vlastitog sustava prema potrebama Laboratorija za precizna mjerenja dužina, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

U ovom radu, odabrani su elektronički sklopovi i optomehaničke komponente za izradu modularnog sustava dinamičkog interferometra. Pritom je mehanički model interferometra dizajniran korištenjem Thorlabs komponenti, a s obzirom na nedostatak komercijalno dostupnih elektroničkih sustava specijaliziranih za procesiranje izlaznog signala s fotodioda razvijen je modularni sustav za obradu signala. Razvoj je započet proračunom potrebnih karakteristika pojačala i fotodiode. Korištenjem simulacija određene su optimalne komponente sustava, a eksperimentalno je ispitana međusobna kompatibilnost odabranih komponenti. Eksperimentalni dio je započet ispitivanjem pojedinačnih komponenti, njihovom integracijom u jedinstveni sustav za obradu signala te konačno integracijom tog sustava u laserski dinamički interferometar.

Razvijeni sustav ima mogućnost detektiranja smjera i iznosa pomaka, s utvrđenom ponovljivošću brojanja interferencijskih pruga na razini jedne valne duljine (≈ 600 nm). S obzirom na ograničenja korištenog sustava za zadavanje pomaka, može se očekivati da je apsolutna točnost razvijenog sustava i bolja od navedene, što će biti utvrđeno u daljnjem istraživanju.

Ključne riječi: laserski interferometar, mjerenje pomaka, interferencijske pruge, detekcija interferencijskih pruga, obrada signala.

SUMMARY

Author: Marko Horvatek
Title: Development of a modular laser displacement interferometer

From the time of its invention to this day, laser interferometer is one of the crucial instruments in dimensional metrology. Given its great configuration flexibility, this device makes it possible to measure a wide variety of dimensional features such as length, straightness and small angles, as well as a lot of other dimensional features. Through scientific research there is a common need for adjustment of measuring systems to the specific requirements of the task, such as measurement of small displacements with great precision or measurement of large displacements with lower precision. With no commercial open-source systems available, there was a need to develop a laser interferometer system which could meet the requirements Laboratory for precise measurement of length at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture.

During this research, electronic and optomechanical components for modular interferometer system were chosen. Mechanical setup was designed using Thorlabs components, but with no available commercial systems specialized for processing interference signals, the system for this purpose had to be developed from scratch. Development started with calculation of needed characteristics for operational amplifier and photodiode. Using simulations, optimal components for the system were selected and during laboratory experiments parts were tested individually, assembled in electronic circuits and finally in assembled version of the laser interferometer prototype.

Developed prototype has the ability to detect the direction and amount of displacement. Its repeatability was found to be within a single wavelength (≈ 600 nm). Considering limitations of linear displacement system that was used, expected absolute accuracy of the prototype is better than stated, which will be determined in future research.

Key words: laser interferometer, displacement measurement, interferometer fringes, fringe detection, signal processing.