VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

KOMPIUTERIJOS IR RYŠIŲ TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Žygimantas Mikulis

LAZERINIO ATSTUMO MATUOKLIO PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS
DESIGN AND REASERCH OF LASER RANGEFINDER

Baigiamasis magistro darbas

Kompiuterių inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX051

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2021

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTAS

KOMPIUTERIJOS IR RYŠIŲ TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Žygimantas Mikulis

LAZERINIO ATSTUMO MATUOKLIO PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS
DESIGN AND RESEARCH OF A LASER RANGEFINDER

Baigiamasis magistro darbas

Kompiuterių inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX051

Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

Vadovas doc. dr. Nerijus Paulauskas
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Konsultantas dr. Anželika Gaidienė
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Vilnius, 2021

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
KOMPIUTERIJOS IR RYŠIŲ TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

Kompiuterių inžinerijos studijų programa

Kompiuterių technologijų specializacija

TVIRTINU
Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedros vedėjas
prof. Algirdas Baškys _____
20 m. mėn. d.

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS
2019-10-14

Studentui (ei) **Žygimantas Mikulis**
(vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema:

Lazerinio atstumo matuoklio projektavimas ir tyrimas
(lietuvių kalba)

Design and Research of a Laser Rangefinder
(anglų kalba)

Patvirtinta 20 _____ m. _____ mėn. _____ d. dekano įsakymu Nr. _____

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2021 m. birželio mėn. 01 d.

Darbo tikslas: suprojektuoti lazerinį atstumo matuoklį ir ištirti veiksnius, lemiančius matavimo tikslumą.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Analitinė dalis:

1. Lazerinių atstumo matuoklių realizavimo metodų analizė.

Praktinė dalis:

1. Matuoklio struktūrinės schemos sudarymas;
2. Siųstuvo ir imtuvo komponentų parinkimas, jų charakteristikų analizė;
3. Siųstuvo ir imtuvo principinių elektrinių schemų sudarymas;
4. Spausdintinės plokštės projektavimas;
5. Programos mikrovaldikliui sudarymas.

Eksperimentinė dalis:

1. Elektrinių charakteristikų (signalo formų analizė);
2. Šviesos pluošto analizė;
3. Matuojamo atstumo įtakos matavimo tikslumui tyrimas;
4. Matuojamo paviršiaus (spalvos, medžiagos, paviršiaus struktūros) įtakos matavimo tikslumui tyrimas.

Pagrindiniai techniniai reikalavimai:

1. Matuojamas atstumas nuo 10 cm iki 15 m;
2. Matavimo tikslumas ±2cm.

Rašto dalis:

Išanalizuoti ir aprašyti gautus tyrimo rezultatus.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai: _____

dr. Anželika Gaidienė

(vardas, pavardė, mokslinis laipsnis ir vardas)

Vadovas: _____ **Doc. dr. Nerijus Paulauskas**

(parašas) (vardas, pavardė, mokslinis laipsnis ir vardas)

Užduotį gavau: _____ _____

(studento parašas) (data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Elektronikos fakultetas
Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedra

ISBN ISSN
Egz. sk. .....
Data .....-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Kompiuterių inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas	**Lazerinio atstumo matuoklio projektavimas ir tyrimas**
Autorius	**Žygimantas Mikulis**
Vadovas	**Nerijus Paulauskas**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe projektuojamas ir tiriamas lazerinis atstumo matuoklis. Analitinėje dalyje apžvelgiami ir išanalizuojami lazerinių atstumo matuoklių realizavimo metodai. Projektinėje dalyje atliekamas esminių matuoklio komponentų pasirinkimas ir jų charakteristikų vertinimas. Suprojektuojama elektros principinė schema. Suprojektuojama matuoklio spausdintinė plokštė. Parašoma matuoklio mikrovaldiklio programa. Eksperimentinėje dalyje atliekami imtuvo, siųstuvo elektrinių impulsų tyrimai. Atliekama siųstuvo generuojamo šviesos pluošto analizė. Išanalizuojama matavimo paklaidos ir standartinio nuokrypio priklausomybė nuo matuojamo atstumo. Atliekamas tyrimas siekiant nustatyti matuojamo objekto paviršiaus spalvos ir medžiagos paviršiaus įtakos matavimo rezultatams. Išvadose ir pasiūlymuose aptariami gauti rezultatai ir pateikiami siūlymai.

Darbo apimtis – 58 p. teksto be priedų, 57 iliustr., 1 lent., 25 bibliografiniai šaltiniai.

Prasminiai žodžiai: nepertraukiama banga, fazė, frontas, skiriamoji geba, griūtinis efektas, divergensija, pluoštas, matuoklis, sklidimo laikas, šviesos greitis

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Electronics
Department of Computer Science and Communications Technologies

ISBN ISSN
Copies No. .....
Date .....-.....-.....

Master Degree Studies **Computer Engineering** study programme Master Graduation Thesis

Title	**Design and Research of a Laser Rengefinder**
Author	**Žygimantas Mikulis**
Academic supervisor	**Nerijus Paulauskas**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

In the final master's thesis, a laser distance meter is designed and researched. In the analytical part, the methods of realization of laser distance meters are reviewed and analyzed. In the design part, the selection of the essential components of the meter and the evaluation of their characteristics are performed. An electrical schematic diagram is designed. A distance meter printed circuit board is being designed. The distance meter microcontroller program is written. In the experimental part, the electrical impulses of the receiver and transmitter are investigated. The analysis of the light beam generated by the transmitter is performed. The dependence of the measurement error and the standard deviation on the measured distance is analyzed. A study is performed to determine the influence of the color of the surface of the measured object and the surface of the material on the measurement results. The conclusions and made and proposals are given. Thesis consist of: 58 p. text without appendixes, 57 pictures, 1 tables, 25 bibliographical entries.

Keywords: continuous wave, phase, front, resolution, avalanche effect, divergence, beam, meter, propagation time, light speed

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo organizavimo tvarkos aprašo
2 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Žygimantas Mikulis, 20170240
(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)
Elektronikos fakultetas
(Fakultetas)
Kompiuterių inžinerija, KTfm-19
(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2021 m. gegužės 30 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Lazerinio atstumo matuoklio projektavimas ir tyrimas“ patvirtintas 2019 m. lapkričio 18 d. dekano potvarkiu Nr. 236el, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: daktaras Anželika Gaidienė. Mano darbo vadovas docentas daktaras Nerijus Paulauskas.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

(Parašas) Žygimantas Mikulis
(Vardas ir pavardė)

Turinys

ĮVADAS 13
1. LAZERINIAM ATSTUMO MATAVIMUI TAIKOMI METODAI 14
1.1. Tiesioginis šviesos sklidimo trukmės matavimas 15
1.1.1. Impulsinis metodas 15
1.2. Netiesioginis šviesos sklidimo trukmės matavimas 17
1.2.1. Nuolatinės bangos moduliuojamos amplitudės AMCW metodas 17
1.2.2. Nuolatinės bangos moduliuojamo dažnio FMCW metodas 20
1.3. Geometriniai metodai 24
1.3.1. Pasyvi trianguliacija 24
1.3.2. Aktyvi trianguliacija 25
1.4. Šviesos sklidimo trukmės matavimas naudojant TDC 28
1.4.1. Impulsinio TOF matavimo paklaidos šaltiniai 29
2. Matuoklio struktūrinė schema 32
3. Siųstuvo ir imtuvo komponentų parinkimas, jų charakteristikų analizė 33
3.1. Siųstuvas 33
3.2. Imtuvas 36
3.3. Optinių elementų pasirinkimas 39
4. ĮRENGINIO PRINCIPINĖS ELEKTRINĖS SCHEMOS SUDARYMAS 41
5. SPAUSDINTINĖS PLOKŠTĖS PROJEKTAVIMAS 50
6. PROGRAMOS MIKROVALDIKLIUI SUDARYMAS 52
7. EKSPERIMENTINĖ DALIS 53
7.1. Matavimo prietaisai 53
7.1.1. Oscilografas 53
7.1.2. Oscilografo zondas 53
7.1.3. Vizualizatorius 53
7.1.4. Optinis detektorius 54
7.2. Siųstuvo tyrimas 54
7.2.1. Siųstuvo elektrinio impulso charakteristikų tyrimas 54
7.2.2. Optinio impulso tyrimas 56
7.3. Imtuvo tyrimas 57
7.4. Šviesos pluošto tyrimas 58

7.5. Atstumo matavimo tyrimai 60
APIBENDRINIMAS IR IŠVADOS.....69
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....71

SANTRUMPOS

AMCW (angl. *Amplitude modulated continous wave*)	amplitude moduliuota nepertraukiama banga
ADC (angl. *Analogue to digital converter*)	analoginis skaitmeninis keitiklis
FMCW (angl. *Frequancy modulated continous wave*)	dažniu moduliuota nepertraukiama banga
I2C (angl. *Inter-Integrated Circuit*)	integruota grandinė
LCD (angl. *Liquid Crystal Display*)	skystųjų kristalų ekranas
PWM (angl. *Pulse Width Modulation*)	impulsų pločio moduliacija
SPI (angl. *Serial Peripheral interface*)	nuosekli periferinė sąsaja
SWD (angl. *Serial Wire Debug*)	nuoseklus laidinis klaidų ieškojimas
TOF (angl. *Time of Flight*)	sklidimo trukmė
TDC (angl. *Time to digital converter*)	laiko į skaitmeną keitiklis
TTL (angl. *Transistor Transistor Logic*)	loginis tranzistorinis-tranzistorinis grandymas

PAVEIKSLĖLIŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Optiniai atstumo matavimo metodai 14
1.2 pav. Sklidimo trukmės matavimas 15
1.3 pav. Moduliuotos amplitudės matavimas 17
1.4 pav. AMCW matuoklio supaprastinta blokinė diagrama 18
1.5 pav. AMCW moduliacijos principas 18
1.6 pav. AMCW moduliuoto signalo forma 19
1.7 pav. Sinusinių signalų fazės poslinkis 19
1.8 pav. FMCW veikimo schema 20
1.9 pav. FMCW matuoklio blokinė schema 21
1.10 pav. Pjūklo formos moduliacija 22
1.11 pav. Trikampio formos moduliacija 22
1.12 pav. Trikampio formos moduliacija su „beat“ dažniu 23
1.13 pav. Pjūklo formos moduliacija, kai dažnis kinta netiesiškai 24
1.14 pav. Pasyvios trianguliacijos principas 25
1.15 pav. Aktyvios trianguliacijos principas 26
1.16 pav. Trianguliacija 27
1.17 pav. Impulsinio matuoklio blokinė schema 29
1.18 pav. Analoginio signalo triukšmo įtaka laiko matavimui 31
1.19 pav. Laiko eigos paklaida 31
2.1 pav. Atstumo matuoklio blokinė schema 32
3.1 pav. Tranzistoriaus valdiklio vidinės sandaros schema 34
3.2 pav. Impulso trumpinimo laikinė diagrama 35
3.3 pav. APD multiplikacijos kreivė 37
3.4 pav. MAX40659 supaprastinta sandaros schema 38
3.5 pav. Lazerio šviesos kolimavimo lęšis 39
3.6 pav. Imtuvo fokusavimo lęšis 40
3.7 pav. Optinio filtro pralaidumo juosta 40
4.1 pav. STM32F411RCT6 mikrovaldiklio schema 41
4.2 pav. IC1 mikrovaldiklio maitinimo prijungimai 42
4.3 pav. Įtampos keitiklių schemos 42
4.4 pav. Impulsinis įtampos keitiklis 43
4.5 pav. Buferinis stiprintuvas 44

4.6 pav. „ST-link“ programavimo jungtis....44
4.7 pav. Mygtukų prijungimo schemos....45
4.8 pav. USB sąsajos schema....45
4.9 pav. Lazerinio matuoklio siųstuvo schema....47
4.10 pav. Lazerinio diodo impulso detektorius....48
4.11 pav. Lazerinio impulso imtuvas....48
4.12 pav. Laikmačio schema....49
5.1 pav. Spausdintinės plokštės siųstuvo dalis....50
5.2 pav. Pagamintas lazerinis atstumo matuoklis....51
6.1 pav. Lazerinio atstumo matuoklio programos blokinė schema....52
7.1 pav. SPL PL90_3 lazerinio diodo elektrinių impulsų oscilogramos....55
7.2 pav. SPL PL90_3 lazerinio diodo elektrinio impulso oscilograma....55
7.3 pav. SPL PL90_3 lazerinio diodo elektrinio impulso kylančio fronto oscilograma....56
7.4 pav. Optinio signalo oscilograma....56
7.5 pav. Imtuve suformuoto elektrinio impulso oscilograma....57
7.6 pav. Laiko trukmės matavimo signalai....57
7.7 pav. Optikos derinimas....58
7.8 pav. Lazerinio diodo šviesos pluošto forma....59
7.9 pav. Lazerinio diodo kolimuota šviesos pluošto forma....59
7.10 pav. Išmatuoto atstumo priklausomybė nuo matuojamo atstumo....60
7.11 pav. Atstumo matavimo paklaida....61
7.12 pav. Atstumo matavimo standartinis nuokrypis....62
7.13 pav. Skirtingos spalvos paviršių atstumo matavimo paklaida....63
7.14 pav. Skirtingos spalvos paviršių atstumo matavimo standartinis nuokrypis....64
7.15 pav. Skirtingų spalvų matavimo rezultatų pasiskirstymas 1 metro atstumu....65
7.16 pav. Skirtingų medžiagų paviršių atstumo matavimo paklaida....66
7.17 pav. Skirtingų medžiagų paviršių atstumo matavimo standartinis nuokrypis....67
7.18 pav. Skirtingų medžiagų paviršių matavimo rezultatų pasiskirstymas 1 metro atstumu....68

ĮVADAS

Žmonija nuo neatmenamų laikų stengiasi įvairiais būdais išmatuoti atstumą nuo vieno taško iki kito. Laikui bėgant poreikis matuoti atstumą niekur nedingo ir matavimo metodai buvo vis labiau tobulinami. Šiuolaikinės technologijos leidžia atstumą matuoti įvairiais būdais. Pastaruoju metu vis labiau populiarumą įgauna bekontakčio atstumo matavimo būdai. Šie būdai remiasi tam tikros energijos formos matavimu, kuriuo yra gaunamas matuojamas atstumas. Atstumą galima išmatuoti naudojant radijo dažnio bangas, akustines ultragarso bangas, šviesą, aukštesnio dažnio elektromagnetines bangas. Iš šių būdų šviesa suteikia tokius privalumus: didelę matavimo spartą ir didelę skiriamąją gebą. Lazerinio matuoklio principas paremtas šviesos sklidimo laiko matavimu.

Šie matuokliai yra naudojami tokiose srityse: topografinių žemėlapių sudarymas, atmosferos tankio stebėjimas. Kitos sparčiai besiplečiančios sritys, kuriose yra naudojamas lazerinis atstumo matuoklis: autonominių automobilių, bepiločių skraidyklių pramonė. Autonominiam automobiliui ar bepilotei skraidyklei ypatingai svarbu greitai ir tiksliai aptikti aplinkui esančius objektus. Dėl didelės matavimo spartos ir tikslumo, naudojant lazerinius atstumo matuoklius, galima sugeneruoti trimatį aplinkos žemėlapį, sukurti kliūčių išvengimo sistemas, matuoti judančių objektų greitį.

Lazerinis atstumo matuoklis sudarytas iš siųstuvo, generuojančio šviesos signalą, ir imtuvo, kuris optinį šviesos signalą paverčia elektriniu. Šis matuoklis išmatuoja laiką, per kurį sugeneruotas šviesos signalas nukeliauja iki objekto ir nuo jo atsisprindėjęs grįžtą į imtuvą. Žinant šviesos sklidimo greitį yra apskaičiuojamas atstumas nuo matuoklio iki objekto.

Šio darbo tikslas – sukurti, pagaminti ir ištirti lazerinį atstumo matuoklį.

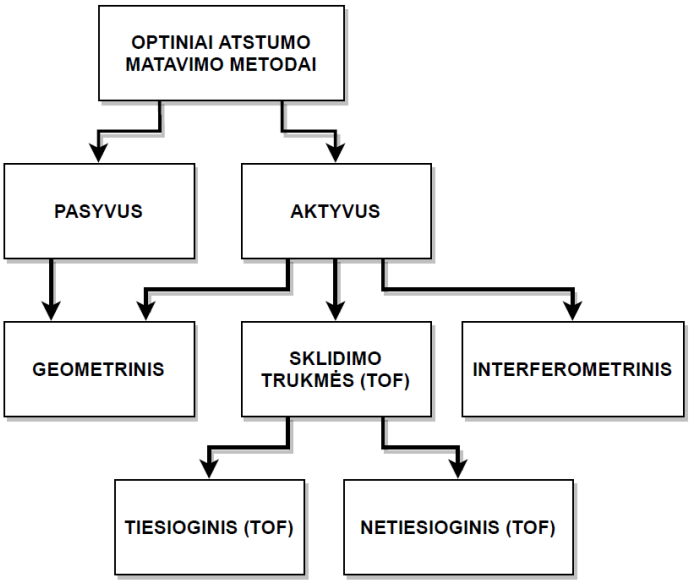
Darbo uždaviniai:

- Išanalizuoti lazerinių matuoklių realizavimo metodus;
- Išanalizuoti esminius lazerinio matuoklio, matavimo paklaidos šaltinius;
- Sudaryti lazerinio atstumo matuoklio blokinę schemą;
- Parinkti ir įvertinti esminius įrenginio komponentus;
- Suprojektuoti įrenginio elektros principinę schemą;
- Suprojektuoti ir pagaminti įrenginio spausdintinę plokštę;
- Parašyti įrenginio valdymo programą;
- Atlikti sukurto įrenginio eksperimentinius tyrimus ir išanalizuoti gautus rezultatus.

1. LAZERINIAM ATSTUMO MATAVIMUI TAIKOMI METODAI

Atstumo matavimus galima atlikti įvairiais būdais. Optiniu metodu atliekami matavimai yra bekontakčiai, o pasirinkta matuojama energijos forma yra šviesa. Šį matavimo metodą galima skaidyti į dvi kategorijas: pasyvų ir aktyvų. Atstumą matuojant pasyviu metodu matavimo prietaisas neapšviečia matuojamo objekto, tačiau matuoja aplinkos šviesą, kurią atspindi objektas arba paties objekto generuojama šviesa. Kai atstumo matavimui yra naudojamas aktyvusis metodas, matavimo prietaisas apšviečia objektą ir išmatuoja nuo objekto atsispindėjusią šviesą (Yadav & Mohite-Patil, 2012). Matavimus atliekant bekontakčiu optiniu būdu, kaip siųstuvas ir šviesos šaltinis dažniausiai yra naudojamas lazeris, o šviesai priimti, imtuve yra panaudojamas fotodiodas (Maric & Siedersbeck, 2018).

Abu matavimo būdai (aktyvus ir pasyvus) gali būti skaidomi detaliau į dar tris kategorijas: geometrinį, sklidimo laiko matavimo TOF ir interferencinį. Matuojant atstumą geometrinių skaičiavimų principu yra naudojamas matavimo metodas – trianguliacija. Aktyvus atstumo matavimo būdas gali būti atliekamas remiantis „sklidimo trukmės matavimu“ (angl. *Time of Flight*). Šis matavimo būdas gali būti klasifikuojamas į tiesioginį matavimą, kai sklidimo trukmę tiesiogiai matuoja laikmatis, ir netiesioginį – sklidimo trukmė gaunama matuojant fazės poslinkį tarp išsiųstos ir grįžusios šviesos signalų. Šiame skyriuje bus analizuojami aktyvūs optiniai atstumo matavimo principai, kuriais pasitelkiama šviesa, kaip energijos forma (Ballantyne, 2017). 1.1 paveiksle yra pavaizduota optinių atstumo matavimo metodų klasifikavimo blokinė schema.



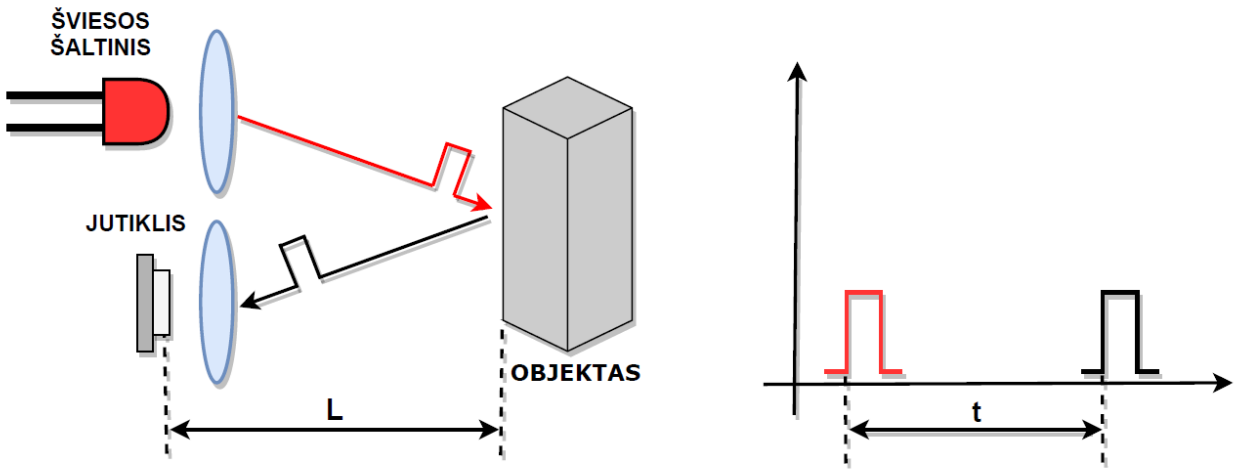
1.1 pav. Optiniai atstumo matavimo metodai

1.1. Tiesioginis šviesos sklidimo trukmės matavimas

Optinis atstumo matavimas realizuojamas žinant tai, kad šviesa sklinda fiksuotu greičiu. 1983 metais buvo nustatyta fiksuota šviesos greičio konstanta $c = 2.99792458 * 10^8$ m/s. Tiksliai žinant kokiu greičiu sklinda šviesa ir išmatavus šviesos sklidimo laiką galima išmatuoti atstumą, kurį šviesa turėjo nukeliauti. Matuojant atstumą tiesioginiu principu yra matuojamas laiko vėlinimas tarp siųstuvu išsiųsto ir į imtuvą grįžusio signalo. Siųstuvas sugeneruoją trumpą šviesos impulsą, kuris nekintančioje optinėje terpėje, fiksuotu greičiu, sklinda iki kliūties, nuo kurios atsispindėjęs grįžtą į imtuvą. Šis laiko tarpas yra išmatuojamas naudojant didelio tikslumo skaitmeninį laikmatį, kuris gali būti sudarytas iš specializuotos mikroschemos, vadinamos TDC (angl. *time to digital converter*) arba naudojant aukšto dažnio analogas/skaičius keitiklius – ADC (angl. *analoge to digital converter*) (Beer et al., 2018).

1.1.1. Impulsinis metodas

Impulsinis TOF metodas yra paremtas paprasčiausiu iš šviesos moduliacijos principų. Šviesa yra moduliuojama pastovios amplitudės impulsais. Atstumas yra gaunamas padauginus šviesos greitį iš laiko, kurį užtruko keliaujantis impulsas. Būtina įverti tai, kad šviesa užtruko dvigubai ilgiau, kadangi turėjo keliauti pirmyn ir atgal, todėl laikas turi būti dalinamas pusiau. 1.2 paveiksle yra pateikiama supaprastinta šviesos sklidimo trukmės matavimo struktūra. Šiame paveiksle yra vaizduojama: šviesos šaltinis, kuris generuoja šviesos impulsą; siųstuvo ir imtuvo optika; objektas, iki kurio keliauja impulsas; jutiklis, kuris aptinka grįžusį impulsą. Gretimai pavaizduotoje laiko diagramoje galima matyti, kad atstumas yra tiesiogiai proporcingas sklidimo laikui (Royo & Ballesta-Garcia, 2019).



1.2 pav. Sklidimo trukmės matavimas

Išmatavus šviesos sklidimo laiką, atstumas yra apskaičiuojamas pagal 1 formulę:

$$L = \frac{t * c}{2}, \tag{1}$$

čia L – atstumas; t – išmatuotas laikas; c – šviesos greitis vakuume.

Impulsinio matavimo metodu yra stengiamasi sugeneruoti kiek įmanoma trumpesnius šviesos impulsus, paprastai kelių nanosekundžių trukmės, taip yra padidinamas maksimalus matuojamas atstumas. Nors momentinė impulso galia gali siekti keliasdešimt vatų, tačiau dėl trumpo impulso pločio jo vidutinė galia išlieka žema ir taip yra neviršijamas akių saugumo lygis.

Impulsinio atstumo matuoklio matavimo skiriamoji geba tiesiogiai priklauso nuo laiko matavimo skiriamosios gebos. Šis skaičiavimas atliekamas pagal formulę:

$$\Delta L = \frac{1}{2} c * \Delta t, \tag{2}$$

čia $\Delta L -$ atstumo skiriamoji geba; $\Delta t -$ laiko skiriamoji geba.

Iš šios formulės galima matyti, kad atstumo matavimo skiriamoji geba stipriai priklauso nuo galimybės tiksliai matuoti laiką.

Viena iš problemų, su kuria susiduria lazerinis matuoklis – didelės optinės galios impulsas, atsispindėjęs nuo kliūties, savo kelyje praranda didžiąją dalį savo energijos. Taip atsitinka todėl, kad dažnu atveju atspindintis paviršius yra difuzorius ir šviesa yra išskaidoma įvairiomis kryptimis, o į imtuvą grįžta tik dalis šviesos. Dėl šios priežasties matuokliai, kurie veikia impulsiniu metodu privalo turėti labai jautrų imtuvą, kuris gebėtų aptikti labai silpnus šviesos impulsus (Horaud et al., 2016).

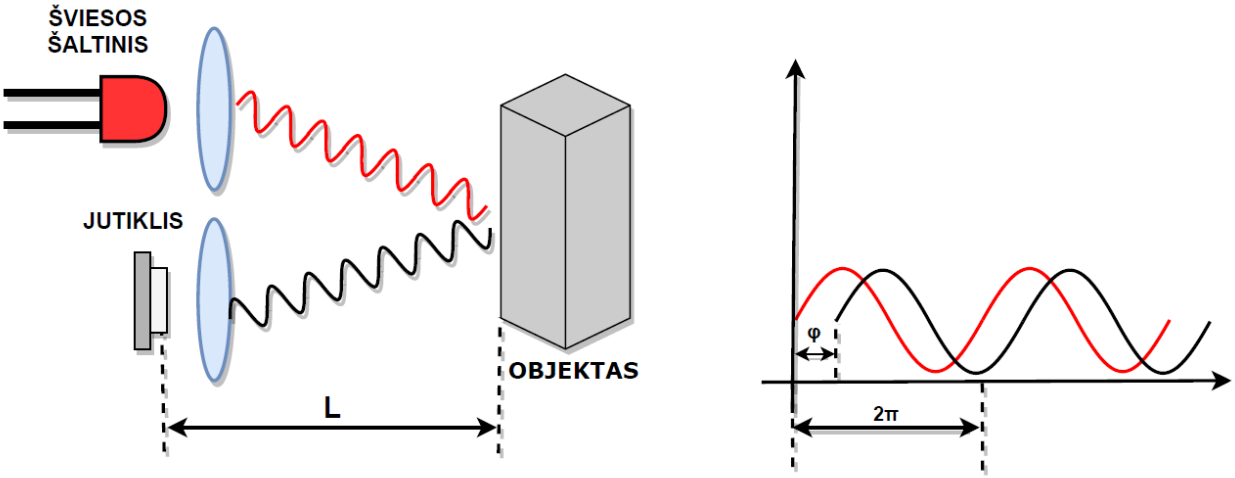
Teoriškai impulsinių matuoklių maksimalus matuojamas atstumas L_{max} yra apribojamas tik maksimalaus t_{max} laiko vėlinimo, kurį gali išmatuoti laikmatis. Tačiau praktikoje šis laiko intervalas nėra toks didelis, kad jo nebūtų galima išmatuoti. Taigi, maksimalų matuojamą atstumą pradeda riboti ne išmatuojamas maksimalus laikas, o kiti faktoriai. Tiksliau, vienas iš faktorių – lazerinio šviesos impulso energijos nuostoliai, kurie atsiranda sklidimo metu, ypatingai atsispindėjimo metu nuo difuzinių paviršių. Silpnam impulsui aptikti reikalingas jautrus imtuvas, kuris sugebėtų aptikti silpnus šviesos impulsus. Imtuvas turi pasižymėti dideliu SNR (angl. *signal to noise ratio*), kad būtų įmanoma išskirti norimą impulsą iš foninio triukšmo. Tai tampa pagrindiniu faktoriumi, ribojančiu impulsinio matuoklio maksimalų atstumą (Royo & Ballesta-Garcia, 2019).

1.2. Netiesioginis šviesos sklidimo trukmės matavimas

Taikant netiesioginį TOF metodą, priešingai nei tiesioginiame, atstumas gaunamas ne iš sklidimo trukmės matavimo. Netiesioginio metodo esminis skirtumas - išsiunčiamas signalas yra sumuojamas su grįžusiu nuo atsispindėjusio objekto ir taip yra sukuriamas trečias signalas, kuris priklauso nuo abiejų signalų fazių skirtumo. Laiko vėlinimas, kuris atspindi nukeliautą atstumą gaunamas matuojant šio signalo fazę. Norint išmatuoti fazių skirtumą generuojamas signalas yra nepertraukiamos bangos CW. Šiuos nepertraukiamos bangos moduliacijos principus galima skirstyti į moduliuojamos amplitudės AM ir moduliuojamo dažnio FM (Ballantyne, 2017; Yadav & Mohite-Patil, 2012).

1.2.1. Nuolatinės bangos moduliuojamos amplitudės AMCW metodas

AMCW metodas nuo anksčiau aptarto TOF skiriasi tuo, kad atliekant matavimą šiuo principu yra taikomas nepertraukiamos bangos intensyvumo moduliavimas. Moduliuojamas optinis signalas yra pastovaus dažnio, paprastai dešimčių MHz eilės ir yra sinusinis (Royo & Ballesta-Garcia, 2019). Supaprastinta AMCW matuoklio struktūra pateikta 1.3 paveiksle.



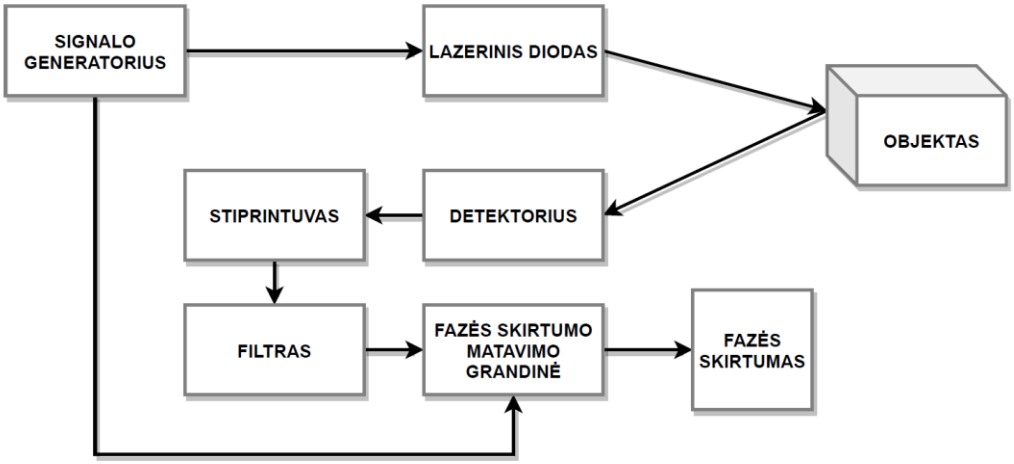
1.3 pav. Moduliuotos amplitudės matavimas

Žinant moduliacijos dažnį ir išmatavus fazės poslinkį, atstumą galima apskaičiuoti remiantis 3 formule:

$$L = \frac{1}{2} * c * t = c * \frac{\varphi}{4 * \pi * f_M}, \quad (3)$$

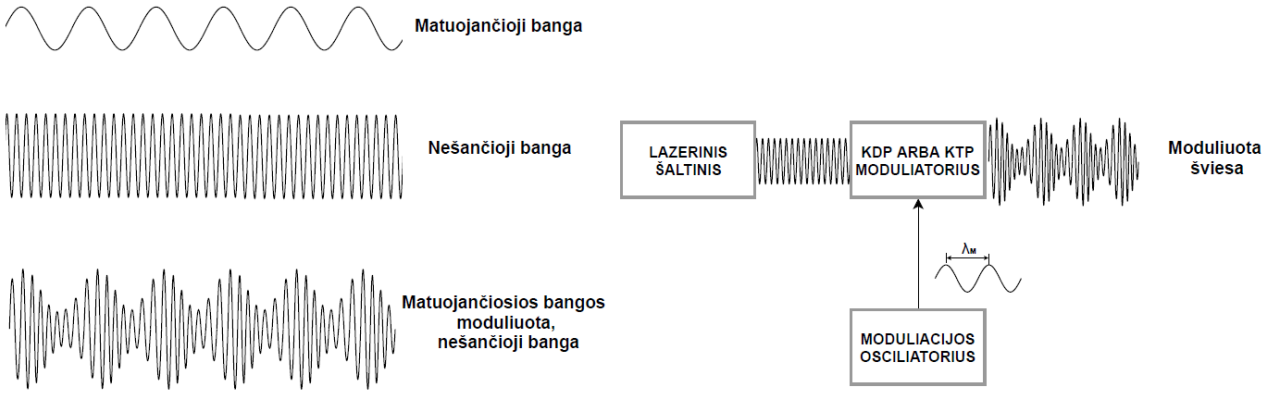
čia L – atstumas; φ – fazės poslinkis; c – šviesos greitis vakuume; f_M – moduliacijos dažnis.

Toliau yra pateikiama moduliuotos amplitudės fazės skirtumo matuoklio blokinė schema (žr. 1.4 pav.). Generuojamas signalas yra perduodamas į lazerinį diodą ir taip moduliuojamas diodo generuojamos šviesos intensyvumas. Taip pat, generatoriaus signalas yra perduodamas į fazės skirtumo matavimo grandinę ir ten palyginamas su grįžusiu impulsu. Lazerinio diodo sugeneruotas šviesos impulsas keliauja iki objekto, nuo jo atsispindi ir grįžtą į imtuvą. Jame optinis signalas verčiamas elektriniu, toliau sustiprinamas, filtruojamas ir perduodamas į fazės skirtumo matavimo grandinę. Galiausiai fazės skirtumo matavimo grandinė išduoda gautą skirtumą $\Delta\varphi$.



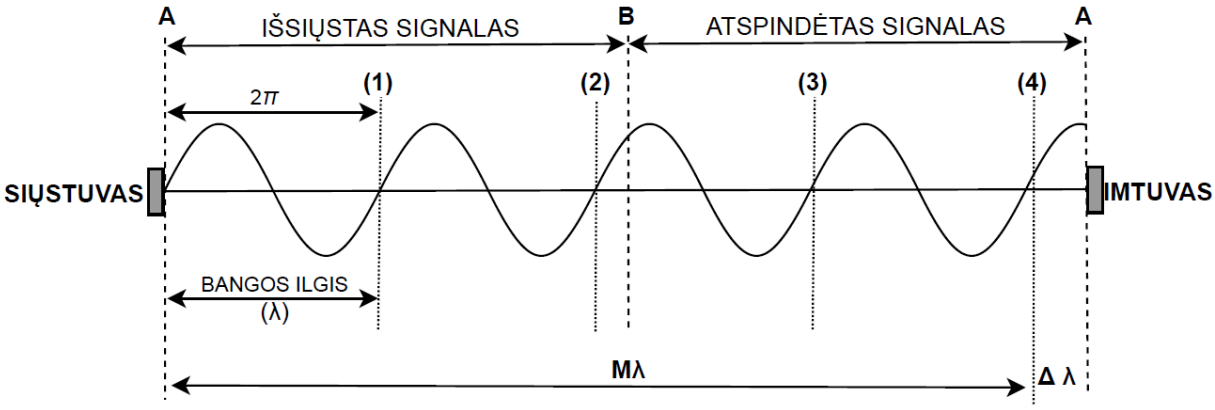
1.4 pav. AMCW matuoklio supaprastinta blokinė diagrama

Nepertraukiamos bangos matuoklio generuojamas šviesos signalas yra sudarytas iš lazerio generuojamo nešančiosios bangos signalo, kurio amplitudė yra moduliuojama stabilaus dažnio osciliatoriaus generuojamo signalo (žr. 1.5 pav.). Amplitudės moduliacija atliekama lazerio šviesą perduodant į *potassium dihydrogen phoshate* arba *potassium titanyl phosphate* kristalą, kurio įtampa priklauso nuo moduliacijos osciliatoriaus.



1.5 pav. AMCW moduliacijos principas

Lazerio spinduliuojamo signalo amplitudė arba kitaip intensyvumas yra moduliuojamas sinusinio signalo, kurio periodas T_M ir bangos ilgis λ_M. Atstumo matavimas L atliekamas tiksliai išmatavus fazės poslinkį tarp išsiunčiamo signalo taške A ir grįžusio atspindėto impulso taške B ir apskaičiuojamas pagal 4 formulę. 1.6 paveiksle yra pavaizduotos 4 moduliacijos bangos M=4.

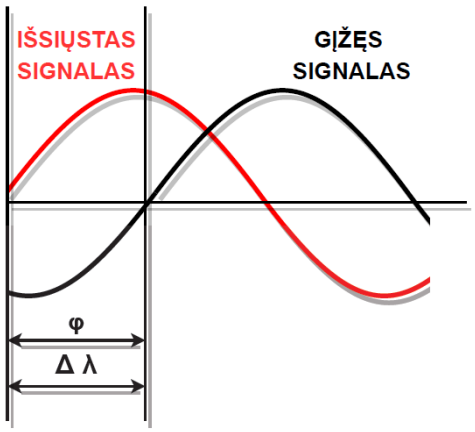


1.6 pav. AMCW moduliuoto signalo forma

$$L = \frac{M\lambda + \Delta\lambda}{2}, \tag{4}$$

čia M – sveikas bangos ilgių skaičius (angl. *integer number of wavelengths*); λ – žinomas bangos ilgis; $\Delta\lambda$ – trupmeninė bangos ilgio dalis = $\left(\frac{\varphi}{2\pi}\right) * \lambda$; φ – fazės kampas.

1.7 paveiksle matome išsiųsto ir atspindėto signalo poslinkį laike arba kitaip fazės skirtumą.



1.7 pav. Sinusinių signalų fazės poslinkis

Pagrindiniai faktoriai, kurie lemia AMCW matavimo metodo skiriamąją gebą: derinamo signalo moduliacijos dažnio f_M, tikslumas; fazės matavimo grandinės tikslumas, kurį apsprendžia naudojami

elektronikos komponentai. Didinant moduliacijos dažnį f_M galima padidinti matavimo skiriamąją gebą. Tačiau didinant f_M trumpėja maksimalus matuojamas atstumas. Taip yra todėl, kad grįžtančio signalo fazė ties ilgesniais atstumais pradeda kartotis kas 2π. AMCW metodu grįžęs signalas yra integruojamas per keletą laiko periodų ir signalo apdorojimas yra lėtesnis lyginant su TOF metodu. Dėl šios priežasties nuolatinės bangos metodai yra rečiau taikomi matuojant judančius objektus, kadangi judantis objektas gali būti netinkamai aptinkamas (Wehr & Lohr, 1999).

Maksimalus išmatuojamas atstumas fazės poslinkio matavimo metodu yra vadinamas maksimalus neapibrėžtas atstumas (NAR angl. *non ambiginuity range*). Jį galima apskaičiuoti pagal 5 formulę:

$$NAR_f = \frac{c}{2 * f}. \tag{5}$$

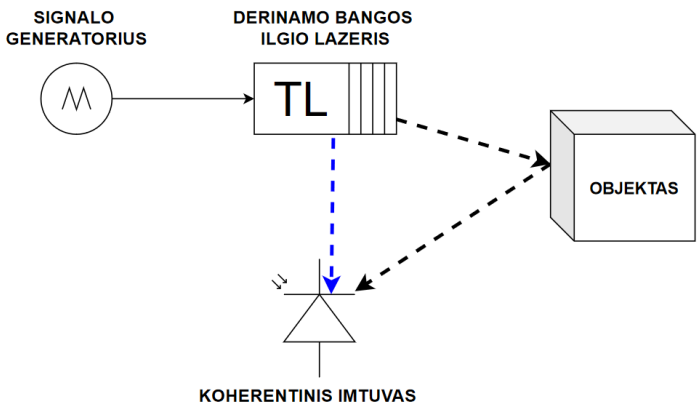
Atstumo matavimo paklaidą galima apskaičiuoti pagal 6 formulę:

$$\Delta L = \frac{c}{2f} * \frac{\delta\Delta\varphi}{2\pi}, \tag{6}$$

čia $\delta\Delta\varphi$ – fazės matavimo tikslumas.

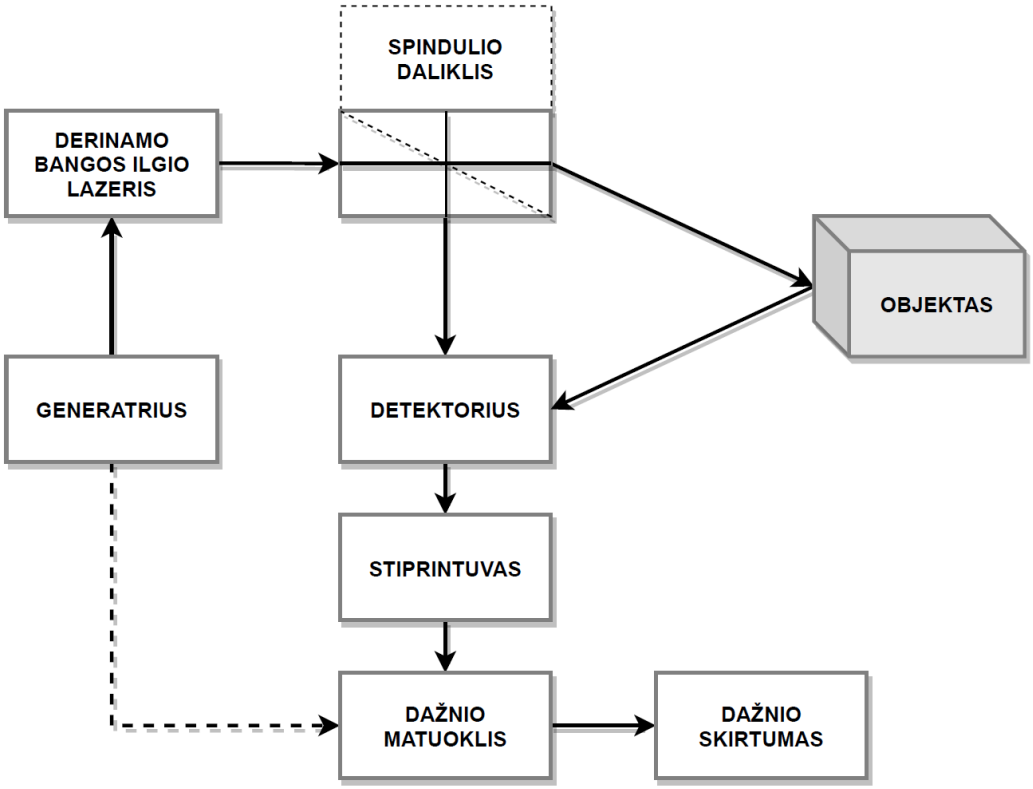
1.2.2. Nuolatinės bangos moduliuojamo dažnio FMCW metodas

Kitas nuolatinės bangos lazerinis atstumo matavimo metodas yra paremtas šviesos signalo dažnio moduliacija. Šis metodas yra analogiškas anksčiau aptartam AMCW metodui, tačiau skiriasi tuo, kad matuojančioji banga moduliuoja nešlio bangą keisdama nešančiosios bangos dažnį. Priešingai nei AMCW metode, nešančiosios bangos amplitudė yra fiksuota ir nekeičiama. 1.8 paveiksle yra pateikiama supaprastinta FMCW matuoklio veikimo schema. Pagrindiniai FMCW matuoklio elementai yra signalo generatorius, derinamo optinio dažnio lazeris ir koherentinis imtuvas (Baghmisheh, 2017).



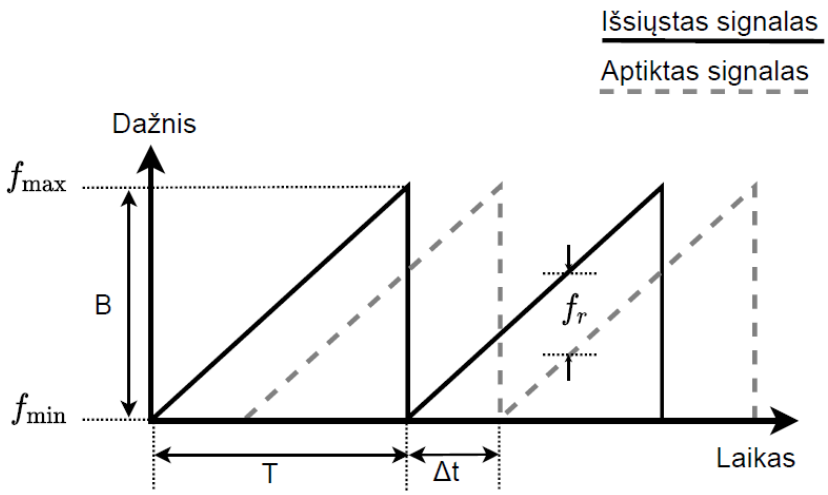
1.8 pav. FMCW veikimo schema

Detalesnė FMCW matuoklio blokinė schema pateikta 1.9 paveiksle. Derinamo bangos ilgio lazeris veikia pagal generatoriaus generuojamą signalą. Lazerinio šaltinio šviesa prieš išsiunčiant iš siųstuvo padalinama ir dalis jos tiesiai perduodama į fotodetektorių. Kita šviesos signalo dalis keliauja iki objekto, atsispindi nuo jo ir grįžta į imtuvą, kuriame yra sumaišoma su vidiniu šviesos signalu. Šis signalas perduodamas į dažnio matuoklį, kuris apskaičiuoja abiejų signalų dažnių skirtumą, iš kurio gaunamas matuojamas atstumas (Baghmisheh, 2017; Royo & Ballesta-Garcia, 2019).



1.9 pav. FMCW matuoklio blokinė schema

Vienas iš paprasčiausių moduliacijos metodų yra pjūklo formos moduliacija (žr. 1.10 pav.). FMCW moduliacijos metodo siųstuvo generuojamos šviesos optinis dažnis yra tiesiškai moduliuojamas laiko atžvilgiu. Nuo objekto atsispindėjusi šviesa grįžta į imtuvą po laiko vėlinimo $\Delta\tau$. Matuojant nejudantį objektą, kai šviesos bangoms Doplerio efektas yra nežymus, laiko vėlinimas tarp išsiųsto ir grįžusio signalo bangų sukuria tiesiogiai kintantį dažnio skirtumą f_r. Norint išmatuoti dažnį f_r , dalis lazerinio diodo šviesos panaudojama kaip vidinis osciliatorius, su kurio dažniu bus lyginamas grįžusio signalo dažnis. Toliau vidinio osciliatoriaus šviesa yra sumaišoma su grįžusia šviesa, maišymui gali būti panaudojamas koherentinis imtuvas. Fotoimtuvas pradeda generuoti srovę, kurios dažnis yra f_r , kuris vėliau išmatuojamas norint gauti fazės skirtumą (Behroozpour et al., 2017).



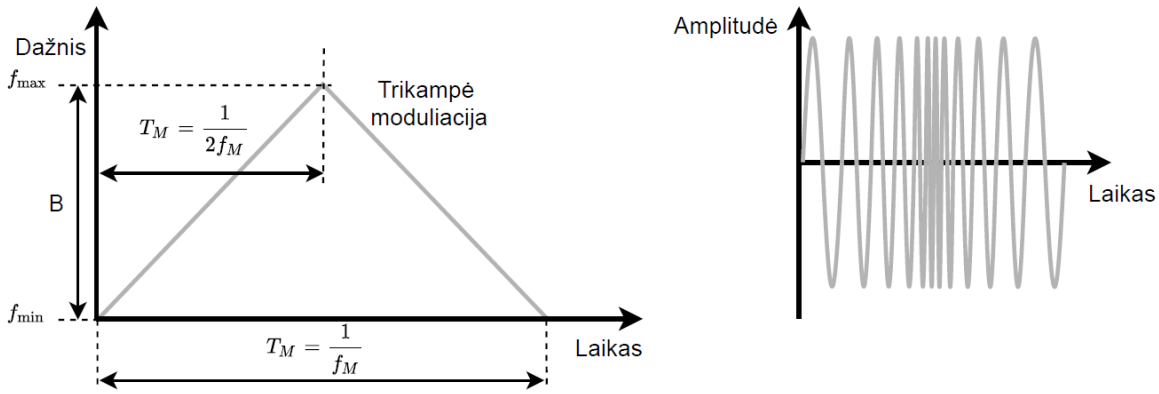
1.10 pav. Pjūklo formos moduliacija

Atstumą galima apskaičiuoti naudojant 7 formulę:

$$L = f_r \frac{cT}{2B}, \tag{7}$$

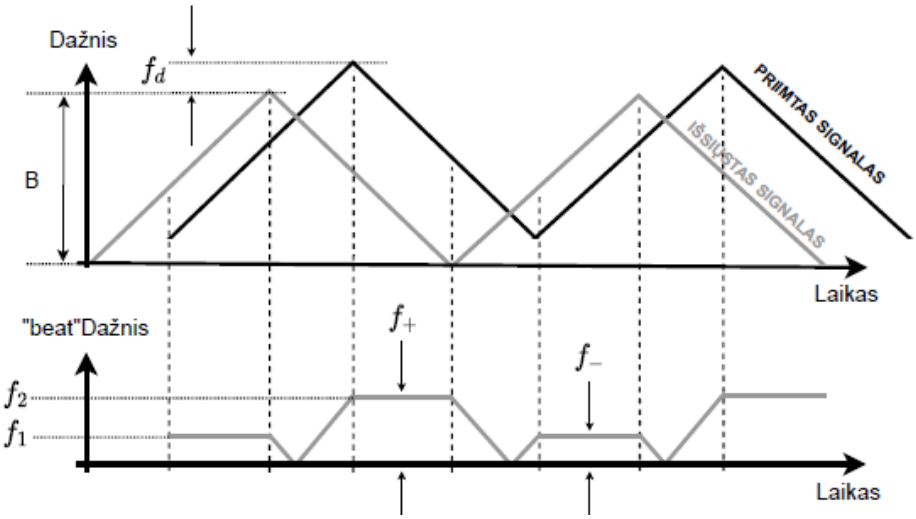
čia f_r – skirtuminis dažnis; B – dažnių juosta (angl. *bandwidth*).

Sudėtingesnis moduliacijos metodas naudojamas FMCW matuokliuose yra trikampio formos (žr. 1.11 pav.). Moduliuotas signalas turi kylantį ir krentantį frontus, naudojant šį moduliacijos metodą galima gauti daugiau duomenų.



1.11 pav. Trikampio formos moduliacija

Vienas šios moduliacijos privalumas – galimybė ne tik nustatyti judančio objekto greitį v_r, bet ir jo kryptį jutiklio atžvilgiu. Pagreitis apskaičiuojamas iš Doplerio dažnio f_d , kuris priverčia skirtuminį dažnį (angl. *beat freuency*) f_r didėti arba mažėti (Royo & Ballesta-Garcia, 2019). Trikampio formos moduliacija pavaizduota 1.12 paveiksle.



1.12 pav. Trikampio formos moduliacija su „beat“ dažniu

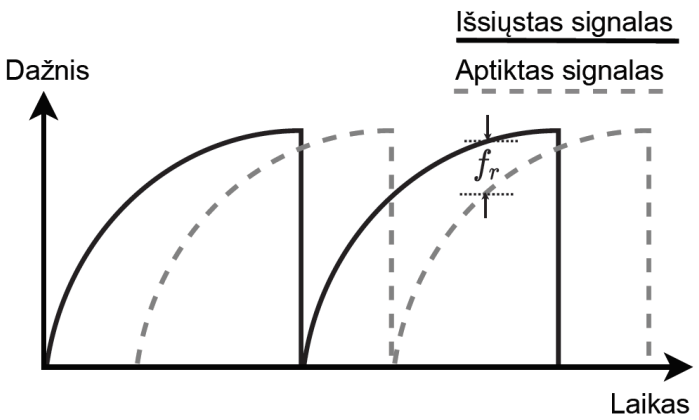
Jeigu FMCW matuoklyje yra naudojama pjūklo formos moduliacija, tai atstumas L gali būti apskaičiuojamas iš dažnio poslinkio f_r pagal 8 formulę:

$$f_r = \frac{f_1 + f_2}{2} = \frac{4L * B}{c * T_M}. \tag{8}$$

Moduliuojant optinį signalą, trikampio formos moduliacija pasireiškia „Doplerio poslinkis“, iš kurio galima apskaičiuoti judančio objekto santykinį greitį v_r remiantis 9 formule:

$$f_D = \frac{f_2 - f_1}{2} = \frac{2 * v_r}{\lambda}. \tag{9}$$

Viena iš problemų, su kuria susiduria FMCW matuokliai – lazerinio diodo moduliacijos netiesiškumas. Realybėje lazerinio diodo dažnio atsakas (angl. *frequency response*) yra netolygus moduliacijos dažniui. Dėl šios priežasties tiesiškai moduliuojant lazerinio diodo valdymo srovę yra sudėtinga išlaikyti tiesišką optinio dažnio kitimą. Tai matome 1.13 paveiksle, kuriame moduliacijos dažnis kinta netiesiškai (Bosch, 2001; Sugawara & Nikaido, 2014).



1.13 pav. Pjūklo formos moduliacija, kai dažnis kinta netiesiškai

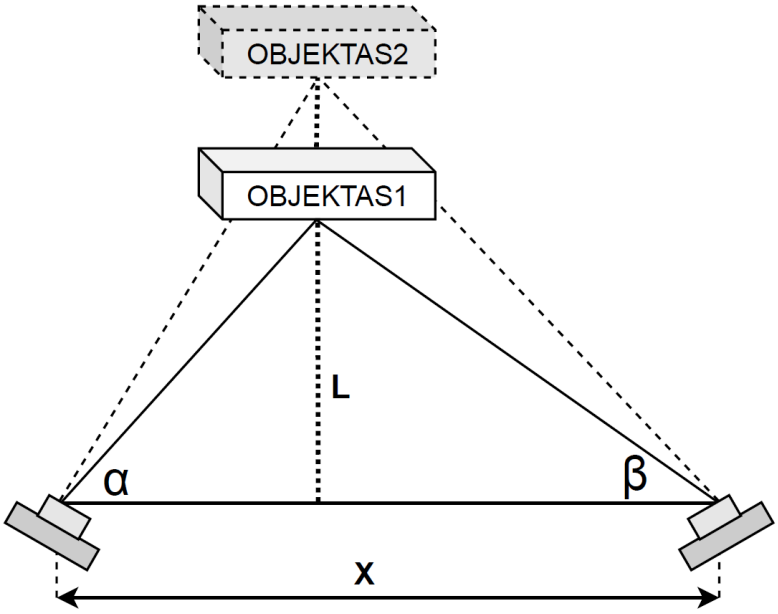
1.3. Geometriniai metodai

Trianguliacija – geometrinis matavimo principas, kuris leidžia nustatyti objektų atstumą ar pozicijas, remiantis panašių trikampių geometrija. Šį metodą maždaug 600 metais prieš mūsų erą naudojo graikų matematikas Thalesas iš Mileto, matuodamas Gizos piramidžių aukštį ir nustatydamas atstumą iki jūroje buvusio laivo (Berkovic & Shafir, 2012).

1.3.1. Pasyvi trianguliacija

Vienas iš trianguliacijos metodų yra pasyvus, kai matuoklis nėra šviesos šaltinis , o matuojama nuo objekto atsispindėjusi aplinkos šviesa. Šis metodas paremtas to paties taško stebėjimu iš dviejų skirtingų A ir B taškų, o matuojamas atstumas yra statmenas fiksuotam atstumui tarp dviejų jutiklių (žr. pav. 1.14). Žinant x atstumą ir išmatavus kampus α ir β, remiantis trigonometrine formule nr. 10 yra gaunamas matuojamas atstumas (Lange, n.d.):

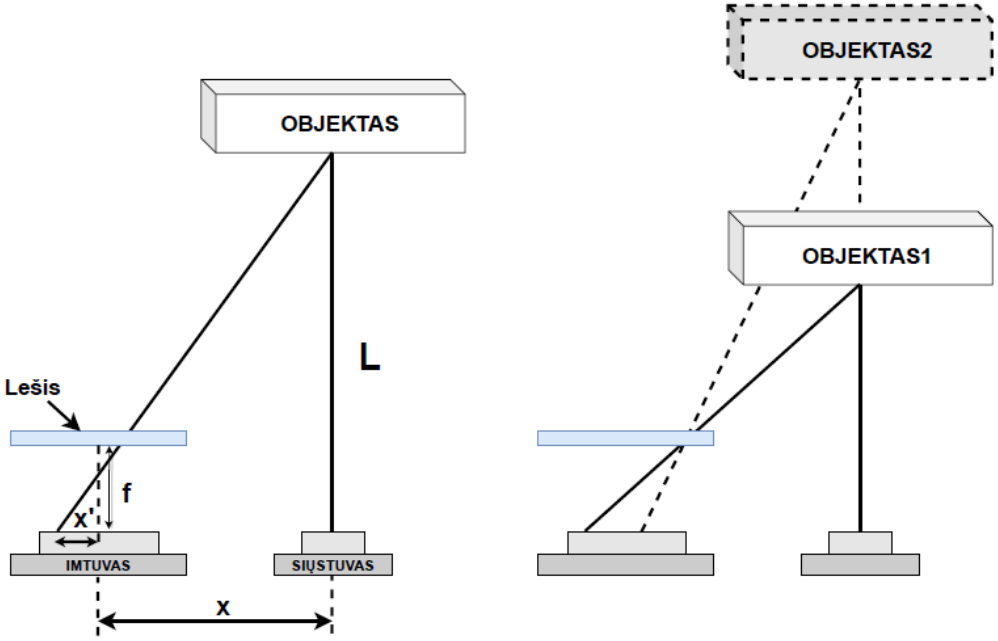
$$L = \frac{x}{\frac{1}{\tan\alpha} + \frac{1}{\tan\beta}}. \tag{10}$$



1.14 pav. Pasyvios trianguliacijos principas

1.3.2. Aktyvi trianguliacija

Aktyvus metodas nuo prieš tai aptarto skiriasi tuo, kad pats jutiklis apšviečia matuojamą objektą ir matuoja nuo jo atsispindinčią šviesą. Tačiau, priešingai nei tiesioginiame TOF metode, imtuvas yra ne pavienis fotodiodas, o pozicijai jautrus jutiklis (PSD). Supaprastinta trianguliacijos jutiklio struktūra pateikiama 1.15 paveiksle, kuriame galima pastebėti, kad atstumas nustatomas iš panašių geometrinių trikampių: iki matuoklio susidarantis trikampis ir trikampis, kuris susidaro imtuvo viduje (Berkovic & Shafir, 2012).



1.15 pav. Aktyvios trianguliacijos principas

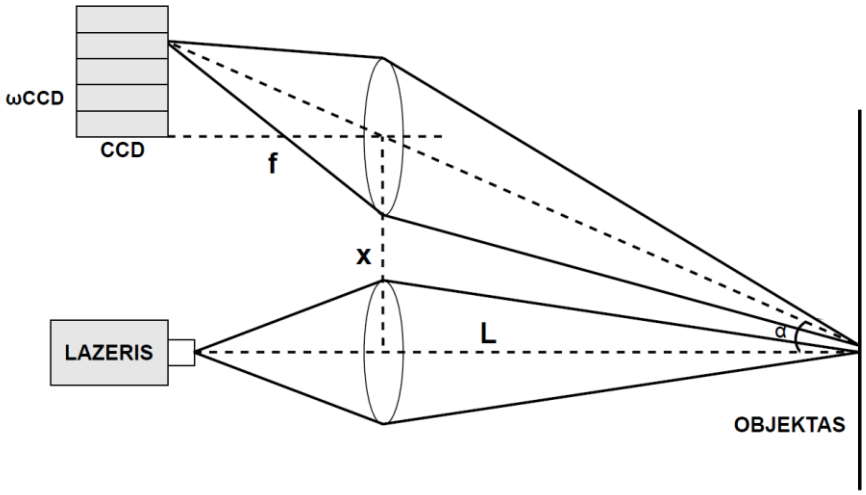
Atstumas L yra statmenas atstumui x. PSD jutiklis išmatuoja atstumą x‘, kuris susidaro jutiklio centro atžvilgiu. Žinant imtuvo lęšio židinio nuotolį ir išmatavus x‘ galima išmatuoti atstumą L. Tai galima padaryti remiantis 11 formule:

$$L = x\frac{f}{x'}, \tag{11}$$

čia L – atstumas; x – atstumas tarp siųstuvo ir imtuvo centrų; f – imtuvo lęšio židinio nuotolis; x‘ – PSD jutiklio išmatuojamas atstumas.

1.16 paveiksle yra pavaizduota aktyvios trianguliacijos matuoklio struktūra, kuri yra skirta matuoti trumpam atstumui (1-10 metrų). Šioje struktūroje kaip siųstuvas yra panaudotas puslaidininkinis lazeris, o imtuve naudojama CCD (angl. *Charge-Coupled Device*) jutiklis. Imtuvo optinė dalis yra teleskopas, kuris turi židinio nuotolį f, kuris dažniausiai atitinka 250 mm. CCD jutiklis yra prietaisas pagamintas iš silicio ir tiesiškai išdėstytų N skaičiaus fotojautrių elementų (paprastai N=1024, o kiekvieno fotojutiklio plotis ω_{CCD}=10 µm). Taškas, atsispindintis nuo objekto per imtuvo objektyvą yra projektuojamas ant CCD jutiklio. Nesudėtingai galima apskaičiuoti atspindžio kampo rezoliuciją remiantis 12 formule:

$$\Delta\alpha = \frac{\omega_{CCD}}{f}. \tag{12}$$



1.16 pav. Trianguliacija

Aktyvios trianguliacijos matavimo skiriamąją gebą galima apskaičiuoti remiantis 13 formule:

$$\delta L = \frac{1}{f} * \frac{L^2}{x} * \delta x', \tag{13}$$

čia $\delta L -$ atstumo skiriamoji geba.

Matavimo tikslumas pradeda mažėti, didėjant matuojamam atstumui. Norint padidinti matavimo tikslumą privaloma didinti atstumą tarp siųstuvo ir imtuvo arba didinti imtuvo lęšio židinio nuotolį (Yadav & Mohite-Patil, 2012). Pagrindinis trianguliacinių sistemų trūkumas - norint pasiekti tikslius matavimus reikalinga didelė trianguliacijos bazė x.

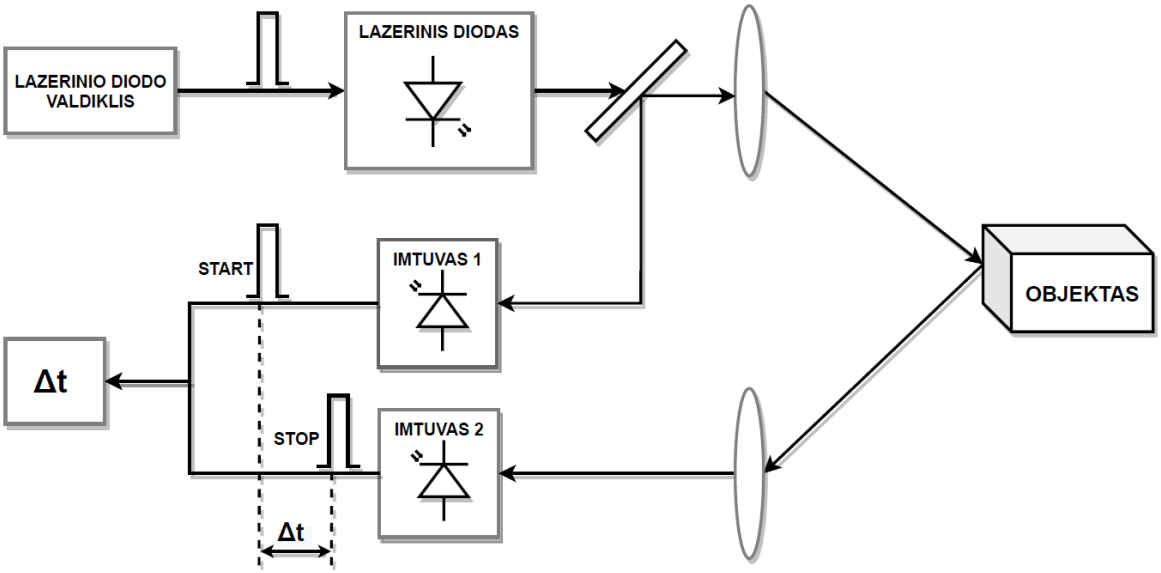
APIBENDRINIMAS

Atstumui matuoti galima naudoti bekontaktį matavimo būdą naudojant šviesą kaip energijos formą. Šis būdas yra paremtas matavimo metodais, kurie skirtingai realizuojami pagal taikymo sritį. Šioje dalyje buvo apžvelgti šie atstumo matavimo metodai: impulsinis (TOF), AMCW, FMCW, trianguliacinis. Impulsinis (TOF) lazerinis matuoklis yra paremtas tiesioginiu laiko sklidimo trukmės matavimu. Sklidimo trukmė yra matuojama nuo impulso išsiutimo ir grįžimo į imtuvą nuo atspindėto paviršiaus. Laiko matavimas gali būti atliekamas naudojant specializuotą laikmatį, tai stipriai palengvina pačio įrenginio projektavimą. Šis matuoklis generuoja didelės optinės galios impulsus. Dėl šios priežasties matuoklis pasižymi geru veikimu dienos šviesoje, kur optinis triukšmas yra didelis. Nors matuojamo atstumo tikslumą riboja laikmatis (TDC), tačiau naudojant statistinius duomenų apdorojimo metodus tikslumą galimą pagerinti. AMCW metodas sklidimo trukmę matuoja ne tiesiogiai. Šio metodo matuokliai generuoja nepertraukiamos bangos šviesos signalą, kurio

amplitudė yra moduliuojama. Atstumas gaunamas matuojant fazės skirtumą, kuris atsiranda tarp siunčiamo ir priimamo signalo per tam tikrą sklidimo trukmę. Kadangi matuoklio generuojamos šviesos bangos yra nepertraukiamos, šio signalo maksimali galia yra ribojama remiantis akių saugos reikalavimais. Tuo pačiu yra ribojamas maksimalus matuojamas atstumas. Matavimo sparta yra ne tokia greita, kaip impulsinio metodo dėl ilgesnio signalų apdorojimo. FMCW metodas skiriasi nuo kitų metodų tuo, kad signalo moduliavimas ir de-moduliavimas vyksta optiniame domene su platesne dažnių juosta, nei naudojant elektronines grandines. Sklidimo trukmė gaunama išmatuojant signalų dažnių skirtumą, kuris atsirandą po tam tikros sklidimo trukmės. Šiuo metodu galima pasiekti mikroninę matavimo skiriamąją gebą, kurio maksimalus atstumas siektų apie 1 metrą. Kitas FMCW metodo privalumas yra galimybė matuoti judančio objekto pagreitį dėl pasireiškiančio Doplerio efekto, tačiau atstumo matavimo tikslumas suprastėja. FMCW, kaip ir AMCW metodas, generuoja nepertraukiamos bangos signalą, kuris nepasižymi bangos matavimo netikslumu (angl. *wave ambiginuity*). Atstumo matavimo tiesiškumas priklauso nuo lazerio moduliavimo tiesiškumo. Moduliacijos tiesiškumą yra sunku užtikrinti, kadangi lazerinio diodo generuojama šviesa kinta netiesiškai nuo diodo valdymo srovės. Geometriniai matavimo metodai yra paremti trigonometriniais skaičiavimais, kai atstumas gaunamas apskaičiuojant panašių trikampių atstumą. Skaičiavimai atliekami žinant dvi trikampio kraštines ir apskaičiuojant trečiąją arba išmatuojant kampus, kurie susidaro tarp dviejų jutiklių ir matuojamo objekto.

1.4. Šviesos sklidimo trukmės matavimas naudojant TDC

Detalesnė impulsinio TOF matuoklio struktūra pateikiama 1.17 paveiksle. Lazerinis diodas sugeneruoja trumpą šviesos impulsą (1-10 ns). Dalis šio impulso yra atspindima į imtuvą 1. Pirmas imtuvas sugeneruoja START signalą ir laikmatis pradeda skaičiuoti laiką. Kai impulsas atsispindi nuo objekto ir patenka atgal į imtuvą 2, yra sugeneruojamas STOP signalas ir laikmatis nustoja matuoti laiką. Praėjęs laikas t tarp impulsų START ir STOP yra naudojamas apskaičiuojant atstumą iki objekto.



1.17 pav. Impulsinio matuoklio blokinė schema

Impulsinis TOF metodas remiasi trumpo šviesos impulso generavimu siųstuve, kuris keliauja iki objekto ir atsispindėjęs grįžta į imtuvą. Laikas, per kurį impulsas nukeliavo pirmyn ir atgal yra tiesiogiai proporcingas atstumui. Laikui matuoti yra panaudojama laiko į skaitmeninį signalą keitikliai TDC (angl. *time to digital converter*) arba kitaip vadinami laikmačiais, kurie pasižymi dideliu laiko matavimo tikslumu. Žinant šviesos sklidimo greitį, kuris vakuume yra lygus 299 792 458 m/s ir išmatavę sklidimo trukmę pagal 14 formulę galima apskaičiuoti šviesos nukeliautą atstumą. Pagal gamintojo pateiktas specifikacijas, laikmatis TDC7201 gali atlikti laiko matavimus tarp START ir STOP impulsų 55 ps tikslumu, pavertus į atstumą, tai būtų 1,65 cm (Texas Instruments, 2020).

$$L = t * c = 55 * 10^{-12} * 3 * 10^{8} = 1{,}65\ cm, \tag{14}$$

čia L – atstumas; t – išmatuotas laikas; c – šviesos greitis vakuume.

1.4.1. Impulsinio TOF matavimo paklaidos šaltiniai

Pagrindiniai veiksniai, ribojantys impulsinio TOF matuoklio imtuvo kanalo tikslumą yra įėjimo signalo amplitudės pokyčiai, sukeliantys sisteminę paklaidą, vadinamą laiko eigos paklaida (angl. *walk error*). Kitas veiksnys yra triukšmas, kuris sukelia atsitiktines paklaidas vadinamas virpėjimu (angl. *jitter*) (Ruotsalainen et al., 2001). Impulsiniame TOF lazeriniame matuoklyje paprastai atsiranda šie triukšmo šaltiniai: šūvio triukšmas iš fono apšvietimo, triukšmas dėl APD tamsiosios

srovės, šūvio triukšmas dėl signalo srovės ir galiausiai triukšmas, susidarantis imtuvo elektronikos komponentuose. Triukšmas dėl aplinkos šviesos paprastai sumažinamas naudojant optinį filtrą. Taigi, prie silpnų signalų imtuve esminis triukšmo šaltinis yra imtuvo elektronikos komponentai (Kurtti et al., 2017).

Parametras, kuris lemia lazerinio matuoklio imtuvo jautrumą yra jo SIGNALAS/TRIUKŠMAS santykis (SNR). Tai santykis tarp pikinės signalo srovės, gautos iš fotoimtuvo ir fotoimtuvo RMS triukšmo srovės. SNR santykis nulemia ne tik impulso aptikimo patikimumą, bet ir matavimo virpėjimą. Naudojant kylančio fronto diskriminatorių, santykį tarp SNR ir virpėjimo galima įvertinti remiantis 15 formule (Kostamovaara et al., 2009):

$$\sigma_t = \frac{\sigma_v}{\frac{d}{dt} v(t)_{t=t_p}}, \tag{15}$$

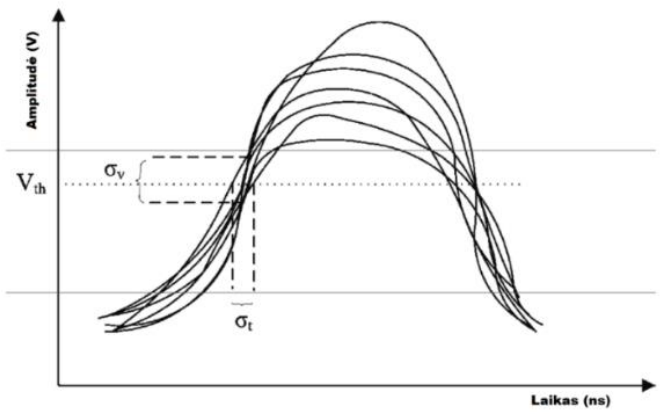
čia, σ_t – virpėjimo standartinis nuokrypis laiko matavimo taške; σ_v – imtuvo triukšmo standartinis nuokrypis ; $v(t)_{t=t_p}$ – imtuvo komparatoriaus signalo lygis, laiko matavimo taške; $\frac{d}{dt}$ – signalo pokytis.

Šioje formulėje vertinamas triukšmas atsiranda imtuvo elektronikoje. Laiko virpėjimas yra didžiausias, kai imtuve signalas yra silpniausias. Tačiau kylančio fronto diskriminatoriuje virpėjimas lyginant su laiko eigos paklaida turi mažesnę įtaką matavimui. Pavyzdžiui, kylantis frontas 1,6 ns trukmės, kai SNR vertė yra 10 (kuri atspindi mažiausią naudingą signalo lygį) nulems maždaug 160 ps (24 mm σ_t) vertę. Tačiau, šią paklaidą galima sumažinti taikant pavienių pamatavimų vidurkinimą, kuris rezultatą gali pagerinti $\sqrt{N}$, kartų, kai N yra pavienių matavimų imties vidurkio skaičius (Kostamovaara et al., 2009). Vertinant tai, kad triukšmas 15 formulėje pagrinde atsiranda dėl imtuvo elektronikos, formulę galima supaprastinti:

$$\sigma_t = \frac{\sigma_v}{\frac{\delta i_s}{\delta t}} = \frac{\sigma_v}{\frac{i_{Smax}}{t_r}} = \frac{t_r}{SNR}, \tag{16}$$

čia t_r – impulse kylantis frontas; i_{Smax} – signalo amplitudė.

Laiko virpėjimas apibrėžia statistinę laiko matavimo taško paklaidą, kuri atsiranda dėl triukšmo, kitaip vadinamo vienetinio atstumo (angl. *single shot*) matavimo tikslumu. Triukšmo daromą įtaką laiko matavimo paklaidai matome 1.18 paveiksle.

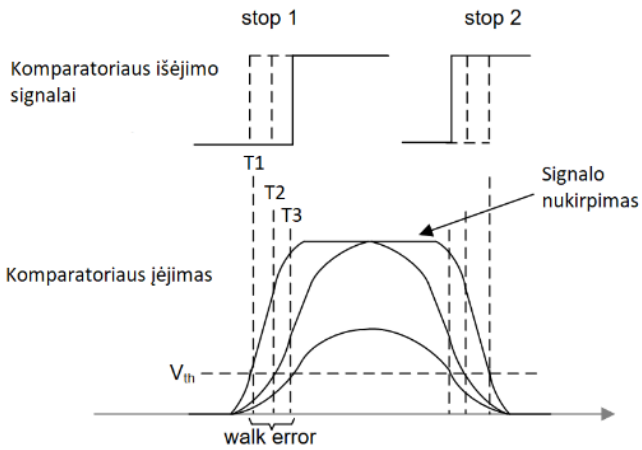


1.18 pav. Analoginio signalo triukšmo įtaka laiko matavimui

- **Laiko eigos paklaida**

Impulsiniai lazeriniai atstumo matuokliai yra paremti laiko intervalo matavimu, kuris yra pagrindinis parametras, lemiantis atstumo matavimo tikslumą. Matuokliuose, kurie paremti kylančio fronto diskriminatoriumi, vienas iš matavimo paklaidą didinančių šaltinių yra laiko eigos paklaida (angl. *walk error*). Priklausomai nuo grįžusio šviesos impulso energijos, kinta jo signalo amplitudė. Skirtingi paviršiai pasižymi skirtingu atspindžio koeficientu ir dėl šios priežasties nuo vienų paviršių atsispindėjęs impulsas grįš didesnės arba mažesnės amplitudės (Oh et al., 2010).

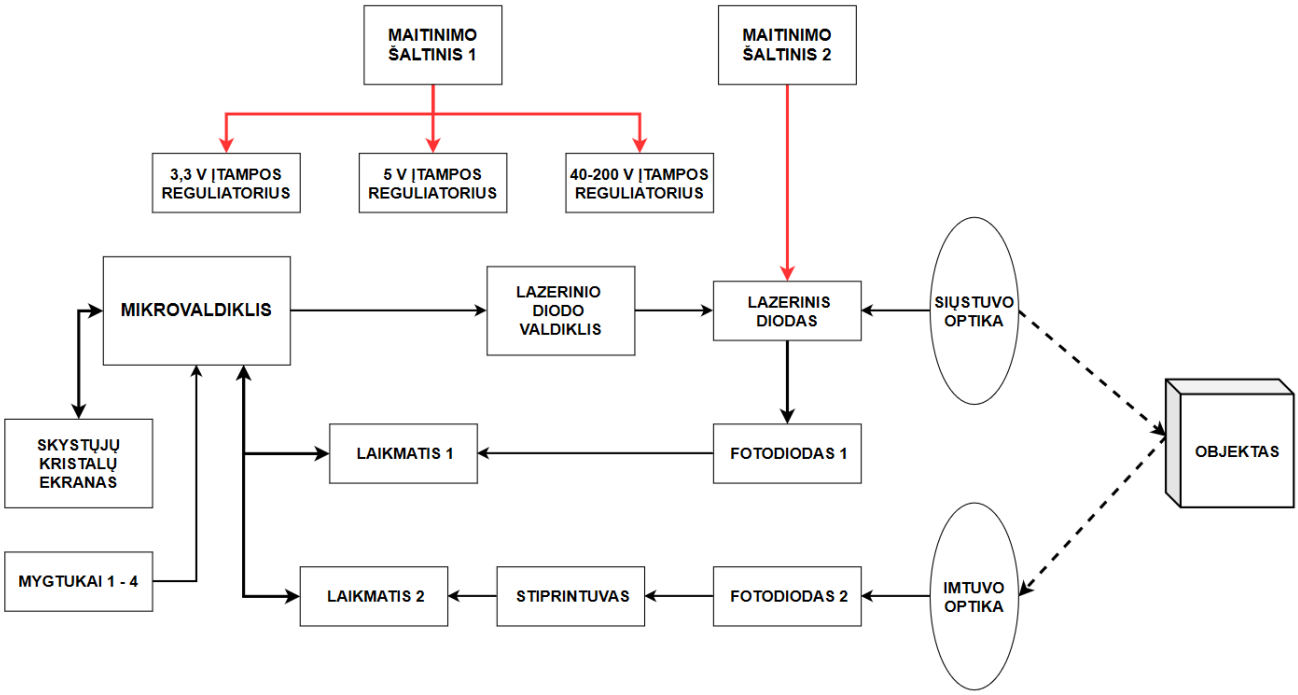
Imtuve naudojamas įtampos komparatorius turi fiksuotą atraminę įtampą, kurią pasiekus jo išėjime yra suformuojamas loginio lygio signalas. 1.19 paveiksle yra pateikiama iliustruota „walk error“ įtaka STOP signalo poslinkiui laike. Šiame paveiksle matome, kad STOP1 signalą ties T1 gauname tuomet, kai signalo amplitudė ir frontas yra stačiausias. Kai signalo frontas lėkštėja, tuomet gauname STOP1 signalą ties T2. STOP1 signalą ties T3 gauname tuomet, kai signalas dar labiau susilpnėja.



1.19 pav. Laiko eigos paklaida

2. Matuoklio struktūrinė schema

Atstumo matuoklio blokinė schema yra pateikta 2.1 paveiksle. Šioje schemoje yra pavaizduoti pagrindiniai matuoklio elementai ir ryšiai tarp jų.



2.1 pav. Atstumo matuoklio blokinė schema

Atstumo matuoklio blokinėje schemoje, matome du atskirus maitinimo šaltinius. Pirmojo šaltinio įtampa yra suskaidyta į tris skirtingas įtampas. 3,3 V įtampa skirta maitinti mikrovaldiklį, skystųjų kristalų ekraną, išorinius laikmačius, stiprinimo grandinę, įtampos komparatorius, transimpedansinį stiprintuvą. 5 V įtampa skirta maitinti lazerinio diodo valdiklį. Griūtinis fotodiodas yra maitinamas 40-200 V įtampa. Antrasis maitinimo šaltinis yra skirtas maitinti lazerinį diodą – taip yra sumažinamas elektrinių triukšmų įnešimas į kitas grandines. Įrenginio valdymui prie mikrovaldiklio prijungti keturi mygtukai. Blokinėje schemoje taip pat matome siųstuvo ir imtuvo optiką, kuri skirta fokusuoti lazerinio diodo šviesą ir padidinti maksimalų matuojamą atstumą.

3. Siųstuvo ir imtuvo komponentų parinkimas, jų charakteristikų analizė

3.1. Siųstuvas

Lazeriniame impulsiniame atstumo matuoklyje siųstuvo paskirtis yra elektrinį impulsą paversti šviesos impulsu, kuris keliaus iki kliūties ir atsispindėjęs grįš į imtuvą. Kaip ankščiau buvo minėta, impulsinis matuoklis patiria didžiulius nuostolius dėl tam tikrų paviršių prasto atspindėjimo koeficiento. Paprastai, norint išmatuoti metrų ar kelių dešimčių metrų eilės atstumą yra reikalingas siųstuvas, kuris galėtų sugeneruoti 10-100 W galios impulsus. Šiuos impulsus galima sugeneruoti naudojant lazerinį diodą (Ruotsalainen et al., 2001).

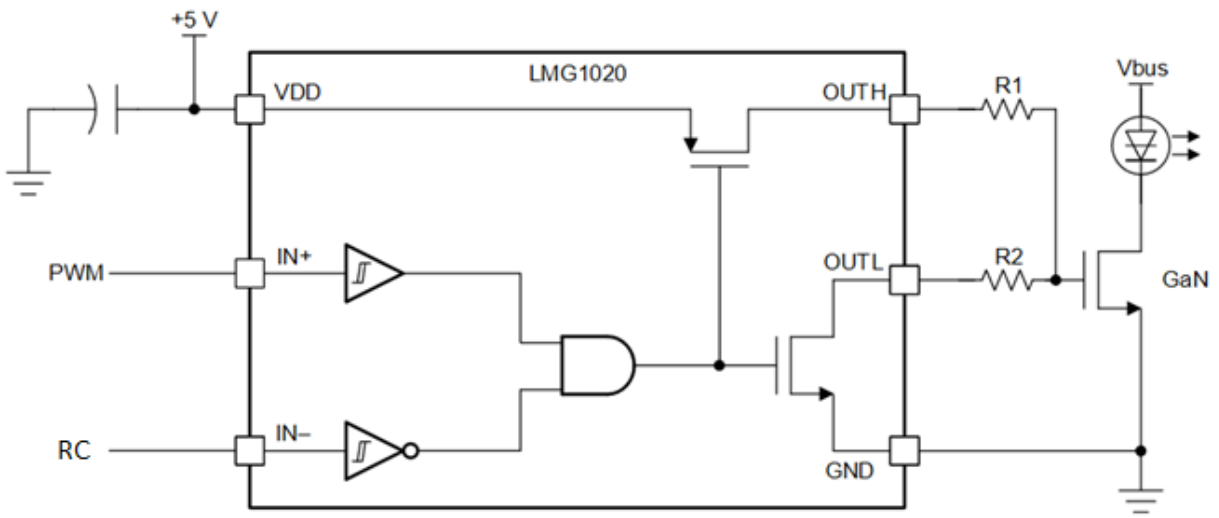
Lazerinis diodo intensyvumas yra moduliuojamas srovės impulsais. Struktūriškai paprastas metodas yra naudoti kondensatorių, kurio krūvis C būtų panaudojamas kaip lazerinio diodo valdymo srovė. Įjungus jungiklį srovė pradeda tekėti per diodą. Kaip jungiklis yra panaudojamas tranzistorius. Norint pasiekti trumpus impulsus, tranzistoriaus užtūra turi būti greitai įkraunama. Tranzistoriaus atsidarymo įtampai pasiekti užtūros talpa turi būti įkraunama per keletą nanosekundžių. Generuojant trumpus optinius impulsus Gan FET technologija lyginant su MOSFET pasižymi tokiais privalumais, kaip mažesnė užtūros talpa, mažesnė varža tarp santakos ir ištakos bei mažesnis korpuso induktyvumas. Dėl šių savybių galima pasiekti didesnį efektyvumą, taip pat, statesnius impulso frontus. Dėl staigaus kondensatorių iškrovimo didelis srovės kiekis turi pratekėti per lazerinį diodą per labai trumpą laiką. Dėl šios priežasties yra svarbu sumažinti srovės kilpos induktyvumą, kuris ribotų staigų kondensatorių iškrovimą. Remiantis 17 formule galima įvertinti induktyvumo įtaką lazerinio diodo valdymui, kuris susiformuoja lazerinio diodo grandinėje (Maric & Siedersbeck, 2018).

$$U_L(t) = L\frac{di_L(t)}{dt}. \tag{17}$$

Kaip matoma 17 formulėje, srovę, pratekančią per lazerinį diodą, galima padidinti didinant maitinimo įtampą arba mažinant parazitinį induktyvumą.

Impulsų trumpinimas

Bendrosios paskirties mikrovaldikliai nepasižymi galimybe generuoti impulsus, kurių plotis siektų 1-10 ns. Tačiau pasirinktas tranzistoriaus valdiklis LMG1020 viduje turi integruotus komponentus: buferį, invertuojantį buferį ir loginį elementą IR. Papildomai panaudojus žemų dažnių RC filtrą galima sudaryti grandinę, kuri atliktų impulsų trumpinimą. 3.1 paveiksle yra pateikta valdiklio LMG1020 vidaus struktūra.



3.1 pav. Tranzistoriaus valdiklio vidinės sandaros schema

Šis valdiklis yra tinkamas naudoti aukšto dažnio elektronikoje, kur impulsų plotis yra nanosekundžių eilės. Taip pat naudojant šį valdiklį galima suformuoti minimalų impulsą, kurio plotis būtų 1 ns, o frontai 400 ps. Tranzistoriaus įjungimo srovė 7 A, o išjungimo 5 A.

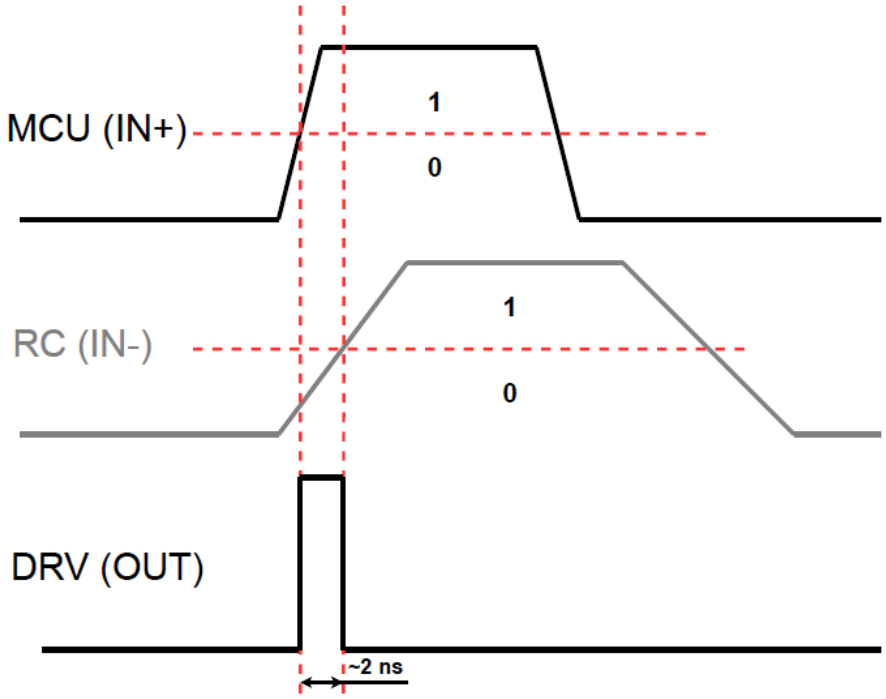
Tam, kad būtų paprasčiau suprasti impulso trumpinimo logiką, pažvelkime į 3.1 lentelę, kurioje matome, kaip kinta valdiklio išėjimas priklausomai nuo IN+ ir IN- įėjimų. Aukštas loginis lygis, kuris atidarytų tranzistorių, gaunamas, kai IN+ yra 1, o IN- yra 0.

3.1 lentelė. LMG1020 teisingumo lentelė

IN+	IN-	OUT
0	**1**	**0**
0	**0**	**0**
1	**1**	**0**
1	**0**	**1**

Mikrovaldiklio generuojamas impulsas yra tiesiogiai perduodamas į IN+ įėjimą ir į RC žemų dažnių filtrą. Panaudojus šį filtrą yra sulėtinami impulso frontai ir taip gaunamas impulsas, kuris

toliau perduodamas į IN- įėjimą. Kaip matome 3.2 paveiksle, impulsai pasiekia atitinkamą loginį lygį ties savo amplitudės viduriu. Toliau matome, kad valdiklio išėjime OUT gaunamas sutrumpintas impulsas tuo metu, kai IN+ impulso lygis nukrenta iki žemo lygio, o IN- vis dar palaiko aukštą lygį.



3.2 pav. Impulso trumpinimo laikinė diagrama

Vienas iš struktūriškai paprasčiausių metodų generuoti šviesos impulsus yra naudojant lazerinį diodą. Šiuolaikiniuose lazeriniuose matuokliuose yra plačiai naudojami impulsiniai lazeriniai diodai, jie per trumpą impulsą (~100 ns pločio) sugeba sugeneruoti iki 100 W galios impulsus. Šiame projektuojamame įrenginyje yra naudojamas SPL PL90_3 diodas, kurio bangos ilgis – 905 nm, optinis galingumas 90W, kylantis ir krentantis frontai – 1 ns, apertūra – 200 µm x 10 µm, o maitinimo įtampa – 12 V.

3.2. Imtuvas

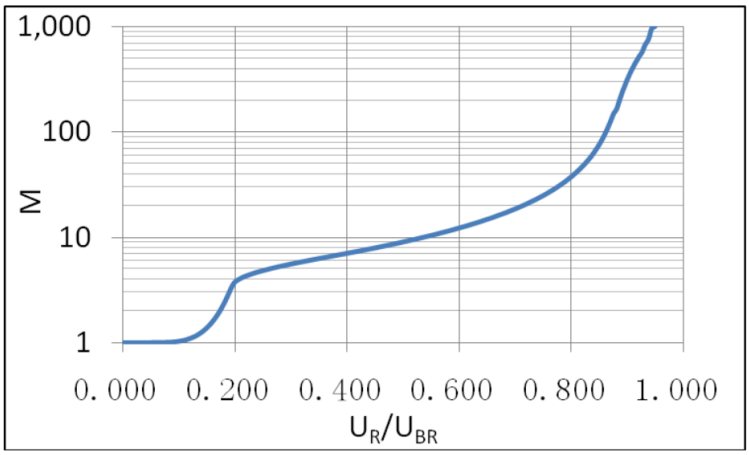
Lazeriniame atstumo matuoklyje imtuvo paskirtis yra priimti šviesos impulsą, jį paversti elektriniu, sustiprinti ir iš jo sugeneruoti STOP signalą laikmačiui. Optinį impulsą versti elektriniu yra naudojamas fotodiodas, kuris savo išėjime generuoja elektros srovę. Paprastai impulsiniuose TOF matuokliuose yra naudojamas griūtinis fotodiodas (APD angl. *avalanche photodiode*). Toliau fotodiodo srovė yra verčiama į įtampą ir sustiprinama naudojant transimpedansinį stiprintuvą. Galiausiai STOP signalas suformuojamas naudojant laiko diskriminatorių, kuris gali būti sudarytas panaudojant įtampos komparatorių. Norint išmatuoti atstumą iki objektų, kurių paviršius nėra iš anksto apibrėžtas ir atstumas gali siekti kelis dešimtis metrų, vietoje PIN fotodiodo, kurio jautrumas apie 0,5 A/W, yra naudojamas APD fotodiodas, kurio jautrumas apie 50 A/W (Kurtti et al., 2017).

Svarbus imtuvo reikalavimas yra išlaikyti optinio impulso kylantį frontą. Status kylantis frontas pasižymi mažesnėmis laiko virpėjimo ir laiko eigos paklaidomis, kitaip tariant, gaunamas didesnis atstumo matavimo tikslumas. Siųstuvo generuojamo impulso frontas yra apie 1 ns, taigi, reikalinga imtuvo dažnių juosta apskaičiuojama pagal 18 formulę:

$$BW \approx \frac{0{,}35}{t_r} = \frac{0{,}35}{1 * 10^{-9}} = 350\ MHz. \tag{18}$$

Griūtinio fotodiodo veikimui yra reikalinga aukšta įtampa (paprastai 100-200V), prie kurios fotodiodas yra jungiamas atbuliniu rėžimu. Ši aukšta įtampa sukuria sąlygas atsirasti vidiniam fotodiodo stiprinimo efektui arba kitaip griūtiniam efektui, kurio stiprinimas M gali siekti 100 kartų. Fotonas patekęs į nuskurdintą sritį sukuria elektronų ir skylių poras, kurios yra įgreitinamos elektrinio lauko, kurį sukuria aukšta įtampa. Jeigu šis įgreitinimas yra pakankamai didelis, krūvininkai sužadina naujas elektronų ir skylių poras, kurios, susidurdamos su atomais, sukuria naują elektronų ir skylių porą. Procesui kartojantis yra sukuriamas griūtinis efektas. Taip gaunamas stiprus elektros srovės išaugimas (Receiver et al., 2012).

3.3 paveiksle pateikiama griūtinio fotodiodo multiplikacijos kreivė. U_r/U_{BR} – tai santykis tarp atbulinės diodo įtampos ir diodo pramušimo įtampos. Kaip matome, elektronų multiplikacijos kreivė didėja eksponentiškai.



3.3 pav. APD multiplikacijos kreivė

Fotodiodo MTAPD-07-016 specifikacijos:

- Bangos ilgis: 905 nm;
- Spektrų juosta: 400 nm ~ 1100 nm;
- Jautrumas: 55 A/W @ 905 nm;
- Atsako laikas: 600 ps;
- Aktyvus plotas: Φ500 µm;
- Darbinė įtampa: 80-200 V.

Norint įvertinti, ar imtuvas yra pakankamai jautrus ir kokį maksimalų atstumą pavyks išmatuoti, galima atlikti preliminarų skaičiavimą remiantis 19 formule:

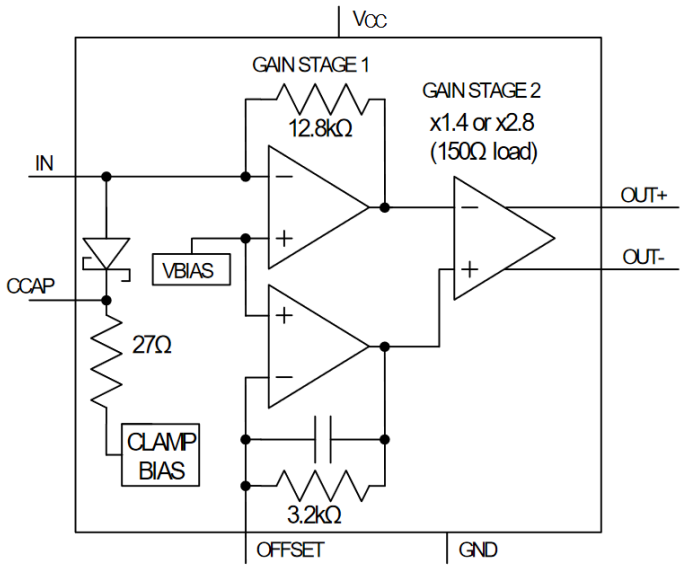
$$P_r = \frac{P_t * \tau_T * \tau_R * \rho * r^2 * \cos(\theta)}{L^2} = \frac{90 * 0.9 * 0.9 * 0.1 * 0.0256 * 1}{1000^2} = 186{,}62nW, \quad (19)$$

čia $P_t -$ siųstuvo galia; τ_T – siųstuvo optikos pralaidumas; τ_R – imtuvo optikos pralaidumas; ρ – matuojamo paviršiaus atspindėjimo koeficientas; r – imtuvo optikos efektinis spindulys; L – atstumas iki matuojamo paviršiaus; θ – atspindžio kampas.

Žinant fotodiodo jautrumą galima apskaičiuoti jo generuojamą srovę pagal 20 formulę:

$$i_r = P_r * R_0 = 186{,}62 * 10^{-6} * 55 = 10{,}26\ \mu A. \quad (20)$$

Kitas svarbus imtuvo komponentas yra stiprintuvas. Anksčiau buvo aptarta, kad lazerinių matuoklių imtuvuose gautą fotodiodo srovę paversti į įtampą ir sustiprinti yra naudojami transimpedansiniai stiprintuvai. Šiame darbe yra naudojamas MAX40659 stiprintuvas, kuris yra specializuotas lazerinių matuoklių imtuvams. Jis pasižymi: žemu triukšmu 40 nA_{RMS}, 36 kartų stiprinimu, įėjimo srovės ribojimu iki 100 mA. Taip pat, šio stiprintuvo dažnių juosta prasideda nuo 360 MHz, o tai atitinka projektuojamo imtuvo dažnių juostos reikalavimą. Dar vienas svarbus privalumas - šio stiprintuvo išėjimas yra diferencinis, o tai padidina atsparumą įvairiems trikdžiams. Toliau pateiktame 3.4 pav. matome vidinę stiprintuvo sandarą su įėjimo srovės ribojimo grandine, pirmąją stiprinimo pakopą, stiprinančią signalą 12,8 karto, ir antrąją stiprinimo pakopą, kuri stiprina signalą 2,8 karto. Bendras stiprinimas ~36 kartai (Maxim Integrated Products, 2018).



3.4 pav. MAX40659 supaprastinta sandaros schema

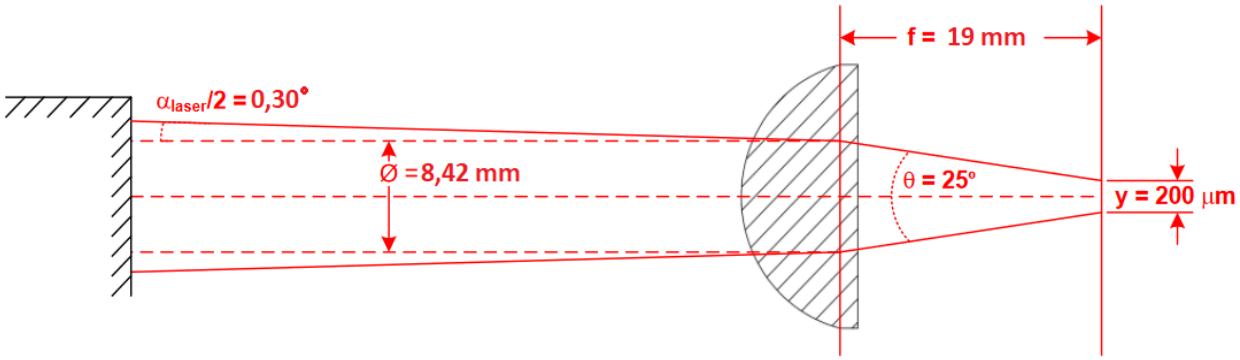
Žinant kokią srovę imtuve generuoja fotodiodas ir žinant transimpedansinio stiprintuvo stiprinimą, galima apskaičiuoti, kokią signalo amplitudę turėsime pirmoje imtuvo pakopoje naudojant 21 formulę:

$$V_r = i_r * R_f = 12{,}26 * 10^{-6} * 36 * 10^3 = 0{,}44\ V. \quad (21)$$

Imtuvo priimamo signalo skaičiavimai yra preliminarūs, nes realiomis sąlygomis matuojamą atstumą stipriai nulemia paviršiaus savybės, šviesos pluošto suderinimas. Tačiau, atlikus šiuos skaičiavimus matome, kad optimaliomis sąlygomis galima gauti išmatuojamą signalo lygį.

3.3. Optinių elementų pasirinkimas

Lazerinis diodas dėl savo vidinės konstrukcijos skleidžia šviesą, kuri stipriai diverguoja vertikalia ašimi ir tampa elipsės formos. Šviesa per trumpą atstumą išsisklaido į didelį plotą, todėl optinis signalas greitai praranda galingumą. Šiai problemai spręsti yra naudojamas optinis lęšis, kurio grafinis atvaizdavimas yra pateiktas 3.5 paveiksle. Kolimuoto šviesos spindulio diametras yra apskaičiuotas pagal 22 formulę.



3.5 pav. Lazerio šviesos kolimavimo lęšis

$$\emptyset laser = 2 * f * \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) + y = 2 * 19 * tan\left(\frac{25}{2}\right) + 200 * 10^{-6} = 8{,}42\ mm, \quad (22)$$

čia Ølaser – kolimuoto spindulio diametras; f – lęšio židinio nuotolis; y – diodo emiterio plotis.

Idealiu atveju šviesio forma turėtų nekisti atstumo atžvilgiu, tačiau realiomis sąlygomis spindulys plečiasi tam tikru kampu, kuris apskaičiuojamas pagal 23 formulę:

$$\alpha_{laser} = 2 * \tan^{-1}\left(\frac{y}{2*f}\right) = 2 * \tan^{-1}\left(\frac{200*10^{-6}}{2*19*10^{-3}}\right) = 0{,}60°, \quad (23)$$

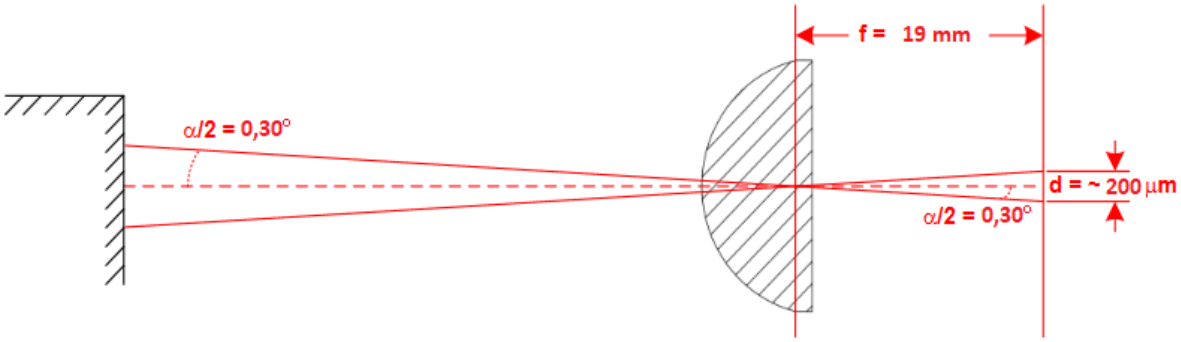
čia α_{laser} – divergavimo kampas.

Naudojantis šiuo lęšiu šviesa yra kolimuojama į 8,42 mm diametro elipsę, kuri diverguoja 0,60° kampu. Naudojantis 24 formule yra apskaičiuojamas spindulio diametras 5 metrų atstumu.

$$D = \tan(\alpha_{laser}) * L = \tan(0{,}60) * 5000 = 52\ mm, \quad (24)$$

čia D – lazerio šviesos diametras.

Apskaičiavus šviesos spindulio diametrą, esantį 5 metų atstumu, ir žinant optinio imtuvo aktyvų plotą, galima apskaičiuoti imtuvo lęšį. Svarbu, kad imtuvo lęšio matymo laukas būtų pakankamas surinkti atsispindėjusiai šviesai. Imtuvo matymo laukas grafiškai pavaizduotas 3.6 paveiksle.



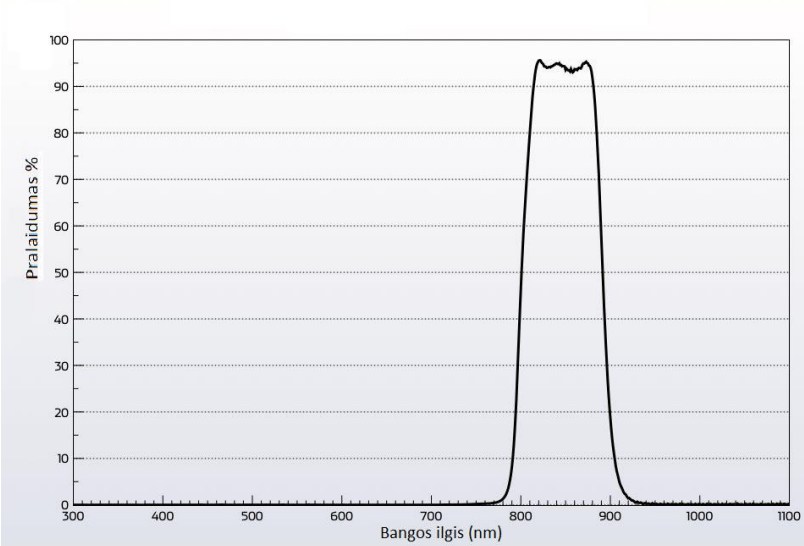
3.6 pav. Imtuvo fokusavimo lęšis

Žinant matymo kampą ir atstumą iki kliūties yra apskaičiuojamas lęšio matymo laukas pagal 25 formulę.

$$D = \tan(\alpha) * L = 0{,}136 * 5000 = 52\ mm, \tag{25}$$

čia D – lęšio matymo laukas (Texas Instruments, 2017).

Griūtinis foto diodas, kuris yra naudojamas imtuve, pasižymi maksimaliu jautrumu 905 nm bangos ilgio šviesai. Šis fotodiodas gali reaguoti į įvairius šviesos šaltinius, todėl sumažėja imtuvo jautrumas išsiųstam lazeriniam impulsui. Šiai problemai spręsti yra naudojamas optinis filtras, jo pralaidumo juosta yra pateikta 3.7 paveiksle. Šiame paveiksle matome, kad filtras 905 nm bangos ilgio šviesą praleidžia apie 95 %. Kitų bangos ilgių šviesa yra stipriai slopinama.

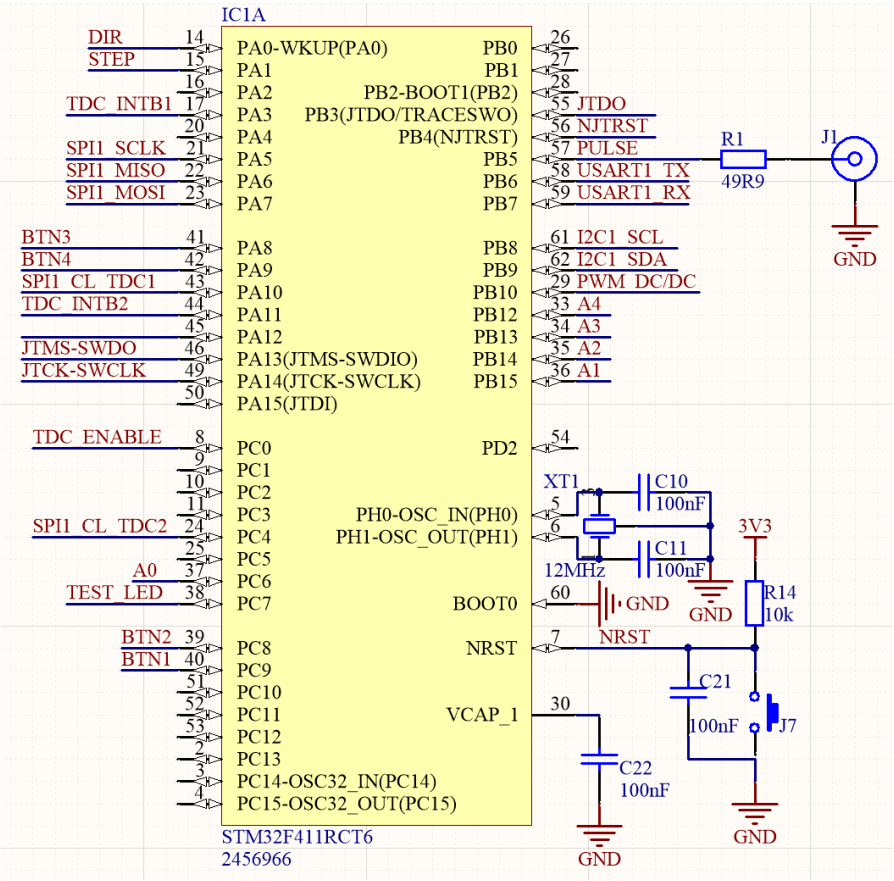


3.7 pav. Optinio filtro pralaidumo juosta

4. ĮRENGINIO PRINCIPINĖS ELEKTRINĖS SCHEMOS SUDARYMAS

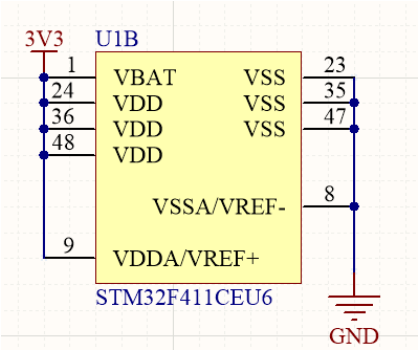
Šiame skyriuje yra apžvelgiamas elektrinės principinės schemos sudarymas ir paaiškinamas veikimo principas. Schema yra aiškinama atskirais segmentais, iš kurių ji sudaryta. Schemai sudaryti naudota „Altium Designer 20“ programinė įranga.

STM32F411RCT6 mikrovaldiklio schema yra pateikta 4.1 ir 4.2 pav. Šis mikrovaldiklis yra atsakingas už visas projektuojamo įrenginio logines operacijas. Prie mikrovaldiklio yra prijungtas XT1 12 MHz kvarcinis osciliatorius. C10 ir C11 kondensatoriai kartu su osciliatoriumi sudaro rezonansinę grandinę, taip gaunamas stabilus mikrovaldiklio taktinis dažnis. Prie NRST yra prijungtas R14 rezistorius, kuris palaiko aukštą lygį, nuspaudus J7 mygtuką būsena pakeičiama į žemą ir mikrovaldiklis paleidžiamas iš naujo. C21 kondensatorius skirtas filtruoti aukšto dažnio triukšmus, kad mikrovaldiklis nebūtų paleistas atsitiktinai. J1 koaksialinė jungtis skirta testavimo metu prisijungti prie oscilografo ir stebėti signalo formas. R1 rezistorius skirtas koaksialiniam kabeliui ir signalinės linijos impedansui suderinti, kad dėl aukštų dažnių signalas nebūtų iškraipomas (STMicroelectronics, 2017).



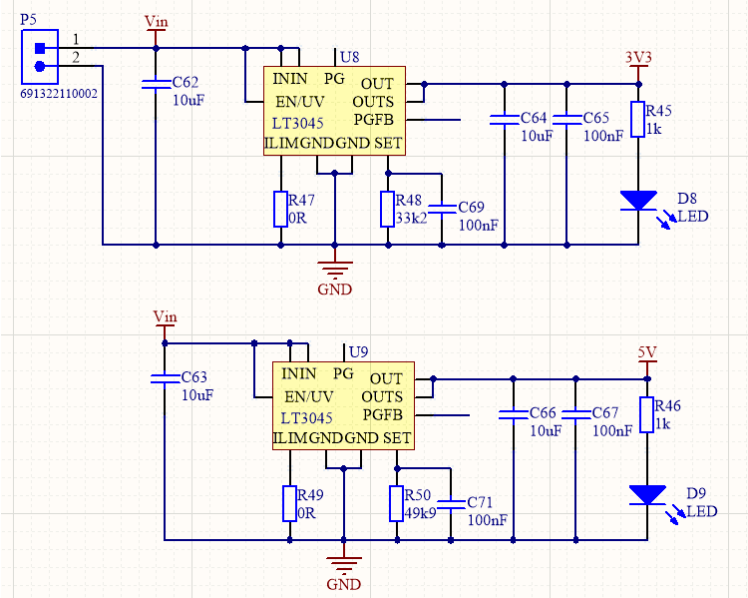
4.1 pav. STM32F411RCT6 mikrovaldiklio schema

IC1 mikrovaldiklio maitinimo prijungimai yra pateikiami 4.2 pav.



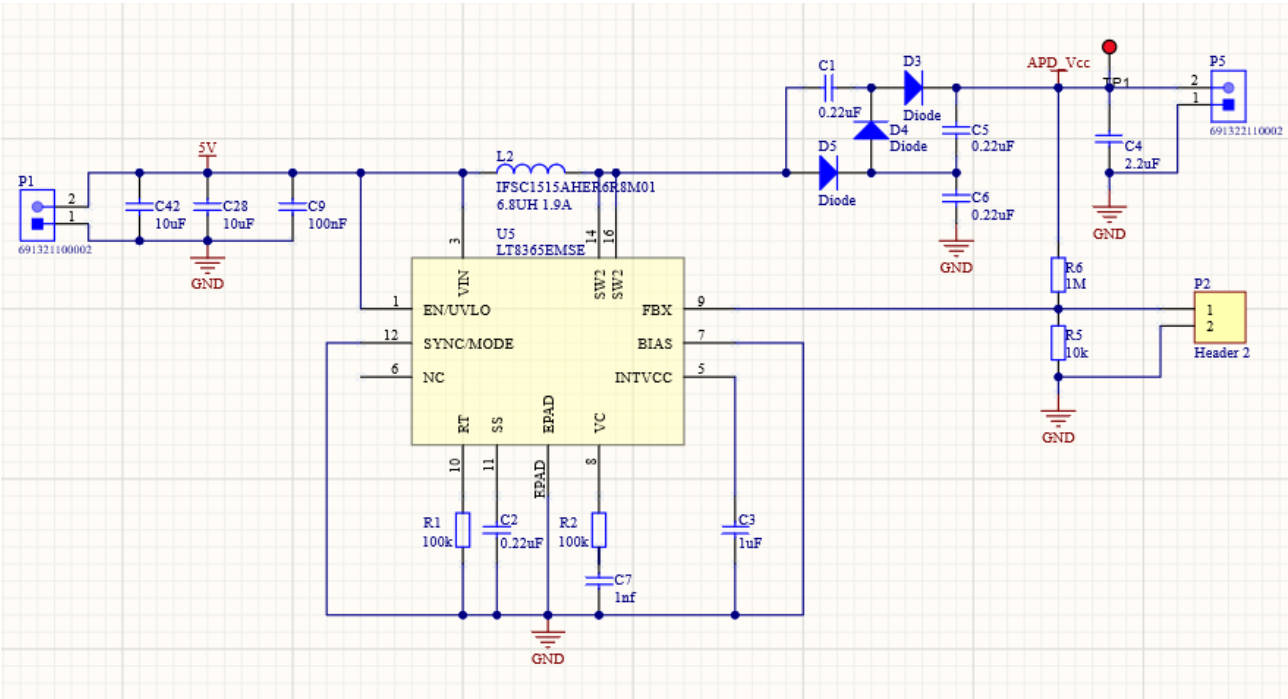
4.2 pav. IC1 mikrovaldiklio maitinimo prijungimai

Įrenginio 5 V ir 3,3 V įtampos maitinimo šaltinių schemos pateikiamos 4.3 paveiksle. U8 ir U9 mikroschemos yra reguliuojamos įtampos šaltiniai su reguliuojamu srovės ribojimu. 4.3 pav**.** matome P5 jungtį, per kurią prie įrenginio prijungiama 6-8 V įtampa. Toliau ši įtampa yra papildomai filtruojama C62 ir C63 kondensatoriais. R47 ir R49 rezistoriai nustato išėjimo srovės ribojimą. Šiuo atveju rezistorių varža yra 0 **Ω**, tai reiškia, kad išėjime nustatyta maksimali įtampos keitiklio srovė. Prie U8 prijungtas R48 rezistorius nustato išėjimo įtampą, taip gauname 3,3 V. Prie U9 prijungtas R50 rezistorius nustato išėjimo įtampą, taip gauname 5 V. C64, C65 kondensatoriai skirti filtruoti ir sudaryti papildomą energijos talpą U8 keitiklio išėjime. C66, C67 kondensatoriai skirti filtruoti ir sudaryti papildomą energijos talpą U9 keitiklio išėjime. Prie keitiklių išėjimų yra prijungti D8, D9 šviesos diodai ir srovės apribojimui skirti R45, R46 rezistoriai (Devices Inc, 2021).



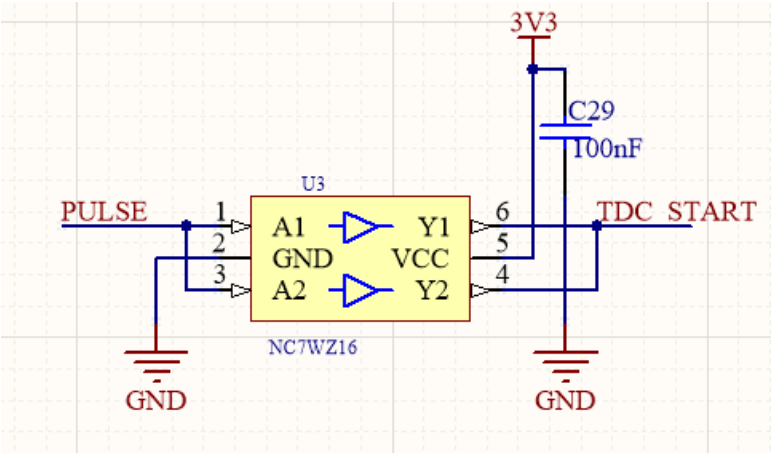
4.3 pav. Įtampos keitiklių schemos

Lazerinio atstumo matuoklio imtuve yra naudojamas griūtinis fotodiodas, kuris reikalauja 180-200 V įtampos. 4.4 paveiksle yra pateikta aukštinamojo įtampos keitiklio schema. Keitiklis maitinamas nuo bendros įrenginio įtampos. C9, C28, C42 kondensatoriai skirti palaikyti keitiklio stabilumą. R1 rezistorius nustato keitiklio dažnį, kuriuo yra valdomas tranzistorius esantis keitiklio viduje. Vidiniam tranzistoriui atsidarinėjant per L2 induktyvumo ritę ima tekėti srovė ir aplink ją susidaro kintamas magnetinis laukas. Užsidarius tranzistoriui, magnetinis laukas ima trauktis indukuodamas srovę ritės apvijose, kuri sukelia įtampos padidėjimą. Toliau induktyvinės ritės sugeneruota įtampa yra papildomai padidinama naudojant įtampos daugintoją. D5, D4, D3 diodai ir C1, C5, C6, kondensatoriai sudaro įtampos aukštintoją, kuris įtampą padidina du kartus. C4 kondensatorius yra energijos rezervas, kuris įkraunamas paaukštinta įtampa. Keitiklio išėjimo įtampos stabilumas yra palaikomas naudojant grįžtamąjį ryšį. R6, R5 rezistoriai sudaro įtampos daliklį, kuris sumažina išėjimo įtampą 10 kartų. Toliau ši įtampa yra perduodama į įtampos keitiklį U5. C2 kondensatorius skirtas „švelnaus įjungimo“ funkcijai. Keitiklio išėjimo įtampos didėjimo sparta kinta priklausomai nuo C2 kondensatoriaus talpos. R2 rezistorius ir C7 kondensatorius sudaro RC grandinę, kuri skirta nustatyti induktyvinės ritės perjungimo srovės ribojimą (Texas Instruments, 2021).



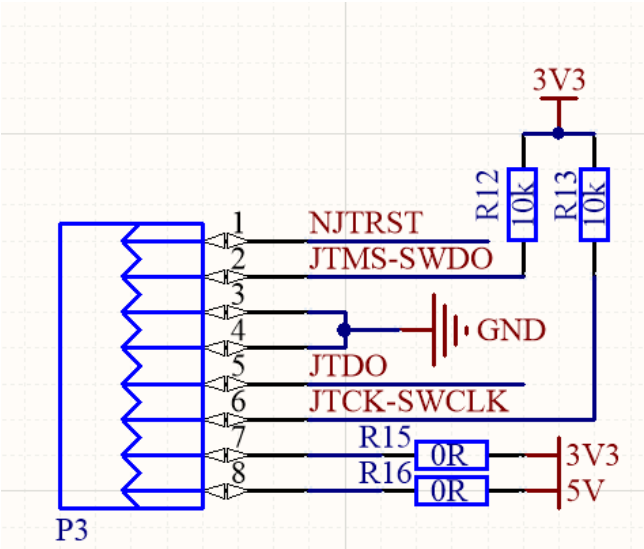
4.4 pav. Impulsinis įtampos keitiklis

Mikrovaldiklio generuojamam impulsiniam signalui stiprinti yra naudojamas neinvertuojantis buferis. Jo schema pateikta 4.5 paveiksle. Prie U3 mikroschemos maitinimo prijungtas C29 kondensatorius skirtas filtruoti maitinimo triukšmus. Signalas, kurį generuoja mikrovaldiklis yra tiekiamas į U3 mikroschemos A1 ir A2 įėjimus ir išėjimuose Y1 ir Y2 gaunamas sustiprintas signalas.



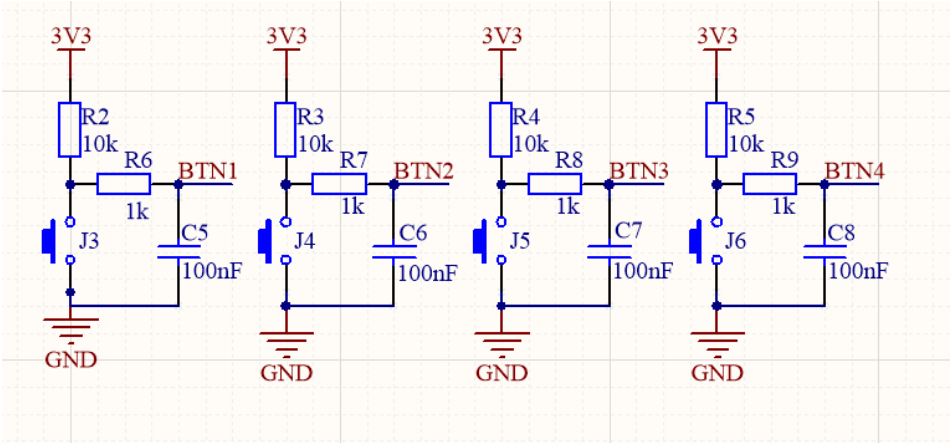
4.5 pav. Buferinis stiprintuvas

Mikrovaldikliui programuoti skirtos jungties schema yra pateikta 4.6 paveiksle. Šioje schemoje pateikti reikalingi signalai „ST-link“ programavimo jungčiai. Taip pat yra galimybė į įrenginį per šią jungtį perduoti 3,3 V arba 5 V įtampą, kad programavimo metu nereikėtų išorinio maitinimo šaltinio. R15 ir R16 rezistoriai leidžia atjungti 3,3 V ir 5 V įtampos maitinimus, kai jie yra nenaudojami. R12 ir R13 rezistoriai palaiko aukštą lygį signalinėse linijose (ON Semiconductor, 2021).



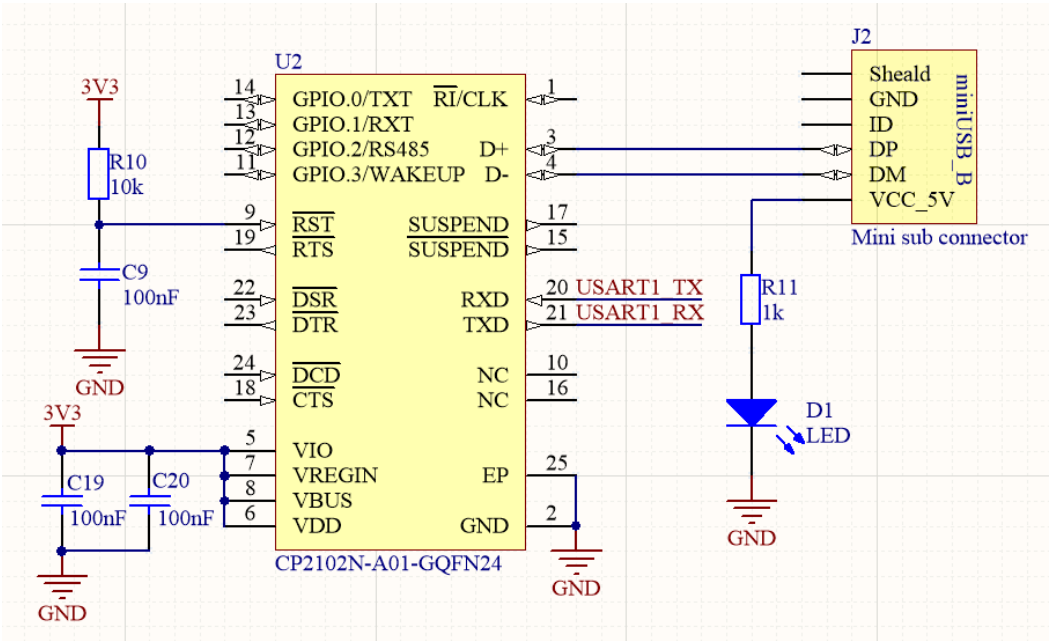
4.6 pav. „ST-link“ programavimo jungtis

Įrenginiui valdyti yra naudojami keturi mygtukai, kurių prijungimo schemos pateiktos 4.7 pav. Iš paveikslo matyti, kad mygtukai per R2 – R5 rezistorius yra prijungti prie 3,3 V įtampos lygio. Nuspaudžiant J3 – J6 mygtukus, per R2 – R5 rezistorius ima tekėti srovė į žemę. R6 – R9 rezistoriai su C5 – C8 kondensatoriais sudaro RC filtrus, skirtus mygtuko įtampos virpesiams filtruoti.



4.7 pav. Mygtukų prijungimo schemos

Atstumo matuoklis turi USB komunikacijos prievadą, jo schema pavaizduota 4.8 paveiksle. U2 mikroschema yra UART sąsajos keitiklis į USB. R10 rezistorius palaiko aukštą lygi RESET prievade. C19 kondensatoriai, skirti filtruoti maitinimo įtampos triukšmus. R11 rezistorius skirtas apriboti srovę šviesos D1 diodui.



4.8 pav. USB sąsajos schema

Matuoklio siųstuvo schema pavaizduota 4.9 paveiksle. Jame matome tranzistoriaus U4 valdiklį. Jo maitinimo įtampa yra filtruojama nuo triukšmų naudojant L3 induktyvumo ritę ir C32, C33 kondensatorius. Naudojamas lazerinis D4 diodas yra impulsinis. Tai reiškia, kad jis sugeba generuoti didelės galios optinį signalą, tačiau per labai trumpą laiką, iki 100 ns trukmės. Mikrovaldikliu tokios trukmės impulsus generuoti neįmanoma, tačiau tranzistoriaus U4 valdiklis savo viduje turi integruotą loginį IR komponentą su invertuotu įėjimu. Mikrovaldiklio generuojamas impulsas yra paduodamas į IN+ neinvertuotą įėjimą. Antras signalas gaunamas per R24 potenciometrą įkraunant C37 kondensatorių. Taip gaunamas pavėlintas signalas, kuris paduodamas į IN- invertuojantį įėjimą. Potenciometras naudojamas norint derinti impulso trukmę. U4 komponentas atlieka loginę daugybą ir išėjime gauname aukštą lygį tol, kol įėjimo impulsų įtampos nepasiekė IC3 įėjimo ribinės įtampos. Siekiant apskaičiuoti RC grandinės signalo pavėlinimą yra pasirenkamas 10 pF talpos kondensatorius. Remiantis 26 formule yra apskaičiuojama rezistoriaus vertė, kuri reikalinga įkrauti kondensatorių iki IC3 įėjimo ribinės įtampos per 10 ns.

$$R = \frac{t}{-\ln\left(\frac{V - V_p}{V}\right) * C} = \frac{10 * 10^{-9}\, s}{-\ln\left(\frac{5\,V - 2{,}5\,V}{5\,V}\right) * 10 * 10^{-12} F} = 1442\ \Omega, \qquad (26)$$

čia V – signalo įtampa; V_p – įėjimo ribinė įtampa; C – vėlinimo kondensatoriaus talpa; R - kondensatoriaus įkrovimo varža.

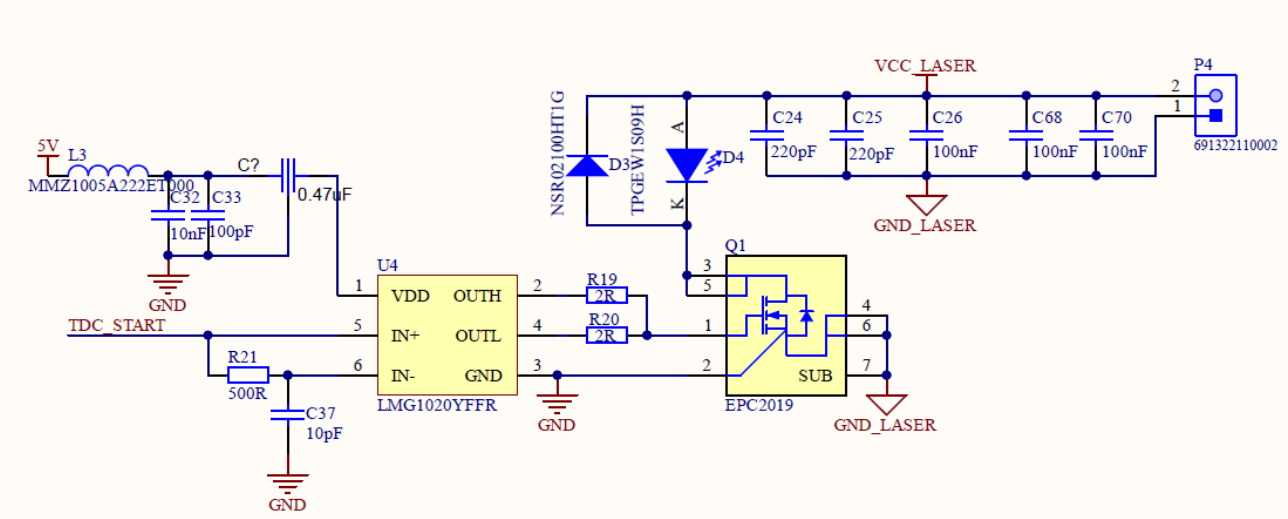
Lazerinio diodo valdymo schema pateikta 4.9 paveiksle. Schemoje yra tranzistoriaus U6 valdiklis, pasižymintis galimybe valdyti tranzistorių minimaliais 1 ns pločio impulsais. Valdiklio maitinimas nuo triukšmo yra filtruojamas C47, C48 kondensatoriais ir C46 filtru. Q2 lazerinio diodo valdymui yra naudojamas Galio Nitrido EPC2019 lauko tranzistorius, kuris, lyginant su silicio tranzistoriais, pasižymi mažesne užtūros talpa. Šios talpos įkrovimo metu iš valdiklio yra pareikalaujamas didelis srovės kiekis. Dėl staigaus talpos įkrovimo ir plokštėje esančių parazitinių induktyvumų užtūroje susidaro įtampos svyravimai. Dėl to gali įvykti užtūros pramušimas bei padidėja energijos nuostoliai. Pagal U6 valdiklio gamintojo rekomendacijas yra naudojami R19, R20 rezistoriai, kurie sulėtina tranzistoriaus talpos įkrovimą.

Dėl parazitinių plokštės bei komponentų induktyvumų užsidarant Q1 tranzistoriui ant lazerinio D1 diodo susidaro priešingo poliarumo įtampos šuolis, dėl šios priežasties D4 diodas yra skirtas apsaugoti lazerinį Q2 diodą. Dėl didelės lazerinio diodo impulsinės srovės, kuri gali siekti 30 A, reikalingas C24 - C26, C68, C70 kondensatorių bankas. Pagal 27 formulę yra apskaičiuojama reikalinga talpa.

$$C = \frac{I * t}{U} = \frac{30 * 10 * 10^{-9}}{2} = 150\ nF, \qquad (27)$$

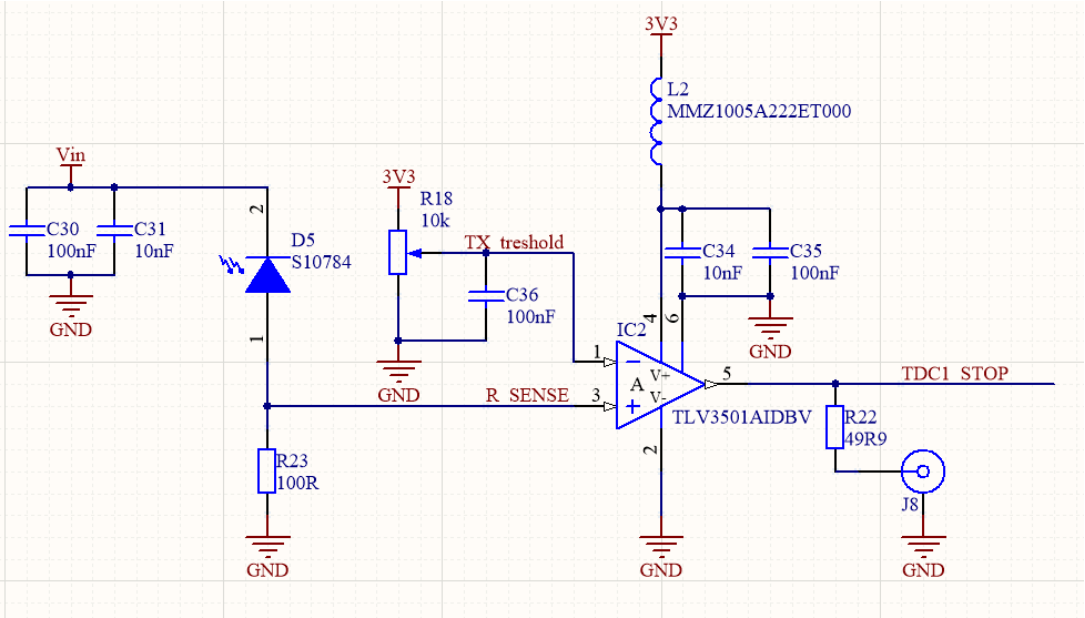
čia C – kondensatorių talpa; I – srovė, tekanti per lazerinį diodą; U - rekomenduojamas įtampos svyravimas; t – impulso trukmė.

Siekiant sumažinti kondensatorių savitąją varžą bei pagerinti jų darbą prie aukštų dažnių yra panaudota grupė žemos talpos kondensatorių, kurių suma sudarys pakankamą talpą.



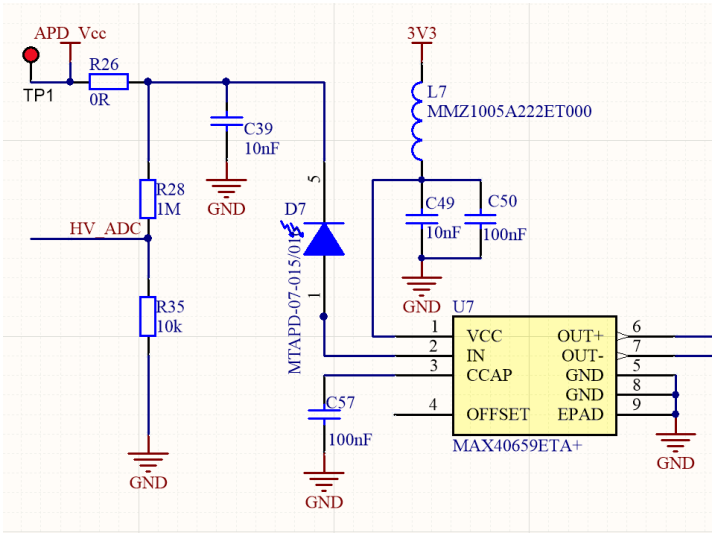
4.9 pav. Lazerinio matuoklio siųstuvo schema

Schema, skirta lazerinio diodo įsijungimo aptikimui ir „TDC1_STOP“ signalo formavimui yra pateikta 4.10 paveiksle. Lazeriniam D4 diodui įsijungus jis sugeneruoja šviesos impulsą, kuris priverčia tekėti srovę per D5 fotodiodą. Ši srovė sudaro įtampos kritimą ant R23 rezistoriaus. IC2 komparatorius palygina šią įtampą su jam nustatyta atramine įtampa, kuri yra nustatoma R18 potenciometro. C30, C31 kondensatoriai skirti filtruoti fotodiodo maitinimą, taip pat, sudaryti rezervinį srovės šaltinį. C36 kondensatorius filtruoja atraminę įtampą. IC2 komparatoriaus maitinimo įtampa nuo triukšmo yra filtruojama naudojant L2 induktyvumo ritę ir C34, C35 kondensatorių. R22 rezistorius skirtas suderinti impedansui su J8 jungtimi, kuri skirta stebėti signalams testavimo metu. Komparatoriaus išėjime gaunamas loginio lygio impulsas, kai R23 įtampos kritimas tampa didesnis, nei nustatyta atraminė įtampa.



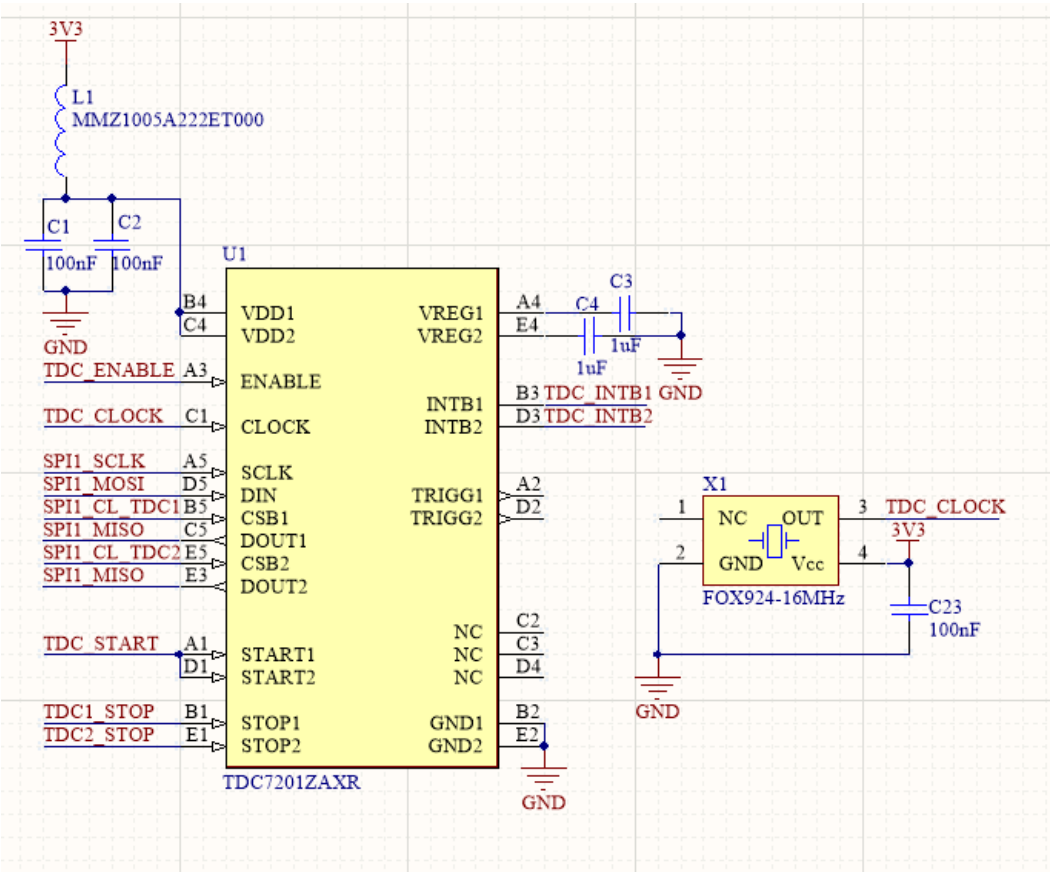
4.10 pav. Lazerinio diodo impulso detektorius

Esminė imtuvo schema pavaizduota 4.11 paveiksle. Šioje schemoje matome D7 griūtinį fotodiodą, jo maitinimo įtampa yra papildomai filtruojama C39 kondensatoriumi. R26 rezistorius naudojamas norint atjungti diodo maitinimo įtampą. R28 ir R35 rezistoriai sudaro įtampos daliklį, taip sudaroma galimybė mikrovaldikliui, naudojant vidinį ADC, stebėti D7 diodo maitinimo įtampą. Fotodiodo generuojamai srovei versti į įtampą yra naudojamas U7 transimpedansinis stiprintuvas. Jo maitinimo įtampa nuo triukšmų yra filtruojama naudojant L7 induktyvumo ritę ir C49, C50 kondensatorius. U7 stiprintuvas savo išėjime generuoja diferencinės įtampos signalą, kuris yra perduodamas į įtampos komparatorių.



4.11 pav. Lazerinio impulso imtuvas

Atstumo matuoklio veikimas remiasi laiko matavimu, pagal kurį gaunamas matuojamas atstumas. Schemoje, pateiktoje 4.12 paveiksle, matome U1 komponentą TDC (angl. *time to digital converter*). Šis komponentas pasižymi tuo, kad savo viduje jis turi du nepriklausomus TDC, tai suteikia galimybę matuoti laiką diferenciniu būdu, t. y. atimant vieno pamatuotą laiką iš kito. U1 komponento maitinimas filtruojamas naudojant L1 induktyvumo ritę ir C1, C2 kondensatorius. U1 komponentas savo viduje turi įtampos reguliatorių, jo stabilumui užtikrinti naudojami C3, C4 išoriniai kondensatoriai. Gretimai matome taktinio 16 MHz dažnio X1 generatorių. Laikmačiai komunikaciją su mikrovaldikliu vykdo per SPI sąsają.



4.12 pav. Laikmačio schema

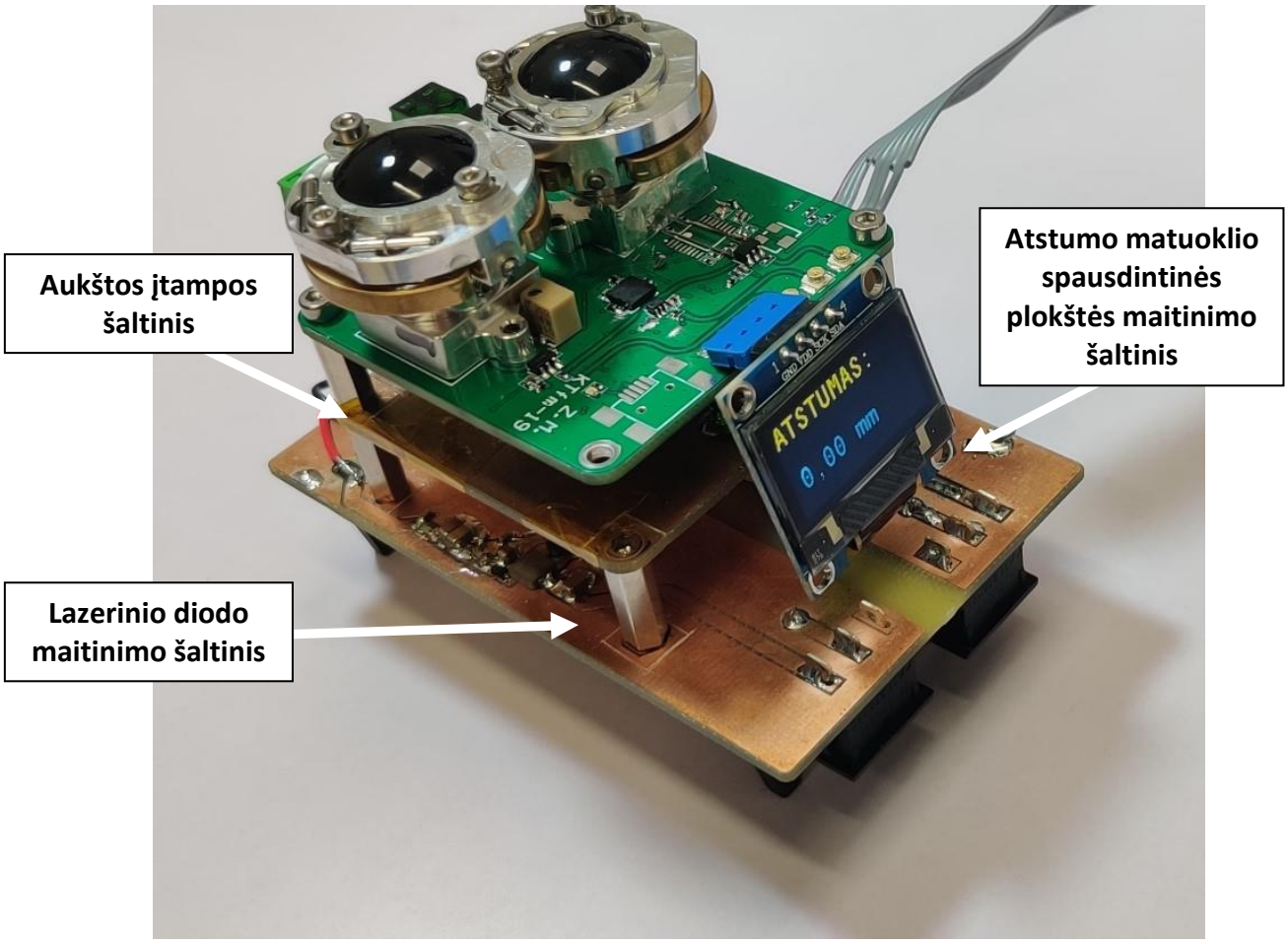
5. SPAUSDINTINĖS PLOKŠTĖS PROJEKTAVIMAS

Ankstesnėse dalyse buvo aptarta, kad projektuojamo įrenginio siųstuvas turės generuoti didelės galios ir stačių kylančių frontų impulsus. Taip pat buvo išsiaiškinta, kad dėl stačių kylančių frontų signalų dažniai šiame įrenginyje siekia apie 1 GHz. Elektroniką, kuri dirba didesniuose dažniuose, nei 100 MHz, galima priskirti RF elektronikai. Tokios elektronikos spausdintinių plokščių dizainas kelia daugiau reikalavimų lyginant su žemo dažnio elektronika. Projektuojant įrenginį svarbu remtis naudojamų komponentų gamintojų rekomendacijomis. Toliau bus apžvelgiamos svarbiausios projektuojamos spausdintinės plokštės vietos.

Dėl keliamų aukštesnių reikalavimų buvo nuspręsta projektuoti 4 sluoksnių spausdintinę plokštę. Pirmame, viršutiniame sluoksnyje suprojektuota signaliniai takeliai ir žemės poligonas. Antrame, vidiniame sluoksnyje yra vientisas žemės poligonas, kuris, naudojant vijas, yra sujungiamas su visuose sluoksniuose esančiais žemės poligonais. Tokiu būdu yra sutrumpinami srovės grįžimo keliai, sumažinami spinduliuojami triukšmai. Trečias, vidinis sluoksnis yra skirtas išvedžioti komponentų maitinimo takelius. Ketvirtas, apatinis sluoksnis skirtas išvedžioti signalinius takelius ir žemės poligonus. 5.1 paveiksle matomos dvi srovės kilpos, kurių žemės yra atskirtos viena nuo kitos. EPC2019 tranzistorius turi specialų Kelvino kontaktą, skirtą užtūros srovei grąžinti į U4 valdiklį, taip padaroma pereinant į apatinį žemės sluoksnį ir sudarant artimiausią grįžimo kelią. Kita srovės kilpa yra lazerinio diodo. Šioje kilpoje per trumpą laiką prateka apie 30 A srovė.

5.1 pav. Spausdintinės plokštės siųstuvo dalis

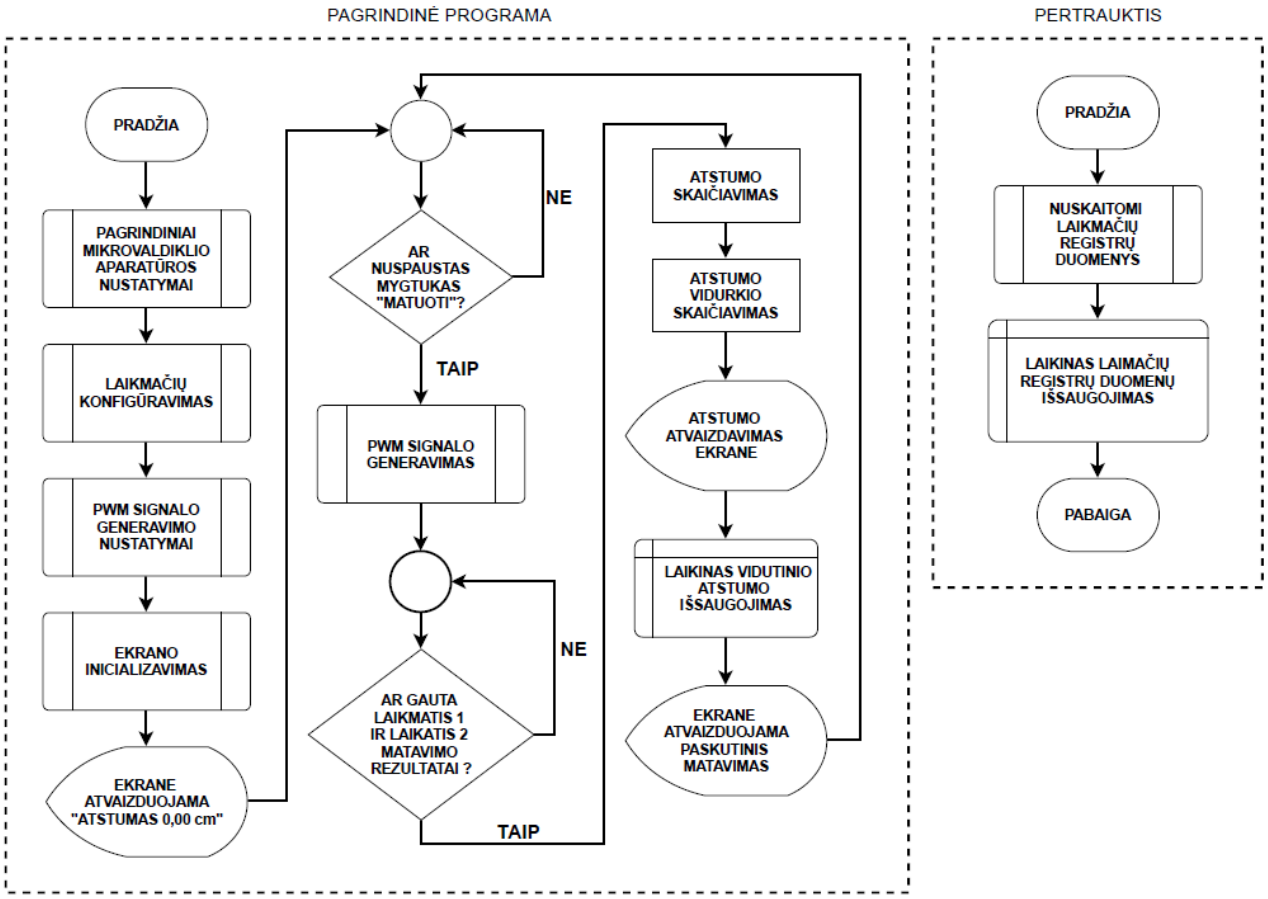
5.2 paveiksle pavaizduotas suprojektuotas ir pagamintas lazerinis atstumo matuoklis. Paveiksle galime pastebėti, kad įrenginį sudaro trys atskiros spausdintinės plokštės. Projektuojant atstumo matuoklį buvo nuspręsta impulsinius įtampos šaltinius projektuoti ant atskirų spausdintinių plokščių. Tokiu būdu yra sumažinama impulsinių matuoklių generuojamų elektrinių triukšmų įtaka jautriems lazerinio matuoklio komponentams. Šiame paveiksle galima pastebėti suprojektuotas ir pagamintas optinių lęšių derinimo mechanines detales.



5.2 pav. Pagamintas lazerinis atstumo matuoklis

6. PROGRAMOS MIKROVALDIKLIUI SUDARYMAS

Lazerinio atstumo matuoklio programa veikia pagal 6.1 pav. pateikiamą blokinę schemą. Programos veikimas prasideda nuo mikrovaldiklio aparatūros nustatymo. Pasirenkant aparatūros nustatymus yra sukonfigūruojami mikrovaldiklio prievadai ir naudojamų sąsajų nustatymai. Toliau atliekamas laikmačių konfigūravimas, inicijuojamos pertrauktys. Atliekamas ekrano inicializavimas ir į ekraną išvedamas tekstas „Atstumas 0,00 cm“. Toliau yra tikrinama sąlyga, ar nuspaustas matavimo pradžios mygtukas. Jeigu sąlyga tenkinama, pradedamas generuoti PWM signalas lazeriniam diodui. Laiko matavimo duomenys yra gaunami pertraukties, kurią sukelia laikmatis, metu. Įvykus pertraukčiai yra nuskaitomi ir laikinai išsaugomi laikmačių registrų duomenys. Matuokliui gavus abiejų laikmačių duomenis yra apskaičiuojamas atstumas. Matuoklio atstumo rezultatas yra pateikiamas atliekant slankų vidutinės vertės skaičiavimą.



6.1 pav. Lazerinio atstumo matuoklio programos blokinė schema

7. EKSPERIMENTINĖ DALIS

Pradedant eksperimentinę dalį, kurioje bus nustatomi kuriamo prietaiso parametrai bei atliekami jų suderinimai, reikėtų įvertinti reikalingos įrangos specifikacijas. Tikslingam prietaiso veikimui reikalingi aukšto dažnio signalai, t. y. virš 100 MHz. Siųstuve generuojamo impulso kylančio fronto trukmė apytiksliai 1 ns. Iš šio parametro galime įvertinti, kokia reikalinga minimali matavimo prietaisų pralaidumo juosta. Minimali pralaidumo juosta apskaičiuojama pagal 28 formulę:

$$\Delta f = \frac{0{,}35}{T_r} = \frac{0{,}35}{1 * 10^{-9}} = 350\ MHz, \tag{28}$$

čia Δf – pralaidumo juosta; T_r - kylančio fronto trukmė matuojant nuo žemiausio taško, kuris yra 10 % nuo apačios iki 90 % fronto.

Apskaičiavę minimalią reikalingą pralaidumo juostą matome, kad matavimo prietaisai turi būti minimaliai 350 MHz norint matyti neiškreiptus signalus.

7.1. Matavimo prietaisai

7.1.1. Oscilografas

Oscilofrafas – vienas pagrindinių įrankių testuojant elektronikos prietaisus. Šio tyrimo metu buvo pasirinkta naudotis „Tektronix DPO400“ oscilografu, kuris pasižymi 1 GHz pralaidumo juosta ir 5 GS/s diskretizavimo dažniu. Šio prietaiso esminiai parametrai daugiau nei pakankami norint stebėti numatytos trukmės elektrinius signalus.

7.1.2. Oscilografo zondas

Oscilografo zondas yra kitas svarbus įrankis naudojantis oscilografą, o jo pralaidumo juosta negali tapti ribojančiu aspektu. Pasirinktas naudoti zondas yra „Tektronix TDP1000“. Tai 1 GHz, 45 V diferencinis zondas.

7.1.3. Vizualizatorius

Lazerinio atstumo matuoklio naudojamo lazerinio diodo bangos ilgis yra 905 nm. Šio bangos ilgio šviesos žmogaus akis matyti negali, o tai apsunkina optinių detalių suderinimo etapą. Dėl šios priežasties yra naudojamas „Electrophysics ElekctroViewer 7215“ vizualizatorius. Šis prietaisas ne

tik suteikia galimybę matyti IR bangos ilgio šviesą, bet ir apsaugo akis nuo tiesioginių šviesos spindulių.

7.1.4. Optinis detektorius

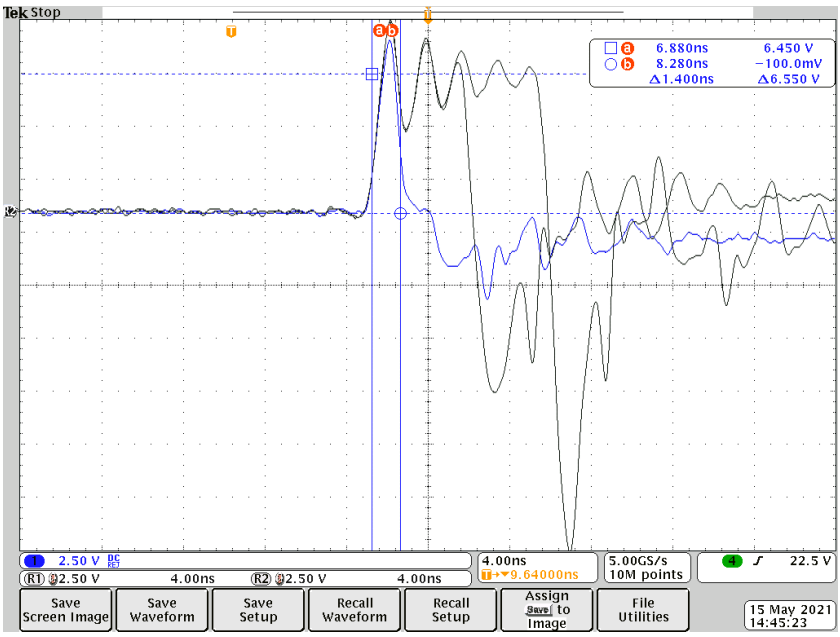
Norint patikrinti ir įvertinti siųstuvo generuojamo šviesos impulso parametrus reikalingas optinis detektorius, kuris šviesos impulsą verstų į elektrinį signalą. Dėl šios priežasties yra naudojamas THORLABS DET10A/M fotodiodinis detekorius. Tai silicio fotodiodo imtuvas, kurio bangos ilgio diapazonas yra nuo 200 nm iki 1100 nm ir fronto trukmė iki 1 ns.

7.2. Siųstuvo tyrimas

Viena iš pagrindinių projektuojamo įrenginio dalių yra siųstuvas, kuris atsakingas už optinio signalo suformavimą. Optinio signalo kylantis frontas yra vienas iš esminių matuoklio tikslumą apsprendžiančių parametrų. Optinio signalo galingumas apsprendžia maksimalų matuojamą atstumą. Šioje dalyje bus atliekami elektrinio impulso charakteristikų, kurios nulemia optinio impulso charakteristikas, tyrimas.

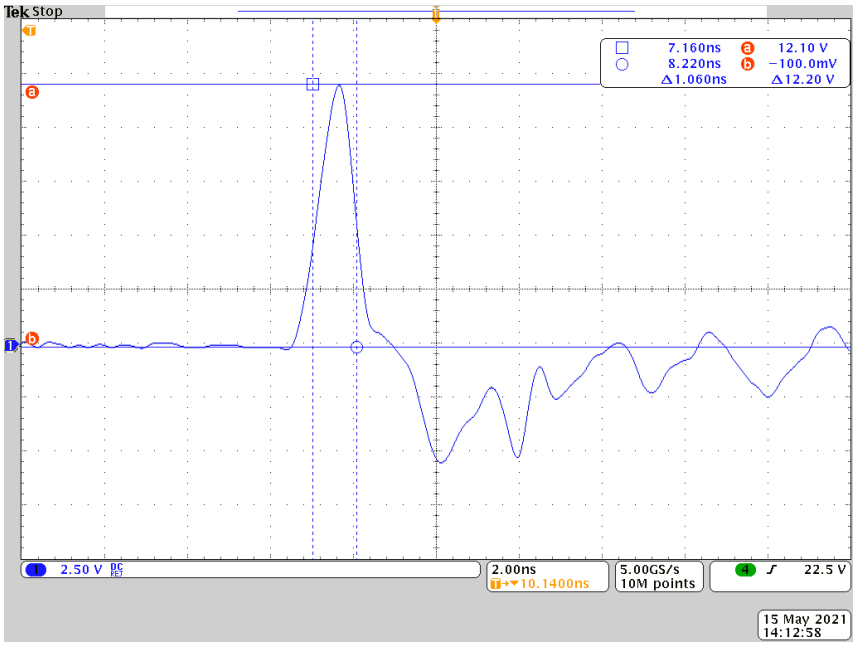
7.2.1. Siųstuvo elektrinio impulso charakteristikų tyrimas

Pirmasis tikrinamas parametras – lazerinio diodo elektrinio impulso charakteristikos, nuo kurių tiesiogiai priklauso generuojamo šviesos signalo ir optinės charakteristikos. 7.1 paveiksle pateikiami trys vienodų amplitudžių apie 6,5 V, bet skirtingų impulsų pločio, elektrinių impulsų oscilogramos. Galime pastebėti, kad didėjant impulso pločiui proporcingai didėja neigiamas viršįtampis. Ypatingai svarbu, kad ši įtampa neviršytų naudojamų komponentų specifikacijų ir komponentai nedegraduotų. Impulso pločiui esant apie 8,3 ns, viršįtampis siekia apie 16 V. Sutrumpinus impulso plotį iki 1,2 ns viršįtampis sumažėja iki ~ 2,5 V. Sumažinus impulso ploti galima saugiai padidinti lazerinio diodo maitinimo įtampą, taip gaunant didesnės galios optinį impulsą ir nesukeliant streso elektronikos komponentams.



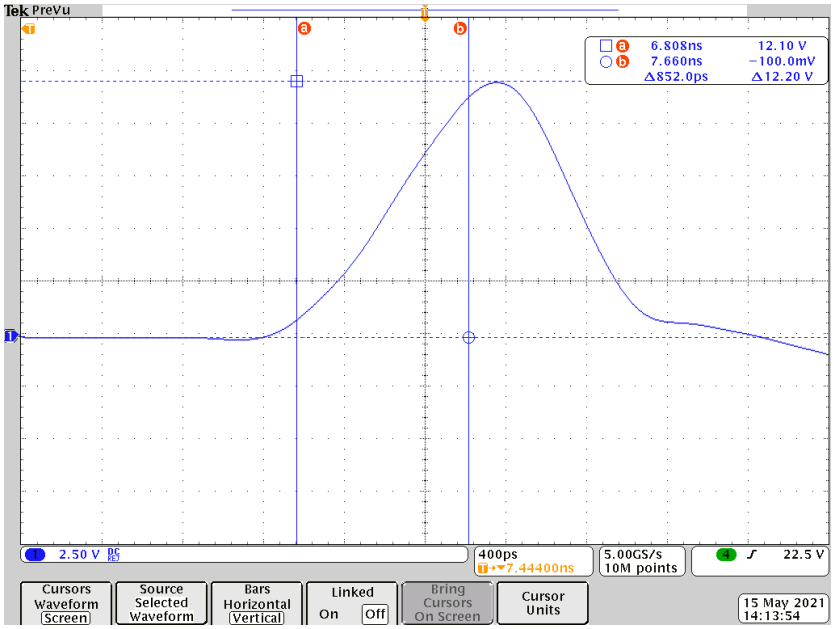
7.1 pav. SPL PL90_3 lazerinio diodo elektrinių impulsų oscilogramos

Remiantis lazerinio diodo techniniu aprašu, SPL PL90_3 diodas maksimalią optinę galią pasiekia, kai jo valdoma įtampa yra apie 12 V. 7.2 pav. yra pavaizduotas elektrinis impulsas, kurio plotis – 1 ns, įtampos amplitudė – 12,2 V, neigiamas viršįtampis – apie 5 V.



7.2 pav. SPL PL90_3 lazerinio diodo elektrinio impulso oscilograma

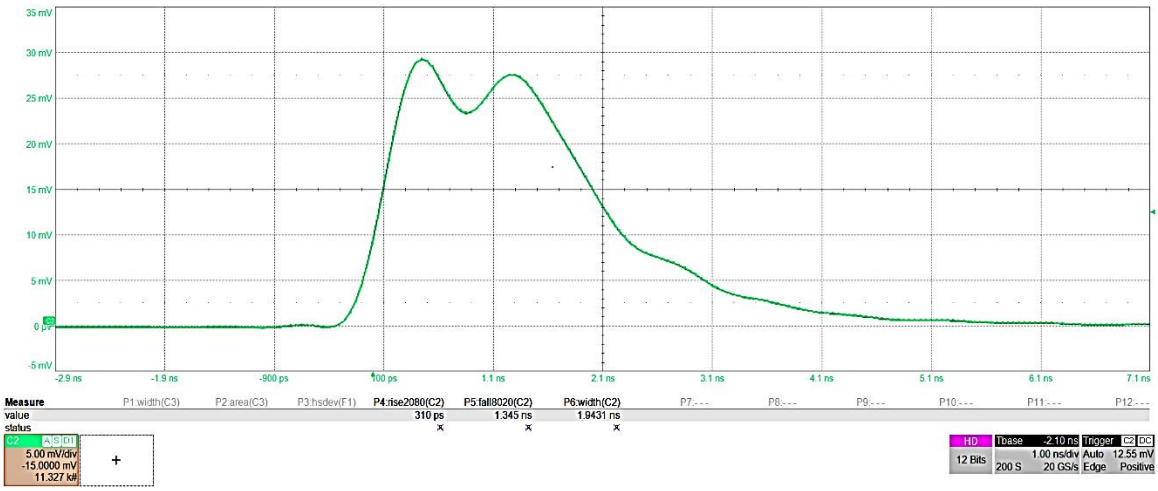
Kitas žingsnis – kylančio fronto trukmės matavimas. 7.3 paveiksle yra pateikiama kylančio fronto oscilograma. Fronto trukmė yra matuojama nuo apačios į viršų atidedant 10 % trukmės ir iki 90 % į viršų. Galime matyti, jog elektrinio impulso kylančio fronto trukmė yra 582 ps.



7.3 pav. SPL PL90_3 lazerinio diodo elektrinio impulso kylančio fronto oscilograma

7.2.2. Optinio impulso tyrimas

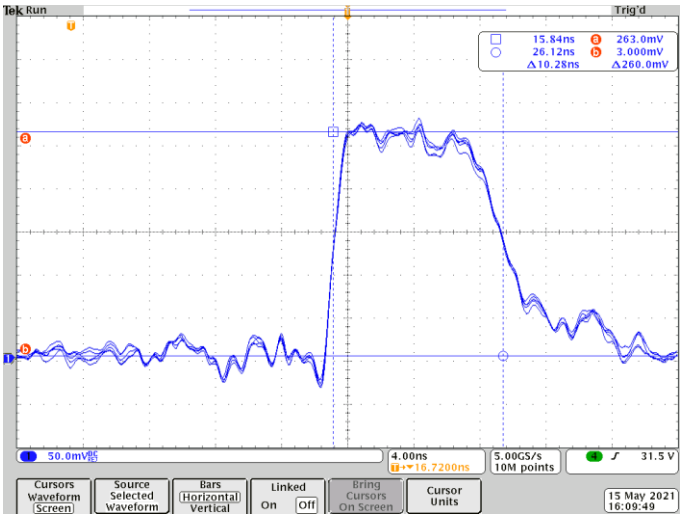
Įsitikinus, kad elektrinio signalo parametrai atitinka užsibrėžtas normas, toliau yra atliekamas optinio signalo tyrimas. Tai yra daroma siųstuvu šviečiant į THORLABS DET10A/M optinį imtuvą ir stebint signalo formą oscilografu. Optinio signalo forma pateikiama 7.4 pav. Šioje oscilogramoje matome optinį impulsą, kurio kylantis frontas yra apie 310 ns, impulso plotis – apie 1,9 ns.



7.4 pav. Optinio signalo oscilograma

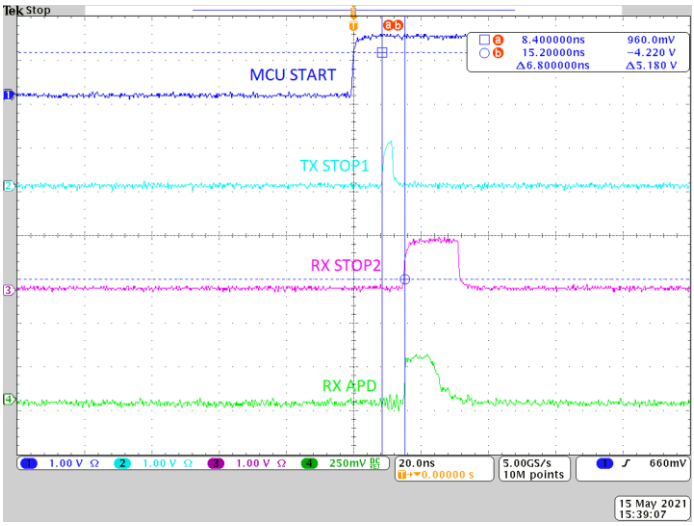
7.3. Imtuvo tyrimas

Kita pagrindinė projektuojamo įrenginio dalis yra imtuvas. Šiame žingsnyje bus atliekama imtuve susiformuojančių elektrinių signalų tyrimas. Atliekant šią tyrimo dalį matuoklis buvo nukreiptas į stipriai atspindintį paviršių. 7.5 pav. imtuve suformuoto elektrinio impulso oscilogramą. Impulso amplitudė 260 mV, kylantis frontas – apie 1,2 ns.



7.5 pav. Imtuve suformuoto elektrinio impulso oscilograma

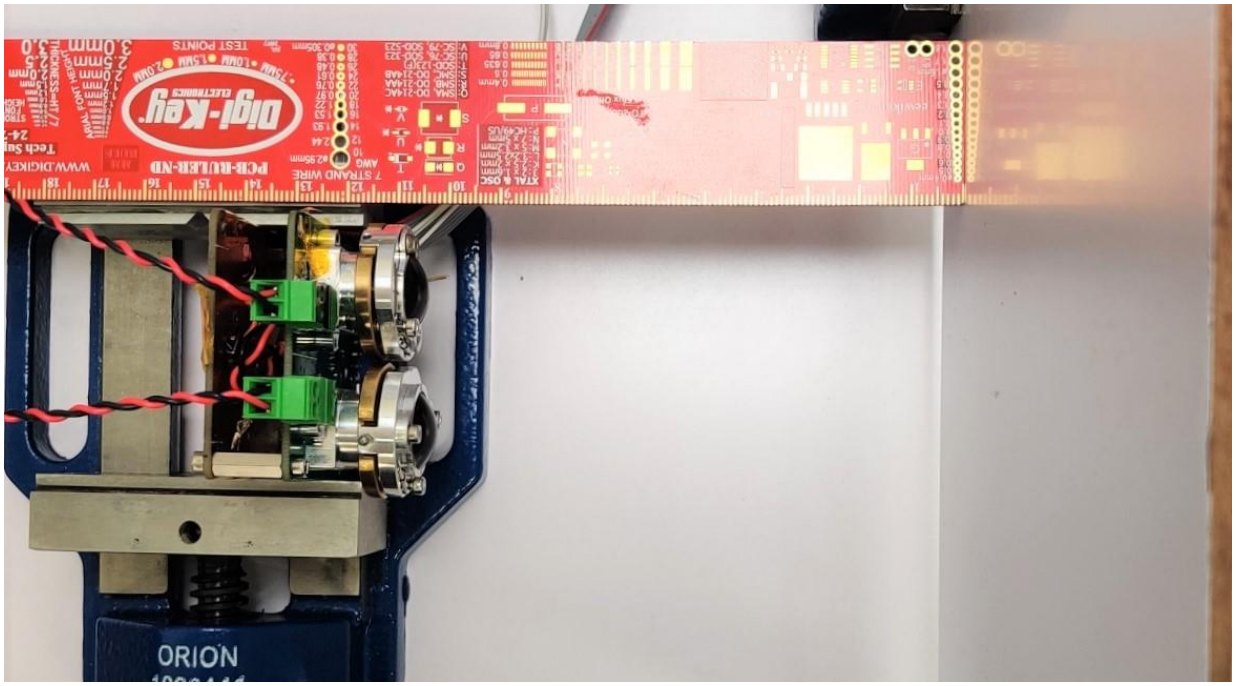
Signalus, kurie atspindi atstumo matavimą, matome 7.6 pav. Atstumas apskaičiuojamas išmatuojant laiko tarpą tarp TX STOP1 ir RX STOP2 signalų. MCU pradžios signalas yra mikrovaldiklio generuojamas laiko matavimo pradžios signalas. RX APD yra elektrinis impulsas suformuojamas imtuve.



7.6 pav. Laiko trukmės matavimo signalai

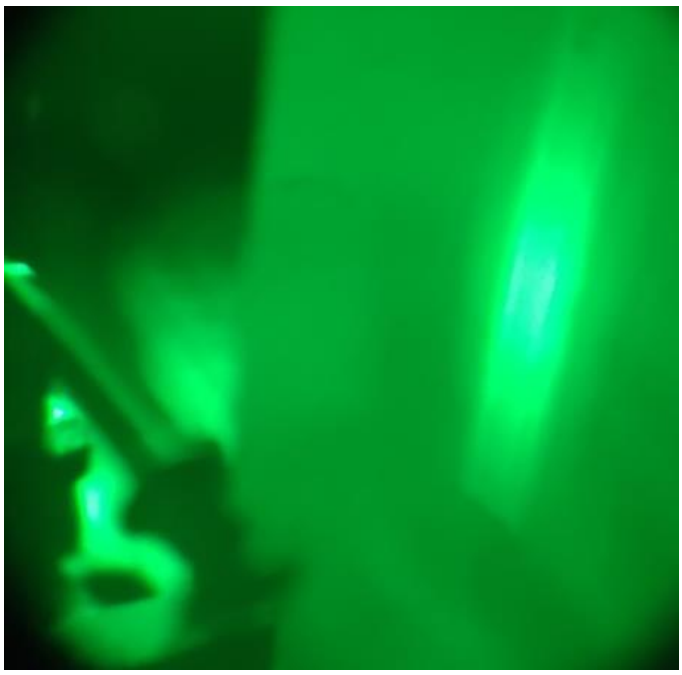
7.4. Šviesos pluošto tyrimas

Ištyrus imtuvo ir siųstuvo elektrinius parametrus ir įsitikinus, kad jie funkcionuoja tinkamai, yra atliekamas šviesos pluošto tyrimas ir optikos suderinimas. Naudojamo lazerinio diodo šviesa stipriai diverguoja, t. y. trumpame atstume šviesos pluoštas greitai išsiplečia. Tai reiškia, jog šviesos signalas greitai išsisklaido ir į imtuvą grįš mažos galios signalas. Tai yra viena iš priežasčių, kodėl reikia kolimuoti lazerinio diodo šviesą. Kitas aspektas – norint atlikti konkretaus taško matavimą reikėtų šviesti į jį, o ne į aplinkinius objektus. Kuo mažesnis yra šviesos spindulio taškas, tuo tiksliau galima pataikyti į norimą pamatuoti vietą arba, realizuojant skanavimą, atlikti tai su didesne skiriamąja geba. Optikos suderinimas buvo atliekamas šviečiant į baltos spalvos blizgų paviršių. Atstumas iki paviršiaus buvo ~10 cm (žr. 7.7 pav.).



7.7 pav. Optikos derinimas

Pluošto tyrimas atliekamas naudojantis vizualizatoriumi. Pluošto formą galima matyti 7.8 pav. Šiame paveiksle galima pastebėti, kad pluoštas yra ovalo formos. Taip yra dėl lazerinio diodo struktūros, o jo viduje ant lusto yra lygiagrečiai sujungti 3 šviesos emiteriai. Tokios formos pluoštas yra nenaudingas.



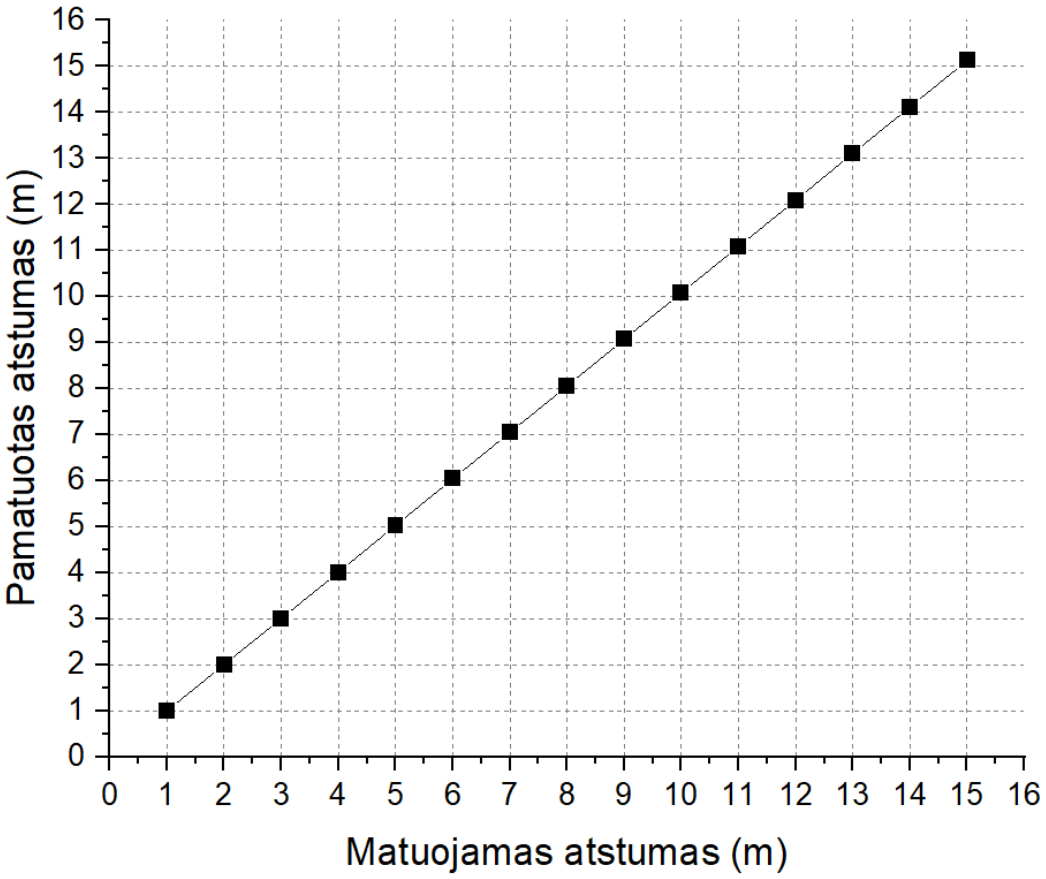
7.8 pav. Lazerinio diodo šviesos pluošto forma

Kitas žingsnis – kolimuoti šviesą. Šis žingsnis yra atliekamas naudojant „plokščiai išgaubtą“ optinį lęšį. Pluošto forma yra pateikiama 7.9 paveiksle. Paveiksle galima įžvelgti aiškų pluošto formos pokytį. Pluošto forma yra sufokusuojama į ~10 mm pločio ovalą.

7.9 pav. Lazerinio diodo kolimuota šviesos pluošto forma

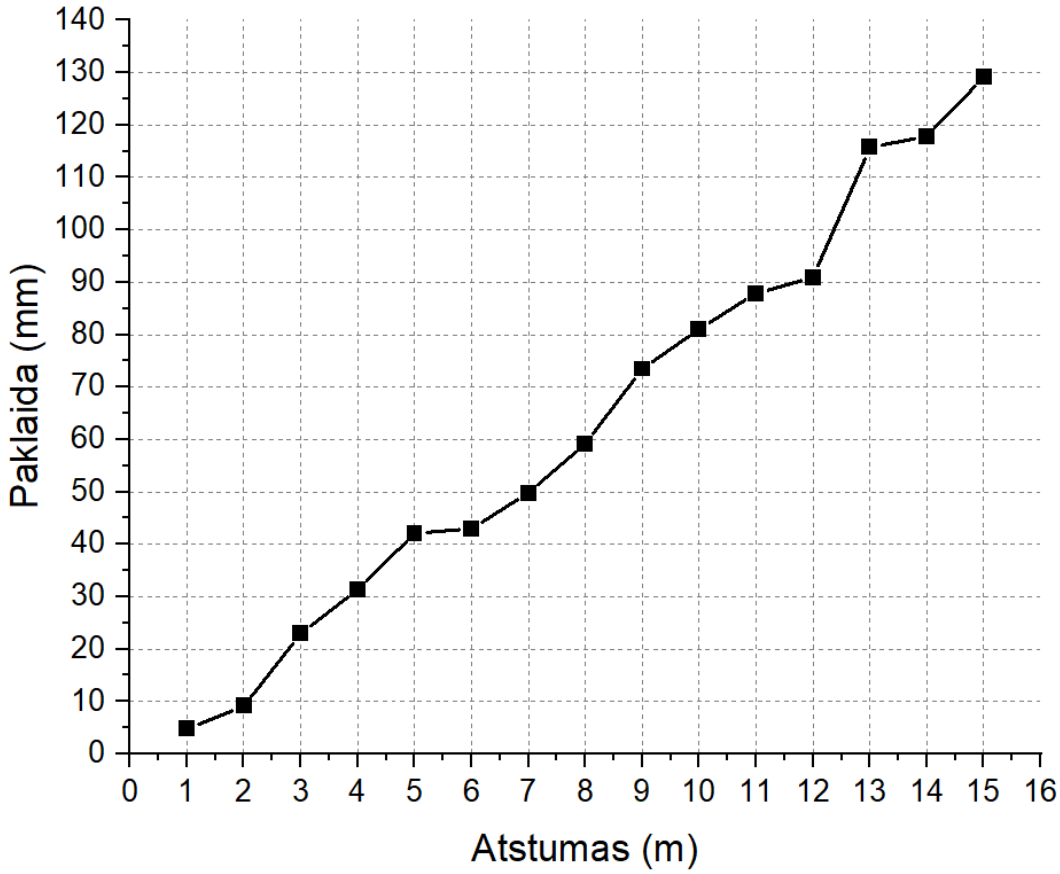
7.5. Atstumo matavimo tyrimai

Atstumo matavimo tyrimas buvo atliktas siekiant išsiaiškinti, kaip kinta matavimo rezultatai kintant matuojamam atstumui. Matuojamo objekto padėtis buvo keičiama 1 metro intervalu nuo 1 iki 15 metrų. Atstumas buvo matuojamas iki baltos spalvos blizgaus paviršiaus objekto. Matavimai atlikti 1000 kartų, o duomenys pateikiami apskaičiavus gautų rezultatų vidutinę vertę. Šio tyrimo tikslas – nustatyti, ar pamatuotas atstumas kinta tiesiškai. Tiriamo atstumo matuoklio padėtis buvo fiksuota ir nekeičiama. Judinamo objekto padėties tikslumas buvo tikrinamas naudojant SNDWAY SW-TG-100 lazerinį atstumo matuoklį. Matavimai atlikti esant dirbtiniam biuro patalpoms apšviesti, kuris neviršija 500 lx. Išmatuoto atstumo priklausomybė nuo matuojamo atstumo pavaizduota 7.10 paveiksle. Išmatuotas atstumas kinta tiesiškai priklausomai nuo matuojamo atstumo.



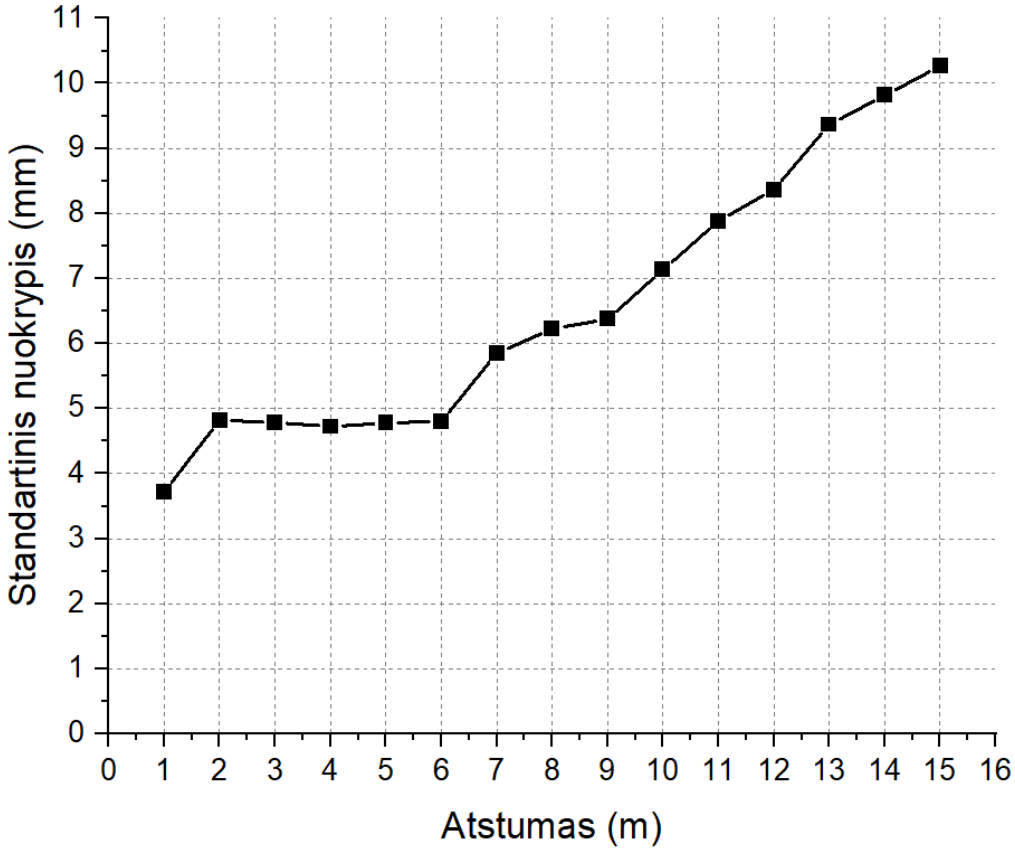
7.10 pav. Išmatuoto atstumo priklausomybė nuo matuojamo atstumo

Atlikus atstumo matavimą buvo apskaičiuota matavimo paklaida. Paklaidos kitimo nuo matuojamo atstumo grafikas pateikiamas 7.11 paveiksle. Grafike galima matyti, kad paklaida didėja, didėjant matuojamam atstumui. Matuojant 1 metrą paklaida yra apie 5 mm, o matuojant maksimalų 15 metrų atstumą, paklaida padidėja iki 130 mm. Taip pat iš grafiko matyti, kad paklaidos didėjimas artimas tiesei. Tokį paklaidos kitimą galima paaiškinti ankstesniuose skyriuose aptarta laiko eigos paklaida. Lazerinio diodo šviesos pluoštas didėjant atstumui stipriai išsiplečia ir į imtuvą grįžta mažesnės galios impulsas. Mažėjant optinio impulso galiai atitinkamai pasikeičia imtuve suformuotas elektrinis impulsas, kurio kylantis frontas sulėtėja. Elektrinis impulsas, kuris sustabdo laikmatį, pasislenka laike proporcingai fronto sulėtėjimui. Matuojant 16 metrų atstumą, imtuve esančio transimpedansinio stiprintuvo suformuojamo elektrinio impulso frontas sulėtėja apie 866 ps.



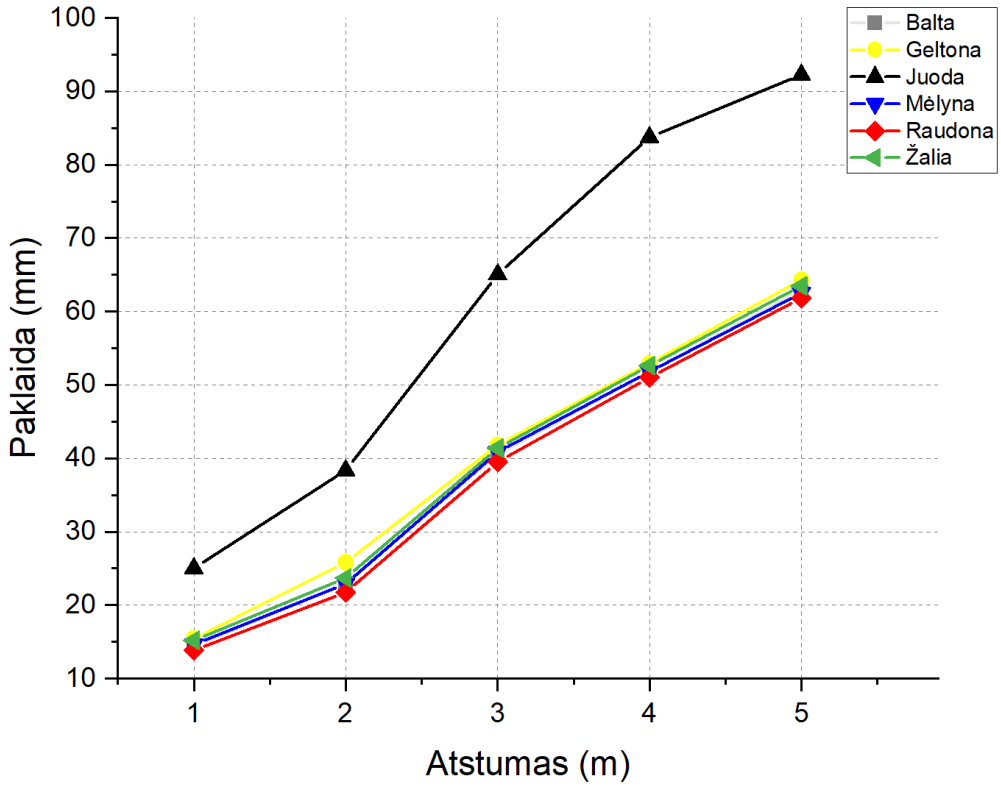
7.11 pav. Atstumo matavimo paklaida

Standartinis nuokrypis apskaičiuojamas matavimo atkarpose nuo 1 iki 15 metrų. Atstumas matuotas 1 metro intervalais iki baltos spalvos, blizgaus paviršiaus objekto. Gauti rezultatai pateikiami 7.12 paveiksle. Grafike galime matyti, kad matuojant 1 metro atstumą matavimų pasiskirstymas apie vidutinę matavimo vertę yra 3,6 mm. Matuojant atstumą 2 metrų atkarpoje standartinis nuokrypis padidėja iki 4,8 mm ir kinta nežymiai iki 6 metrų. Nuo 6 metrų standartinis nuokrypis ima didėti beveik tiesiškai. Didžiausias standartinis nuokrypis – 10,3 mm, gaunamas matuojant 15 metrų atstumą. Iš grafiko matyti, kad didėjant atstumui, didėja standartinis nuokrypis. Iš ankstesnių eksperimentų yra aišku, kad didėjant matuojamam atstumui susilpnėja grįžtančio impulso galia. Sumažėjus impulso galiai atitinkamai mažėja ir SNR santykis, dėl šios priežasties padidėja imtuve suformuoto impulso virpėjimas laike, kuris atsispindi padidėjusiu standartiniu nuokrypiu.



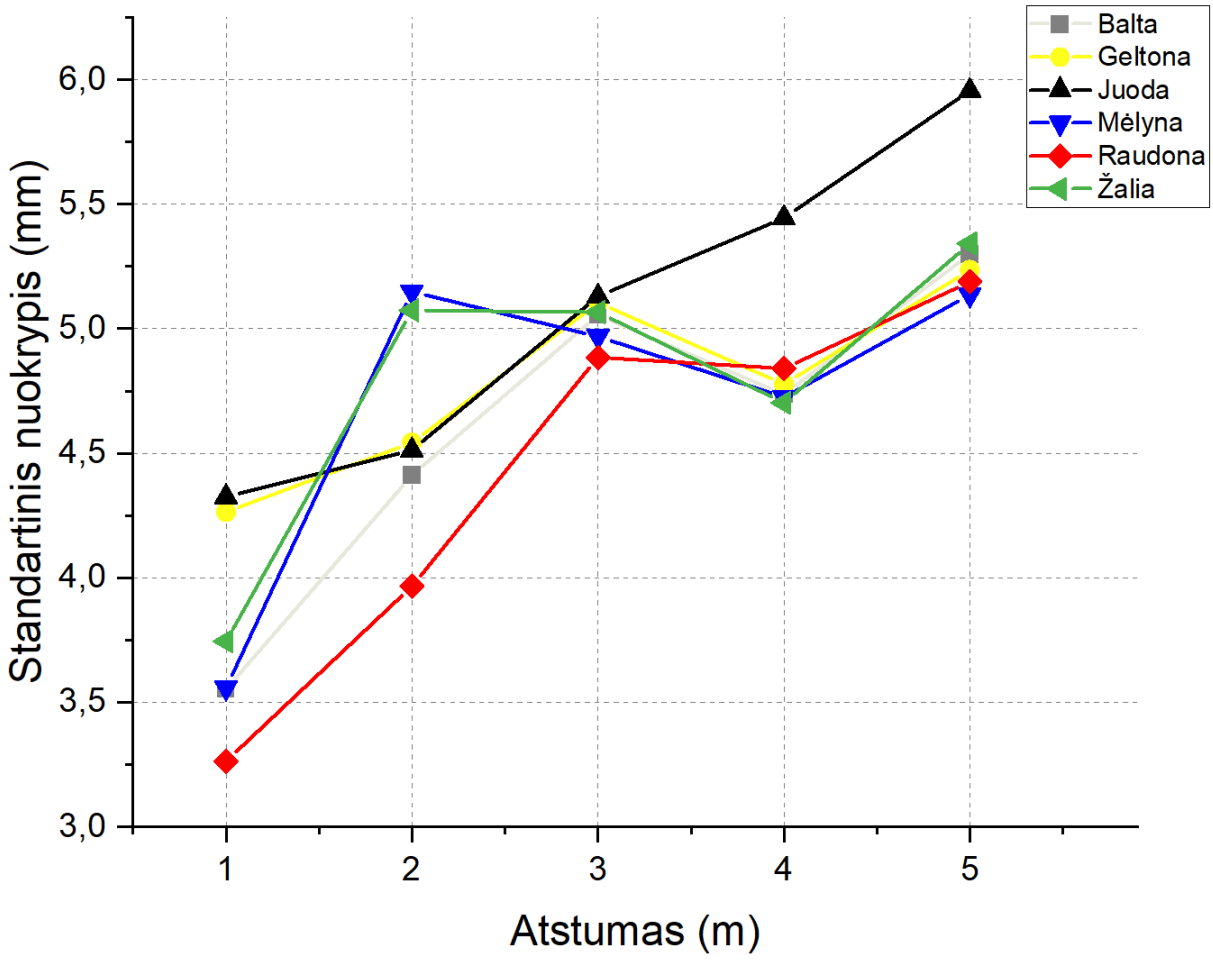
7.12 pav. Atstumo matavimo standartinis nuokrypis

Šiuo tyrimu buvo siekiama išsiaiškinti, kokią įtaką skirtingos paviršių spalvos turi matuojamo atstumo tikslumui. Suprojektuotas lazerinis atstumo matuoklis generuoja 905 nm bangos ilgio šviesą, kurios atspindėjimas kinta nuo matuojamo paviršiaus. Skirtingos spalvos paviršius pasižymi skirtinga šviesos sugertimi, kuri lemia atspindėto impulso galią. 7.13 paveiksle yra pavaizduota skirtingos spalvos paviršių atstumo matavimo paklaida. Eksperimento metu buvo naudojami šešių spalvų paviršiai: baltas, geltonas, juodas, mėlynas, raudonas ir žalias. Prietaisu buvo išmatuotas 1-5 metrų atstumas. Grafike matome, kad paklaida tarp šių spalvų: baltos, geltonos, mėlynos, raudonos ir žalios kinta nežymiai. Taip pat galime matyti, kad matuojamo atstumo paklaidą labiau lemia matuojamas atstumas, o ne paviršiaus spalva. Kaip ir anksčiau atliktame eksperimente, matome, kad didėjant matuojamam atstumui, didėja matavimo paklaida. Šiame paveiksle galime pastebėti, kad juodos spalvos paklaida yra didesnė nei kitų spalvų paviršių. Juodos spalvos paviršiaus paklaida lyginant su kitų matuojamų paviršių spalvomis 1 metro atstume apytiksliai yra 10 mm. Didžiausias juodos ir kitų spalvų paviršių paklaidos skirtumas matomas matuojant 5 metrų atstumą ir sudaro apie 30 mm. Remiantis atliktu tyrimu galima teigti, kad juodos spalvos paviršius pasižymi didžiausia šviesos sugertimi ir lemia didesnę matavimo paklaidą lyginant su kitų spalvų paviršiais.



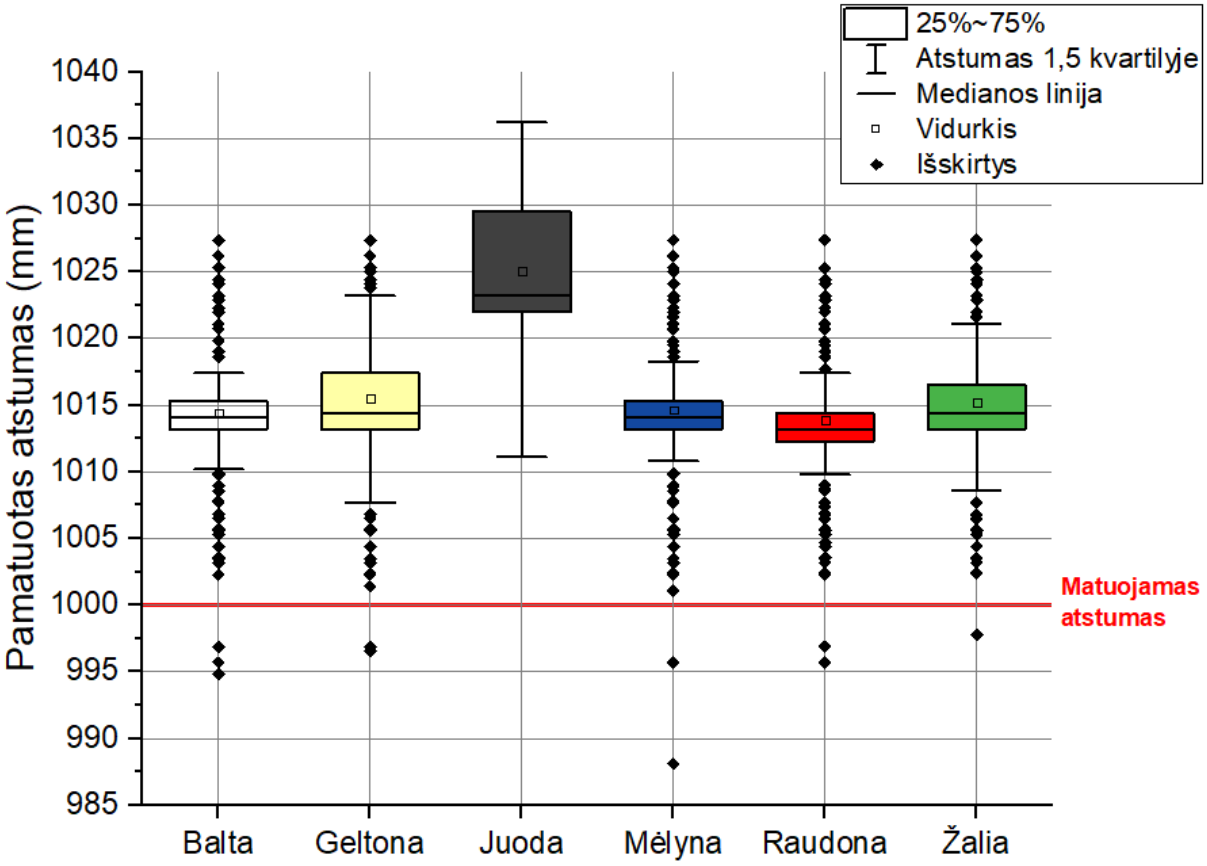
7.13 pav. Skirtingos spalvos paviršių atstumo matavimo paklaida

Remiantis anksčiau atlikto tyrimo duomenimis buvo paskaičiuotas skirtingų spalvų paviršių standartinis nuokrypis. Gauti rezultatai pateikti 7.14 paveiksle. Grafike matoma, kad skirtingų atstumų matavimai iki skirtingų spalvų paviršių nėra dėsningi. Pasiskirstymas aplink vidurkį tarp spalvų labiausiai išsiskiria matuojant atstumą nuo 1 metro iki 2 metrų. Galima pastebėti, kad matuojant 3 metrų atstumą, spalvų paviršių standartinis nuokrypis nuo skirtingų spalvų vidurkių tampa dėsningas. Standartinis nuokrypis tarp spalvų atsikartoja su 1-2 mm skirtumu matuojant 3-5 metrų atstumą. Tačiau juodos spalvos paviršiaus standartinis nuokrypis skiriasi nuo kitų spalvų yra tampa didesnis matuojant 4 ir 5 metrų atstumą. Apskaičiavus standartinį nuokrypį galima teigti, kad skirtumas tarp matuojamo paviršiaus spalvų nėra faktorius, kuris ženkliai lemia standartinį nuokrypį.



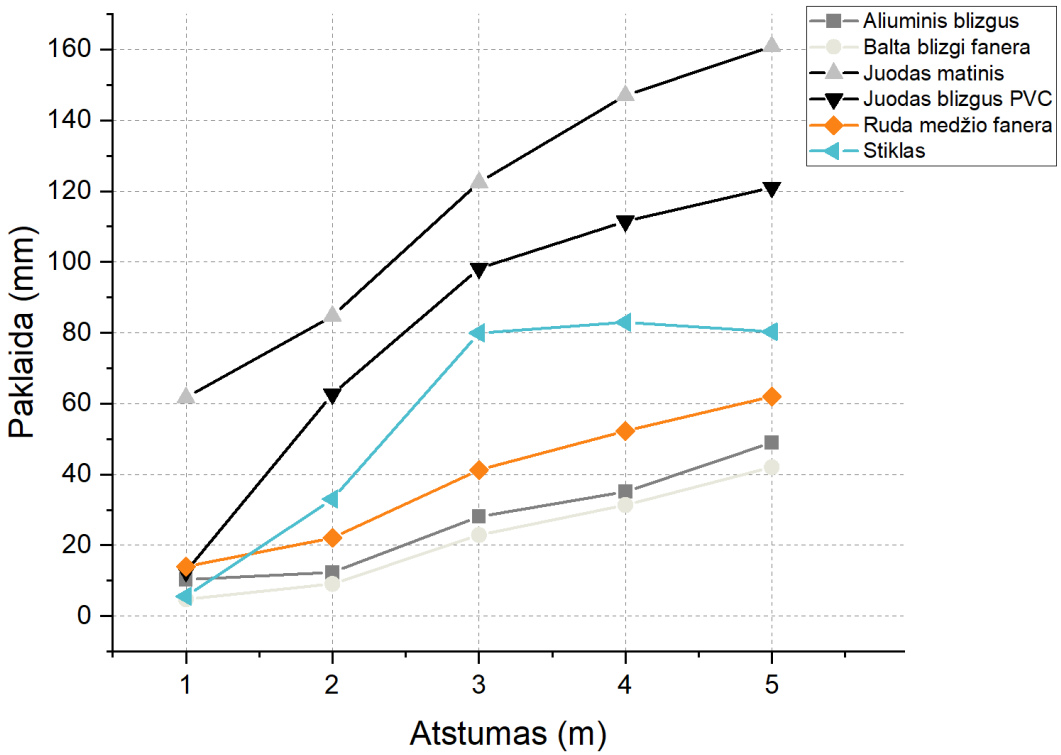
7.14 pav. Skirtingos spalvos paviršių atstumo matavimo standartinis nuokrypis

7.15 paveiksle yra pavaizduotas skirtingų spalvų paviršių matavimo rezultatų pasiskirstymas matuojant vieno metro atstumą, kuris grafike žymimas raudona linija. Šis atstumas buvo pamatuotas 1000 kartų. Eksperimento metu buvo paskaičiuoti šie rodikliai: kvartilių pasiskirstymas, mediana, vidurkis ir išskirtys. Baltos, geltonos, mėlynos, raudonos ir žalios spalvos paviršių skirstinio padėtis yra panaši (~1014 mm), tačiau skiriasi pamatuoto atstumo sklaida. Geltonos ir žalios spalvų paviršių sklaida yra nežymiai (~3 mm) didesnė nei baltos, mėlynos ir raudonos slapvų paviršių. O juodos spalvos paviršiaus sklaida ir skirstinio padėtis skiriasi nuo kitų spalvų paviršiaus. Šios spalvos paviršiaus skirtinys yra nutolęs nuo kitų spalvų paviršių skirtinių apie 8 mm į teigiamą pusę ir šios spalvos sklaida yra didžiausia (1022-1029 mm). Šiame paveiksle taip pat galima matyti, kad visų spalvų paviršių vidurkis yra didesnis už medianą, tai rodo kad duomenys linke pasiskirstyti į teigiamą pusę, bet poslinkis yra nežymus ir siekia (~0,5-1 mm). Remiantis gautais duomenimis galima teigti, kad juoda matuojamo paviršiaus spalva turi didesnę duomenų sklaida lyginat su balta, geltona, mėlyna, raudona, žalia spalvomis. Tačiau kitų tirtų spalvų sklaida skiriasi labai nežymiai ir neturi didelės įtakos matavimo rezultatams.



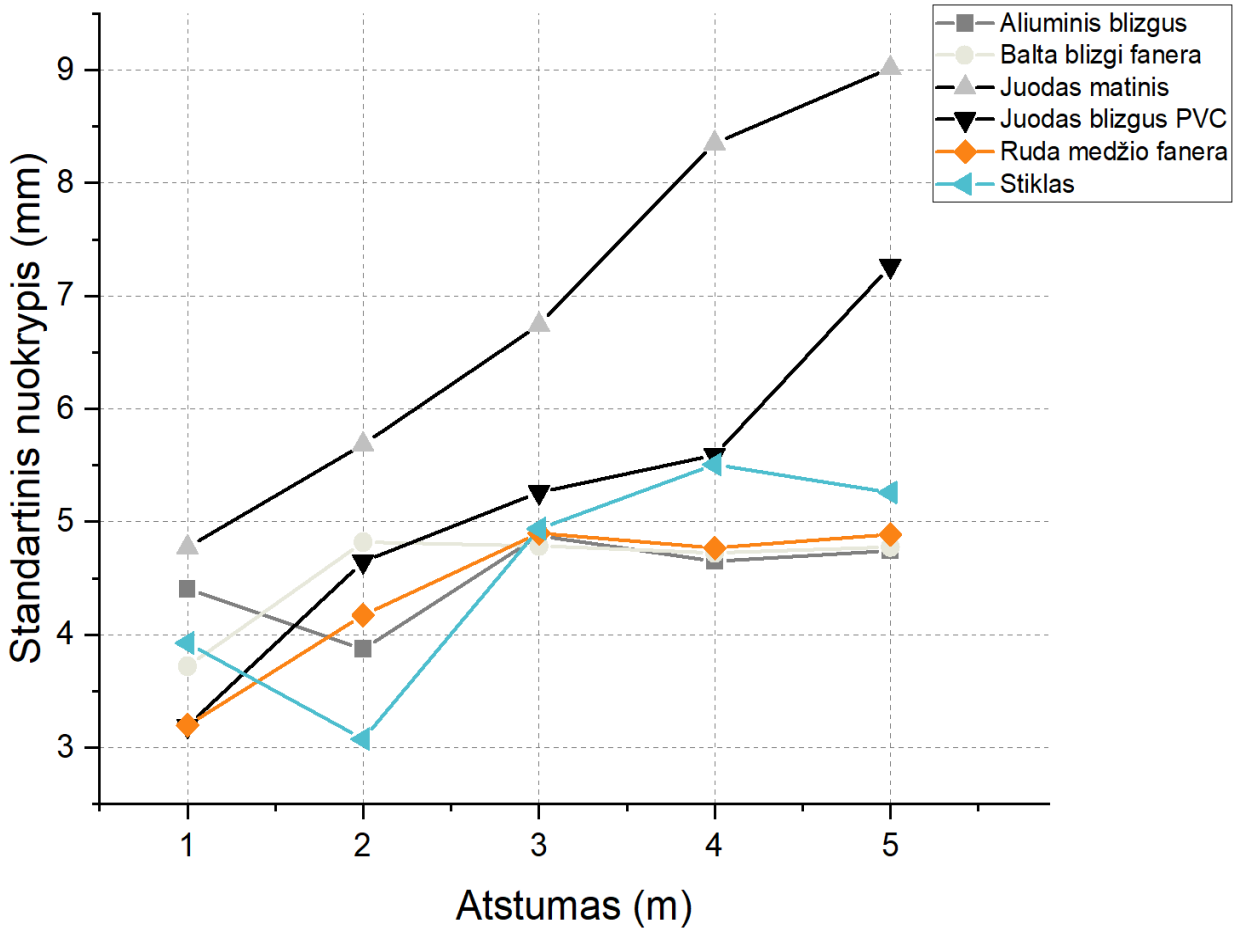
7.15 pav. Skirtingų spalvų matavimo rezultatų pasiskirstymas 1 metro atstumu

Išanalizavus skirtingų paviršių spalvų įtaką matavimo rezultatams buvo atliktas tokio paties pobūdžio tyrimas vietoje spalvų pasirenkant skirtingų medžiagų paviršius. Skirtingas paviršius gali atspindėti šviesą skirtingai. Eksperimentui buvo pasirinkti šešių skirtingų medžiagų paviršiai: aliuminis blizgus, balta blizgi fanera, juodas matinis paviršius, juodas blizgus PVC plastikas, ruda medžio fanera ir stiklas. Kaip ir skirtingų spalvų paviršių, taip ir skirtingų medžiagų paviršių matavimui buvo pasirinktas tas pats atstumas: nuo 1 iki 5 metrų ir apskaičiuota paklaida. Gauti rezultatai matomi 7.16 pav. Mažiausia paklaida tarp skirtingų paviršių buvo pastebima, kai matuojamas atstumas buvo 1 metras. Didžiausią paklaidą visais matuojamais atstumais turėjo juodas matinis paviršius, o mažiausią – balta blizgi fanera. Šiame eksperimente galima pastebėti, kad tarp matuojamų paviršių yra didesnis matavimo paklaidos skirtumas. Mažiausias paklaidos skirtumas tarp baltos blizgios faneros ir juodo matinio paviršiaus buvo 50 mm matuojant 1 metro atstumo, o didžiausias – 120 mm, matuojant 5 metrų atstumą. Remiantis atliktu tyrimu galima teigti, kad medžiagos paviršius daro ženkliai didesnę įtaką nei paviršiaus spalva. Taip nutinka dėl skirtingų paviršių, kurie išsklaido šviesą įvairiausiomis kryptimis ir dėl šios priežasties į imtuvą grįžtantis šviesos impulsas patiria didžiausius galios nuostolius.



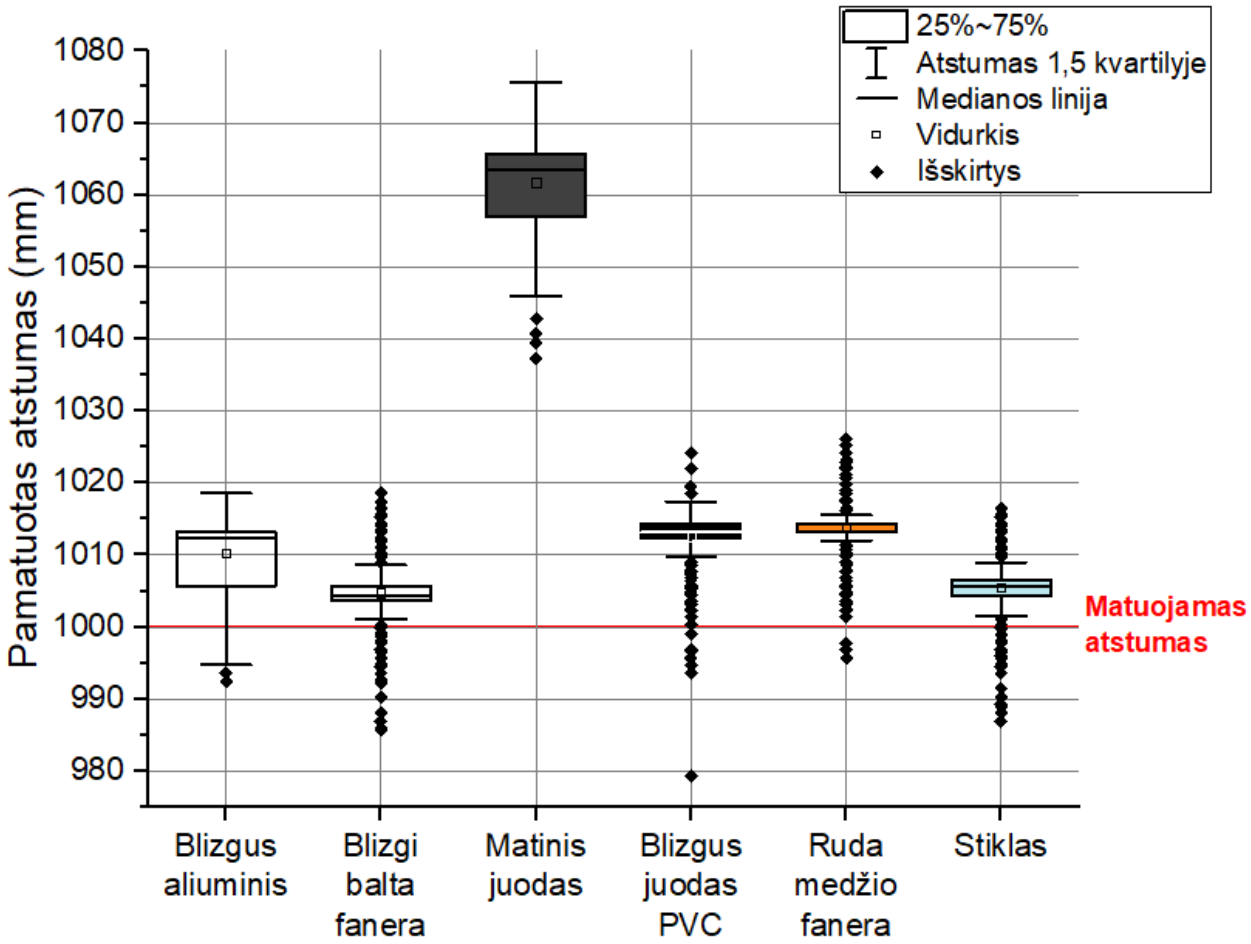
7.16 pav. Skirtingų medžiagų paviršių atstumo matavimo paklaida

7.17 paveiksle yra pavaizduotas skirtingų medžiagų paviršiaus standartinis nuokrypis pagal matuojamą atstumą. Tyrimas buvo atliktas tokiu pačiu principu, koks buvo naudotas matuojant skirtingų spalvų paviršius. Šio tyrimo tikslas – išsiaiškinti, ar medžiagos paviršius turi įtakos matavimo duomenims pasiskirstyti aplink vidurkį. Labiausiai galima išskirti juodą matinį paviršių, kurio standartinis nuokrypis buvo labiausiai nutolęs nuo kitų medžiagų paviršių standartinių nuokrypių. Taip galėjo nutikti dėl to, kad nuo šio paviršiaus atspindėta šviesa yra labiau išskaidoma nei nuo kitų tyrimui naudotų paviršių.



7.17 pav. Skirtingų medžiagų paviršių atstumo matavimo standartinis nuokrypis

7.18 paveiksle pateikiamas skirtingų paviršių medžiagų rezultatų pasiskirstymas matuojant 1 metro atstumą. Matavimai buvo atlikti 1000 kartų. Grafike matuojamas atstumas pažymimas raudona linija. Iš grafiko galime pastebėti, kad blizgios baltos faneros, blizgaus juodo PVC, rudos medžio faneros ir stiklo sklaida yra panaši (~2 mm). Didžiausią matavimo rezultatų sklaidą turi blizgus aliuminis (1005-1014 mm) ir matinis juodas (1058-1065 mm) paviršiai. Juodo matinio paviršiaus atstumo matavimo rezultatų mediana yra labiausiai nutolusi nuo kitų matuojamų paviršių medianų ir siekia ~1064 mm. Kitų medžiagų medianų skirtumas yra nežymus – apie 10 mm.



7.18 pav. Skirtingų medžiagų paviršių matavimo rezultatų pasiskirstymas 1 metro atstumu

APIBENDRINIMAS IR IŠVADOS

1. Šiame darbe buvo suprojektuotas, pagamintas ir ištirtas impulsinis lazerinis atstumo matuoklis.

2. Atlikus lazerinių atstumo matuoklių realizavimo analizę buvo išsiaiškinta, kad šių matuoklių veikimas yra paremtas geometriniais, laiko sklidimo trukmės matavimo ir interferometriniais metodais. Šiame darbe projektuojant įrenginį buvo pasirinktas impulsinis laiko skidimo trukmės matavimo metodas.

3. Atliekant literatūros analizę buvo išsiaiškinta, kad šiuo metodu paremti matuokliai susiduria su laiko eigos ir laiko virpėjimo paklaidos šaltiniais, kurie nulemia matuojamo atstumo tikslumą. Buvo išsiaiškinta, kad iš šių paklaidos šaltinių laiko eigos paklaida turi didžiausią įtaką matavimo paklaidai. Laiko matavimo virpėjimas turi didžiausią įtaką matavimo rezultatų pastovumui.

4. Projektuojant įrenginį buvo sudaryta jo blokinė schema, kurioje atvaizduota supaprastinta matuoklio struktūra. Taip pat buvo pasirinkti ir įvertinti esminiai lazerinio atstumo matuoklio komponentai. Projektuojant siųstuvą, kaip šviesos šaltinį, buvo pasirinkta naudoti impulsinį lazerinį diodą, kuris gali sugeneruoti trumpus, apie 90 W, optinės galios šviesos impulsus. Imtuve buvo pasirinkta naudoti griūtinį fotodiodą. Tokio tipo fotodiodą buvo pasirinkta naudoti, nes jis turi vidinį stiprinimą, atsirandantį dėl griūtinio efekto, ir gali sustiprinti signalą apie 55 kartus.

5. Toliau buvo suprojektuotos 3 atskiros spausdintinės plokštės: lazerinio atstumo matuoklio, aukštos įtampos maitinimo šaltinio, atstumo matuoklio maitinimo šaltinio ir lazerinio diodo maitinimo šaltinio. Impulsiniai maitinimo šaltiniai buvo suprojektuoti atskirose spausdintinėse plokštėse siekiant sumažinti jų generuojamų triukšmų įtaką lazerinio atstumo matuoklio komponentams.

6. Pagaminus įrenginį naudojant C programavimo kalbą buvo parašyta įrenginio valdymo programa, jos veikimas buvo paaiškintas blokine schema.

7. Toliau atliekant atstumo matavimo tyrimus buvo pastebėta, kad matavimo paklaida didėja tiesiškai, didėjant matuojamam atstumui. Pastebėta, kad matuojama atstumui padidėjus 1 metru, matavimo paklaida padidėja apie 10 mm. Vienas iš paprastų būdų sumažinti šią paklaidą yra programinis paklaidos kompensavimas. Kitas tyrimas atliktas siekiant išsiaiškinti, kokią įtaką matavimo rezultatams turi matuojamas objektas. Atlikus tyrimą, ar matuojamo paviršiaus spalva gali nulemti matavimo rezultatus, buvo išsiaiškinta, kad juoda spalva turi didžiausią įtaką matavimo paklaidai. Lyginant su kitomis tirtomis spalvomis, matuojant 1 metro atstumą, juodos spalvos paklaida buvo didesnė apie 10 mm, matuojant 15 metrų atstumą, paklaida buvo didesnė apie 30 mm lyginant su

kitomis spalvomis. Juoda spalva pasižymi didžiausia šviesos sugertimi lyginant su kitomis spalvomis ir ji labiausiai slopina atspindėtą šviesos impulsą. Taip pat buvo atliekami tyrimai su skirtingo paviršiaus medžiagomis. Šio tyrimo tikslas buvo išsiaiškinti, kokią įtaką matavimo rezultatams turi matuojamos medžiagos paviršius. Atlikus tyrimą buvo išsiaiškinta, kad medžiagos paviršius turi ženkliai didesnę įtaką matavimo paklaidai lyginant su medžiagos paviršiaus spalva. Tyrimo metu buvo išsiaiškinta, kad didžiausią įtaką paklaidai turi juodos spalvos matinis paviršius. Tokio tipo paviršius matavimo paklaida matuojant 1 metro atstumą yra 45 mm didesnė lyginant su kitais tirtais paviršiais. Matuojant 15 metrų atstumą, juodo matinio paviršiaus paklaida padidėja 120 mm lyginant su kito paviršiaus medžiagomis. Juoda matinė medžiaga pasižymi dviem faktoriais, kurie padidina paklaidą – tai juodos spalvos šviesos sugertis ir matinio paviršiaus šviesos išsklaidymas, kuris stipriai slopina šviesą, grįžtančią į imtuvą.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

Baghmisheh, B. B. (2017). Chip-scale Lidar. *Phd Thesis*, UCB/EECS-2017-4. Retrieved from http://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2017/EECS-2017-4.html.

Ballantyne, W. J. (2017). Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook. In J. G. Webster & H. Eren (Eds.), *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/b15664.

Beer, M., Haase, J. F., Ruskowski, J., & Kokozinski, R. (2018). Background light rejection in SPAD-based LiDAR sensors by adaptive photon coincidence detection. *Sensors (Switzerland)*, *18*(12). https://doi.org/10.3390/s18124338.

Behroozpour, B., Sandborn, P. A. M., Wu, M. C., & Boser, B. E. (2017). Lidar System Architectures and Circuits. *IEEE Communications Magazine*, *55*(10), 135–142. https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1700030.

Berkovic, G., & Shafir, E. (2012). *Optical methods for distance and displacement measurements Optical methods for distance and displacement measurements*. *471*, 441–471. https://doi.org/10.1364/AOP.4.000441.

Bosch, T. (2001). Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement. *Optical Engineering*, *40*(1), 10. https://doi.org/10.1117/1.1330700.

Devices Inc, A. (2021). *LT3045 (Rev. C)*. https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/lt3045.pdf.

Horaud, R., Hansard, M., Evangelidis, G., & Ménier, C. (2016). An overview of depth cameras and range scanners based on time-of-flight technologies. *Machine Vision and Applications*, *27*(7), 1005–1020. https://doi.org/10.1007/s00138-016-0784-4.

Kostamovaara, J., Nissinen, J., Kurtti, S., Nissinen, I., Jansson, J., & Mäntyniemi, A. (2009). On the minimization of timing walk in industrial pulsed time-of-flight laser radars. *Optical Sensors 2009*, *7356*(August 2014), 73560N. https://doi.org/10.1117/12.820444.

Kurtti, S., Nissinen, J., & Kostamovaara, J. (2017). A Wide Dynamic Range CMOS Laser Radar Receiver with a Time-Domain Walk Error Compensation Scheme. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, *64*(3), 550–561. https://doi.org/10.1109/TCSI.2016.2619762.

Lange, R. (n.d.). *3D time-of-flight distance measurement with custom solid-state image sensors in CMOS/CCD-technology*. https://dspace.ub.uni-siegen.de/bitstream/ubsi/178/1/lange.pdf.

Maric, J., & Siedersbeck, A. (2018). *Time-of-flight (ToF) measurement using pulse lasers*. Retrieved from https://dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-2496586/Time-of-flight (ToF) measurement using pulse lasers.pdf.

Maxim Integrated Products, Inc. (2018). *MAX40658 Transimpedance Amplifier with 100mA Input Current Clamp for LiDAR Applications*. Retrieved from www.maximintegrated.com.

Oh, M. S., Kong, H. J., Kim, T. H., Hong, K. H., & Kim, B. W. (2010). Reduction of range walk error in direct detection laser radar using a Geiger mode avalanche photodiode. *Optics Communications*, *283*(2), 304–308. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2009.10.009.

ON Semiconductor. (2021). *NC7WZ16 - TinyLogic UHS Dual Buffer*. www.onsemi.com.

Receiver, I., Circuits, D., Time-of-, F. O. R. a P., & Rangefinder, F. L. (2012). *Integrated receiver channel and timing discrimination circuits for a pulsed time-of-flight laser rangefinder*. Acta Univ. Oul. C.

Royo, S., & Ballesta-Garcia, M. (2019). An overview of lidar imaging systems for autonomous vehicles. *Applied Sciences (Switzerland)*, *9*(19). https://doi.org/10.3390/app9194093.

Ruotsalainen, T., Palojärvi, P., & Kostamovaara, J. (2001). A wide dynamic range receiver channel for a pulsed time-of-flight laser radar. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, *36*(8), 1228–1238. https://doi.org/10.1109/4.938373.

STMicroelectronics. (2017). *Arm® Cortex®-M4 32b MCU+FPU, 125 DMIPS, 512KB Flash, 128KB RAM, USB OTG FS, 11 TIMs, 1 ADC, 13 comm. interfaces*. Retrieved from https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/b3/a5/46/3b/b4/e5/4c/85/DM00115249.pdf/files/DM00115249.pdf/jcr:content/translations/en.DM00115249.pdf.

Sugawara, E., & Nikaido, H. (2014). Properties of AdeABC and AdeIJK efflux systems of Acinetobacter baumannii compared with those of the AcrAB-TolC system of Escherichia coli. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, *58*(12), 7250–7257. https://doi.org/10.1128/AAC.03728-14.

Texas Instruments. (2017). *LIDAR-Pulsed Time-of-Flight Reference Design Using High-Speed Data Converters*. *November 2016*, 1–29. Retrieved from. www.ti.com

Texas Instruments. (2021). *LM5155x-Q1 2.2-MHz Wide Input Nonsynchronous Boost, SEPIC, Flyback Controller*. Retrieved from www.ti.com.

Texas Instruments. (2020). *TDC7201 Time-to-Digital Converter for Time-of-Flight Applicationsin LIDAR,RangeFinders,and ADAS*. Retrieved from https://www.ti.com/lit/ds/snas686/snas686.pdf?ts=1622147979598&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F.

Wehr, A., & Lohr, U. (1999). Airborne laser scanning - An introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *54*(2–3), 68–82. https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00011-8.

Yadav, A., & Mohite-Patil, T. B. (2012). Distance Measurement with Active & Passive Method Distance Measurement with Active & Passive Method. *International Journal of Computer Science and Network*, *1*(4), 2277–5420.1

PRIEDAI

1 Priedas. Lazerinio atstumo matuoklio principinė elektrinė schema

2 Priedas. Aukštos įtampos šaltinio principinė elektrinė schema

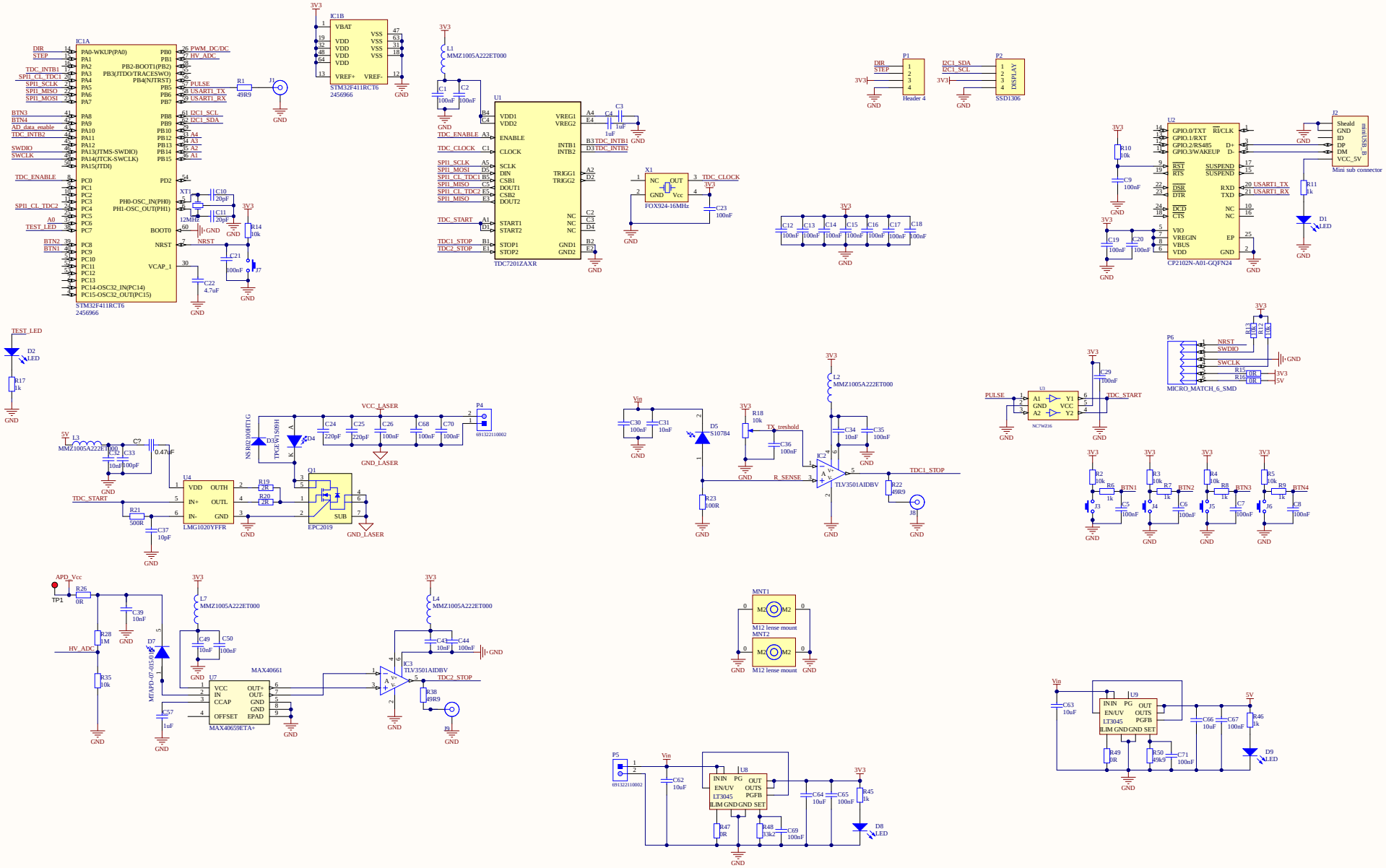
3 Priedas. Akumuliatorių įtampų keitiklių principinės elektrinės schemos

4 Priedas. Lazerinio atstumo matuoklio spausdintinė plokštė

5 Priedas. Aukštos įtampos šaltinio spausdintinė plokštė

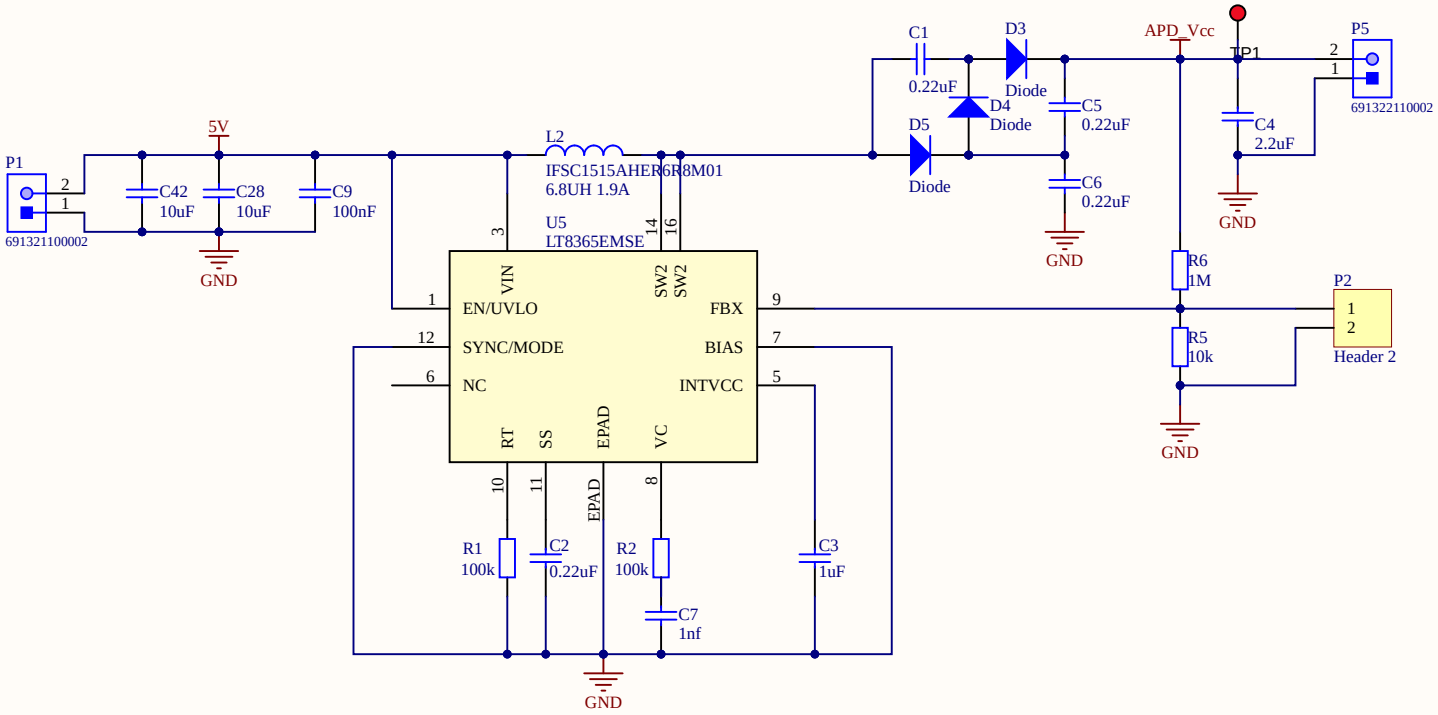
6 Priedas. Akumuliatorių įtampų keitiklių spausdintinė plokštė

1 Priedas. Lazerinio atstumo matuoklio principinė elektrinė schema



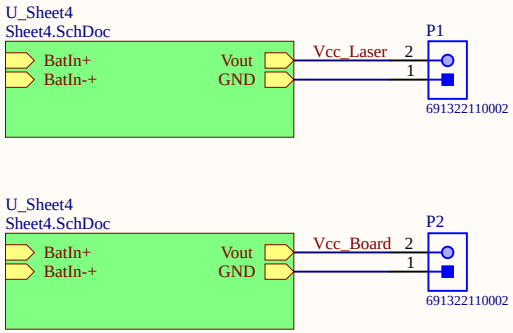
Title *Lazerinis atstumo matuoklis*		*Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas Žygimantas Mikulis KTm-19*
Size: A2	Number: 1	Revision:2
Date: 2021-06-02	Time: 22:31:39	Sheet 1 of 1

2 Priedas. Aukštos įtampos šaltinio principinė elektrinė schema

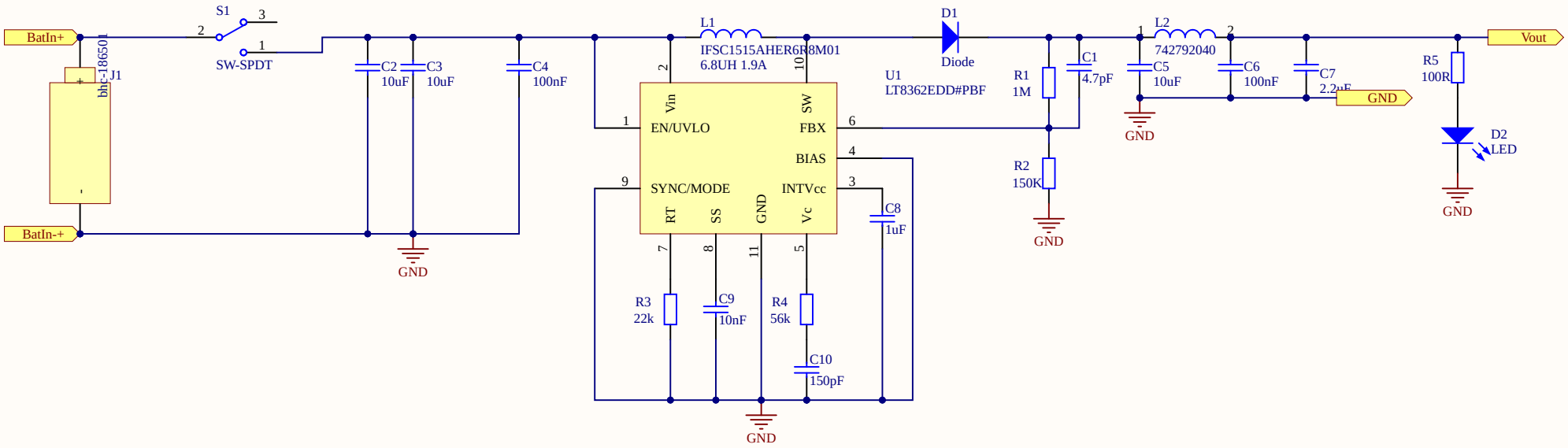


Title *Aukštos įtampos šaltinis*			*Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas* *Žygimantas Mikulis* *KTfm-19*
Size: A4	Number: 1	Revision: 1	
Date: 2021-06-02	Time: 22:14:58	Sheet 1 of 1	

3 Priedas. Akumuliatorių įtampų keitiklių principinės elektrinės schemos



Title *Akumuliatorių įtampų keitikliai*			*Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas* *Žygimantas Mikulis* *KTfm-19*
Size: A4	Number:*	Revision:1	
Date: 2021-06-02	Time: 22:33:53	Sheet 1 of 2	



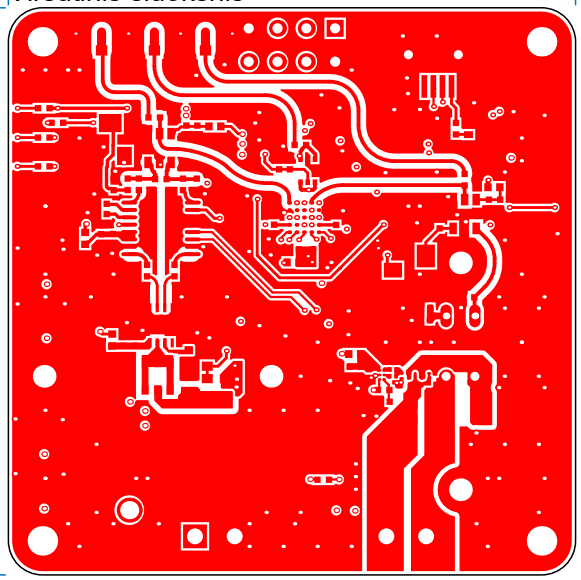
Title	***Akumuliatoriaus įtampos keitiklis***		*Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas*
Size: A4	Number:*	Revision:1	*Žygimantas Mikulis*
Date: 2021-06-02	Time: 22:33:53	Sheet 2 of 2	*KTfm-19*

4 Priedas. Lazerinio atstumo matuoklio spausdintinė plokštė

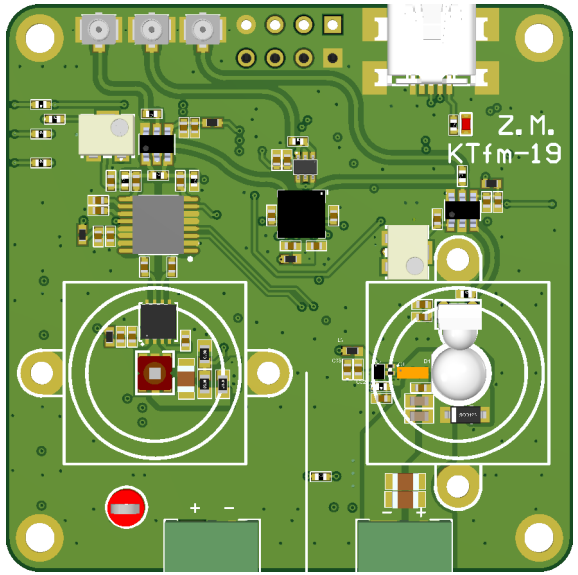
50.00mm

50.00mm

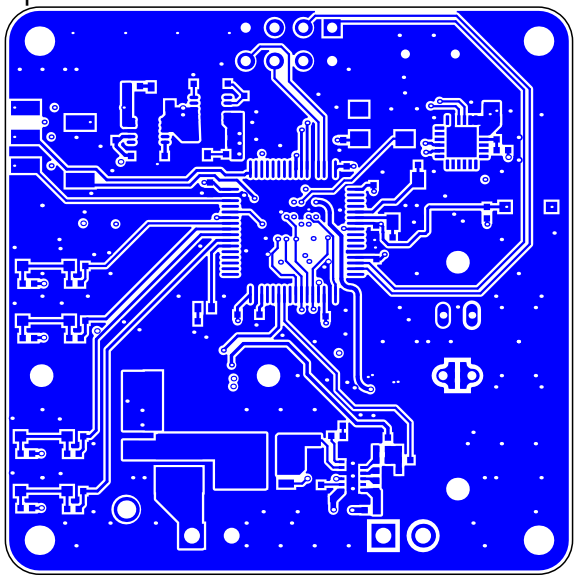
Viršutinis sluoksnis



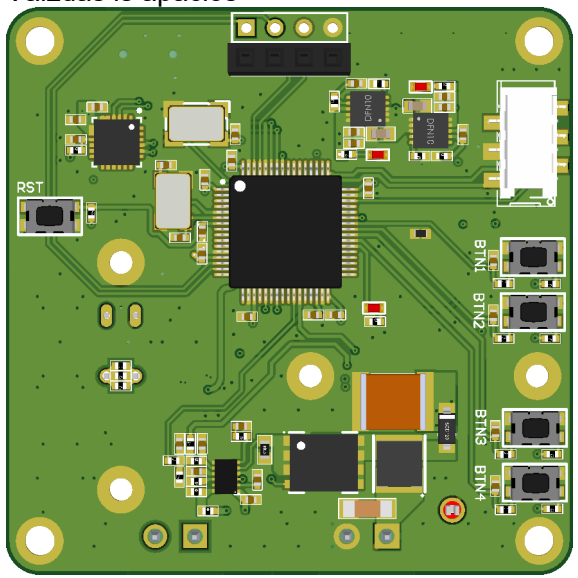
Vaizdas iš viršaus



Apatinis sluoksnis



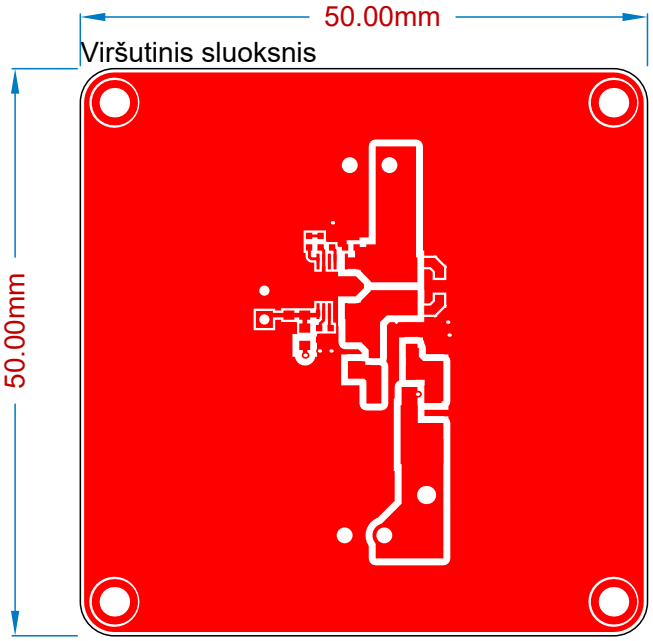
Vaizdas iš apačios



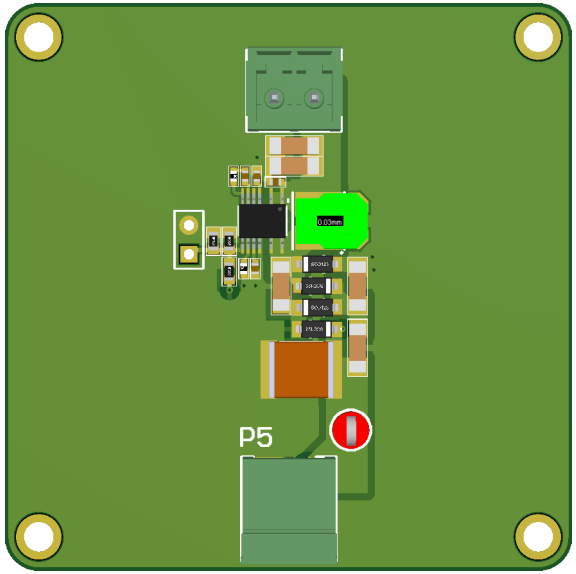
Mastelis 3:2

5 Priedas. Aukštos įtampos šaltinio spausdintinė plokštė

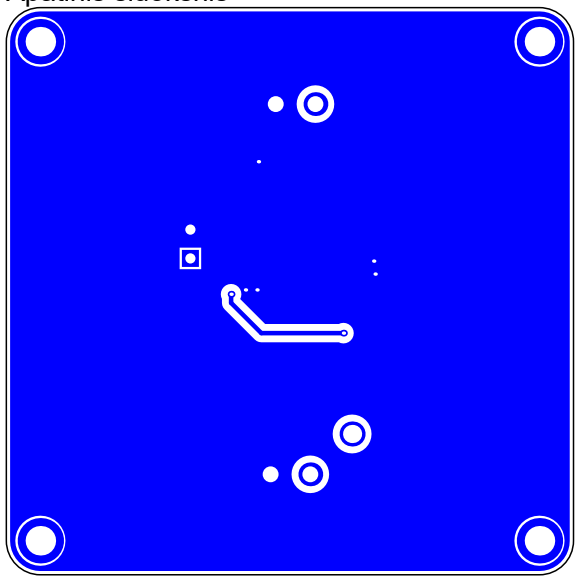
Viršutinis sluoksnis



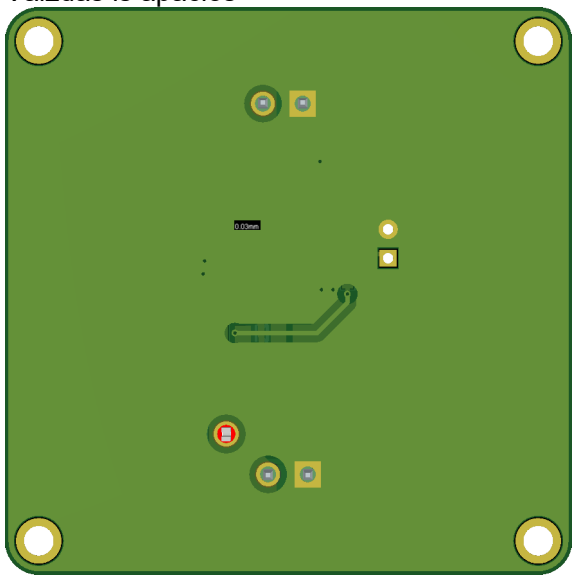
Vaizdas iš viršaus



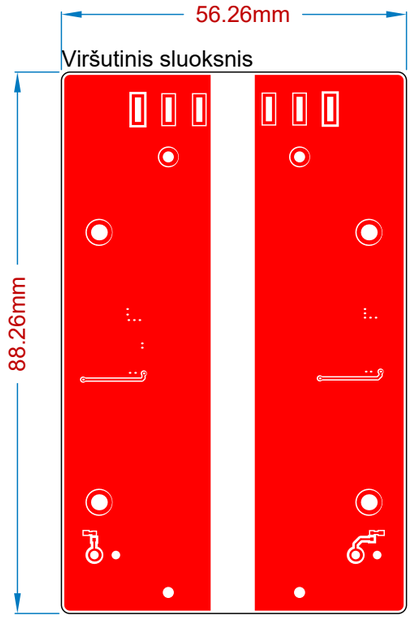
Apatinis sluoksnis



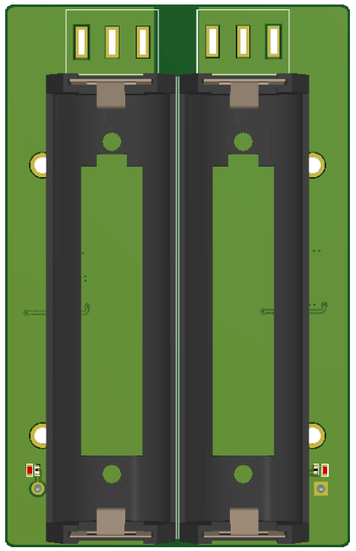
Vaizdas iš apačios



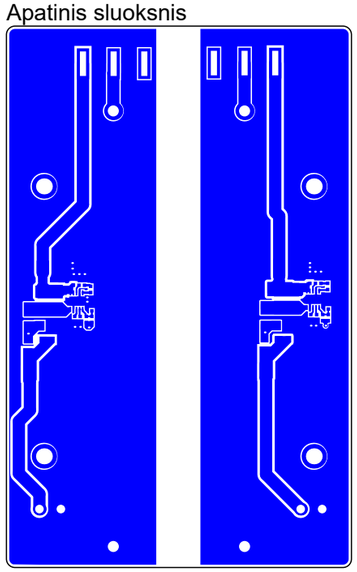
6 Priedas. Akumuliatorių įtampų keitiklių spausdintinė plokštė



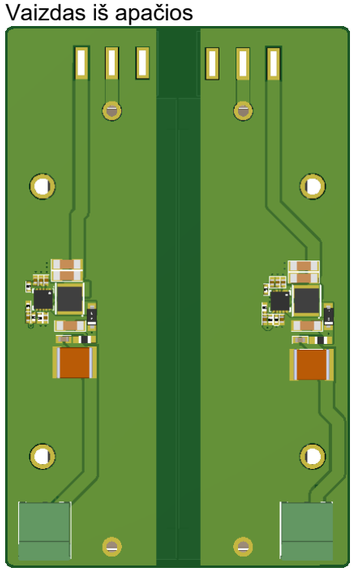
Viršutinis sluoksnis



Vaizdas iš viršaus



Apatinis sluoksnis



Vaizdas iš apačios