



**CMOS-TASOISEN AJOITUSMERKIN
GENEROINTI LASERDIODIN OHJAUSVIRRASTA
AIKATASON DIFFUUSIIN KUVANTAMISEEN**

Vili Matila

Ohjaajat: Jan Nissinen, Ilkka Nissinen

**ELEKTRONIIKAN JA TIETOLIIKENNETEKNIIKAN
TUTKINTO-OHJELMA**

2019

Matila V.A. (2019) CMOS-tasaisen ajoitusmerkin generointi laserdiodin ohjausvirrasta aikatazon diffuusiin kuvantamiseen. Oulun yliopisto, Elektroniikan ja tietoliikennetekniikan tutkinto-ohjelma. Kandidaatintyö, 26 s

TIIVISTELMÄ

Tämän kandidaatintyön aiheena on tutkia aikatazon diffuusissa kuvantamisessa hyödynnettävää piiriä, jolla generoidaan aikavälin mittausta ohjaava ajoitussignaali ulkoisesta ohjausvirrasta. Työssä käydään läpi mitä aikatazon diffuusi kuvantaminen on ja mihin tarkoitukseen ajoitusmerkin generoivaa piiriä tarvitaan. Generointipiirin rakenne ja toiminta käydään läpi osa-alueittain, sekä esitellään toimintaa rajoittavia tekijöitä. Piirin toimintaa simuloidaan AC- ja transienttisimulaatiomalleilla. Tuloksena esivahvistimen vahvistukseksi saadaan 15,8 V/V ja kaistanleveydeksi 491,7 MHz, mitkä ovat riittäviä halutun pulssin ilmaisuun. Tulosten perusteella esivahvistimen toiminnan nähdään olevan stabiili ja generoitu ajoitussignaali todetaan sopivaksi aikatazon diffuusin kuvantamisen käyttökohteissa.

Avainsanat: aikatazon diffuusi kuvantaminen, ajoitussignaalin generointi, generointipiiri, simulaatio.

Matila V.A. (2019) Generating a CMOS-based timing signal from a driver current for time-resolved diffuse imaging. University of Oulu, Degree Program in Electrical Engineering, Bachelor's Thesis, 26 p.

ABSTRACT

This Bachelor's Thesis studies a circuit used in time-resolved diffuse imaging, the purpose of which is to create a timing signal from an external driver current. This study examines time-resolved diffuse imaging in general and explains the purpose of the generated timing signal. The basic structure of the generating circuit is presented within the study along with detailed description of the function as well as the limiting factors related to its operation. The functionality of the circuit is verified with various simulation models, using AC- and transient analysis. The amplification of the pre-amplifier is determined to be 15,8 V/V and the bandwidth 491,7 MHz. Based on these results the function of the amplifier is determined stable, and the generated timing signal is declared suitable for time-resolved diffuse imaging applications.

Keywords: time-resolved diffuse imaging, generating a timing signal, signal generating circuit, simulation.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	1
ABSTRACT	2
SISÄLLYSLUETTELO	3
ALKULAUSE	4
LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYS	5
1. JOHDANTO	6
1.1. Aikatason diffuusi kuvantaminen.....	6
1.2. Lähetin.....	7
1.3. Ilmaisín.....	9
1.4. Aikavälinmittauspiiri.....	10
1.5. Jitteritön start.....	12
2. AJOITUSMERKIN GENEROINTIPIIRI	14
2.1. Laserpulssittimen rakenne.....	14
2.1.1. Esivahvistin	15
2.1.2. Komparaattori.....	16
2.1.3. 50 Ohmin ajuri.....	17
3. SIMULOINTI.....	19
3.1. Boden-kuvaaja.....	19
3.2. Transientti.....	22
4. YHTEENVETO.....	25
5. LÄHTEET	26

ALKULAUSE

Tämä kandidaatintyö tehtiin osana tekniikan kandidaatin tutkintoa Oulun yliopistossa. Työn aihe valittiin syksyllä 2018 ja kirjallinen osuus kirjoitettiin tammi-huhtikuun aikana vuonna 2019. Haluan kiittää Jan Nissistä hänen erinomaisesta opastuksestansa työn aikana. Lisäksi haluan kiittää myös kaikkia läheisiäni ja ystäviäni, jotka ovat olleet tukena opintojeni aikana.

Oulussa, huhtikuussa 2019

Vili Matila

LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYS

DOI	Diffuse Optical Imaging
TRDOI	Time-resolved Diffuse Optical Imaging
DTOF	Distribution of Time of Flight
FWHM	Full Width at Half Maximum
VCSEL	Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser
SPAD	Single Photon Avalanche Diode
SiPM	Silicon Photomultiplier
TDC	Time-to-Digital Converter
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
R	Vastus
L	Kela
C	Kondensaattori
AC	Alternating Current
DC	Direct Current
LTSpice	Linear Technology Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis
V	voltti, jännitteen yksikkö
A	ampeeri, virran yksikkö
Hz	hertsi, taajuuden yksikkö
Ω	ohmi, resistanssin yksikkö

1. JOHDANTO

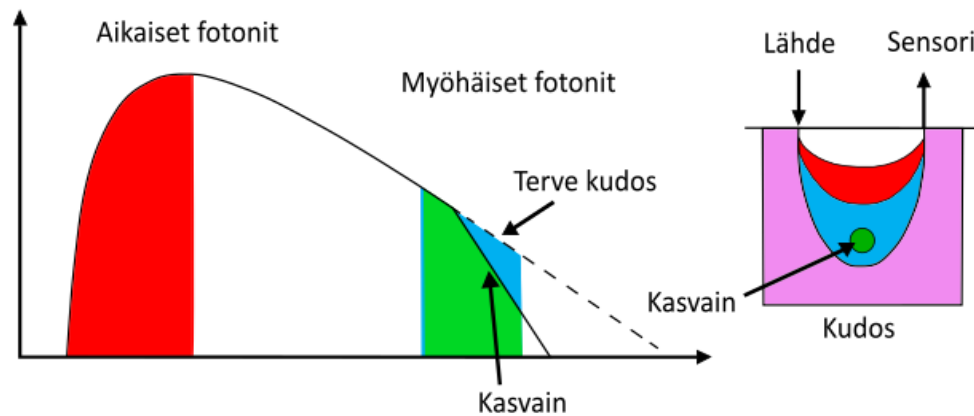
1.1. Aikatason diffuusi kuvantaminen

Diffuusi optinen kuvantaminen (DOI) on optiseen spektroskopiaan perustuva kuvantamismenetelmä, jossa kuvattavaan kohteeseen lähetetään valoa, jonka fotonit läpäisevät kohteen ja siroavat sen kautta takaisin vastaanottimeen. Valon ja aineen välisten vuorovaikutuksien perusteella saadaan selville kuvattavan näytteen optiset absorptio- sekä sirontakertoimet. Väliaineessa tapahtuvien sirontojen ja absorptioiden perusteella saadusta informaatiosta voidaan sitten muodostaa kuva tutkittavan aineen sisäisestä rakenteesta. [1]

Biologisia kudoksia tutkittaessa valon ja kudoksen välisiä vuorovaikutuksia tutkitaan 600-1000 nanometrin aallonpituudella, jossa absorptiokertoimet ovat huomattavasti pienempiä sirontakertoimiin verrattuna. Absorptiokertoimet peittyvät heijastusten alle, minkä seurauksena absorptiota on vaikea nähdä saaduista tuloksista. [3]

Mittausmenetelmää on siten usein tarpeellista laajentaa aikatasoa hyödyntävään diffuusiin kuvantamiseen, jossa tutkitaan myös, millä ajanhetkellä absorptiot ja sironnat tapahtuvat. Aikatason diffuusilla kuvantamisella absorptio- ja sirontakertoimet voidaan määrittää samanaikaisesti, minkä lisäksi mitataan fotonien kulku-aikaa aineessa, jolloin tuloksista on mahdollista myös erotella, miltä syvyydeltä kudoksesta saatu informaatio on peräisin. [4]

Kuvassa 1 on esitettyä vastaanotettujen fotonien jakauma ajan suhteena (DFOB). Punaisella merkitty alue kuvaa aikaisin havaittuja fotoneja, jotka ovat sironneet vastaanottimeen kudoksen pintakerroksien kautta. Sininen alue kuvaa syvemmällä olevaa aluetta kudoksesta. Syvemmällä kudoksessa liikkuvien fotonien matka vastaanottimeen on pidempi, jolloin ne havaitaan pintakerroksen fotoneja myöhemmin. Vihreällä kuvattuna on kudoksessa oleva kasvain, jonka absorptiokyky on huomattavasti tervettä kudosta suurempi. Tämän seurauksena myöhemmillä ajanhetkillä fotoneja saapuu vastaanottimeen huomattavasti vähemmän kuin terveen kudoksen tapauksessa. Näin esimerkiksi myöhempien fotonien jakauman jyrkkyyden perusteella voidaan tehdä päätelmiä mahdollisten epäsäännöllisyyksien esiintymisestä kudoksen rakenteesta.



Kuva 1. Aikatason diffuusilla kuvantamisella saatu DTOF-kuvaaja.

Aikatason diffuusia kuvantamista (Time-resolving diffuse optics imaging, TRDOI) ja sitä edeltäviä menetelmiä on jo pitkään sovellettu lääketieteen alalla. Erilaiset diffuusit kuvantamismenetelmät ovat olleet yleisesti käytössä varsinkin rintasyövän tutkimisessa. TRDOI:n ja sitä vastaavien menetelmien noninvasiivisen luonteen takia potilaan kudoksia voidaan tutkia täysin ulkoisesti, ilman tarvetta tehdä tutkittavalle alueelle viiltoja tai vaurioita, jolloin sitä voidaan myös soveltaa esimerkiksi aivokudosten tutkimiseen. [2]

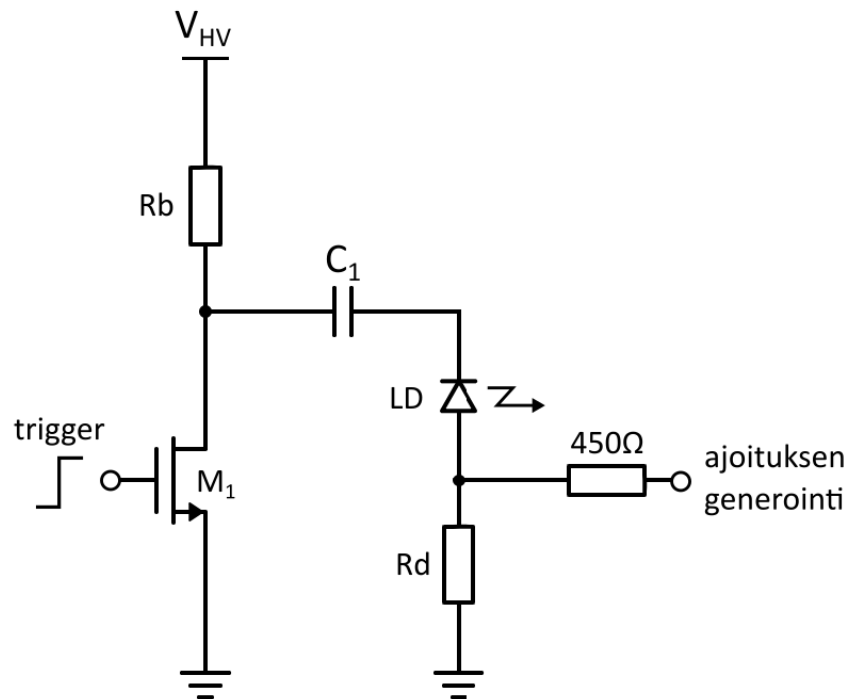
1.2. Lähetin

Kuvantamisessa käytettävä valo generoidaan tyypillisesti laserlähteellä, joka voidaan toteuttaa usealla eri tekniikalla. Aikatason diffuusia optista kuvantamista käsittelevän artikkelin mukaan laserlähteen tuottaman pulssin tulisi olla mahdollisimman lyhyt, jolloin sen puoliarvoveveys (FWHM) on maksimissaan satojen pikosekuntien luokkaa. Lisäksi pulssin aallonpituuden keskitaajuus tulee olla välillä 600-950 nm ja pulssitustaajuus megahertsien luokassa. Laserlähteiden tuottamiseen käytetään yleisesti pulssitettua laserdiodia tai niin sanottua VCSE-laseria (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser). [4-6]

Aikatason käytön myötä saatujen hyötyjen lisäksi samalla sen toteutus muuttuu monimutkaisemmaksi, minkä seurauksena ongelmaksi muodostuu laserlähteen ajurin suuri koko, tällöin etenkin pienten prototyyppien ja lääketieteessä hyödynnettävien puuttavien optisten sensorien valmistus on haastavaa. [5]

Kompaktin toteutuksen saavuttamiseksi laserdiodin ajuri, vastaanotin, sekä aikavälinmittauselektronikka voidaan integroida käyttäen CMOS-tekniologiaa. Tällöin laserlähteen perustuu CMOS-ohjattuun gain switching quantum well -laser diodiin. [5]

Kuvassa 2 nähdään laserlähettimen rakenne. Laserdiodi perustuu enhanced gain switching -periaatteeseen, jonka avulla saadaan tuotettua lyhyitä optisia pulsseja. Ajourin rakenne perustuu LC-piirin askelvasteeseen.



Kuva 2. Laserlähettimen piirikaavio.

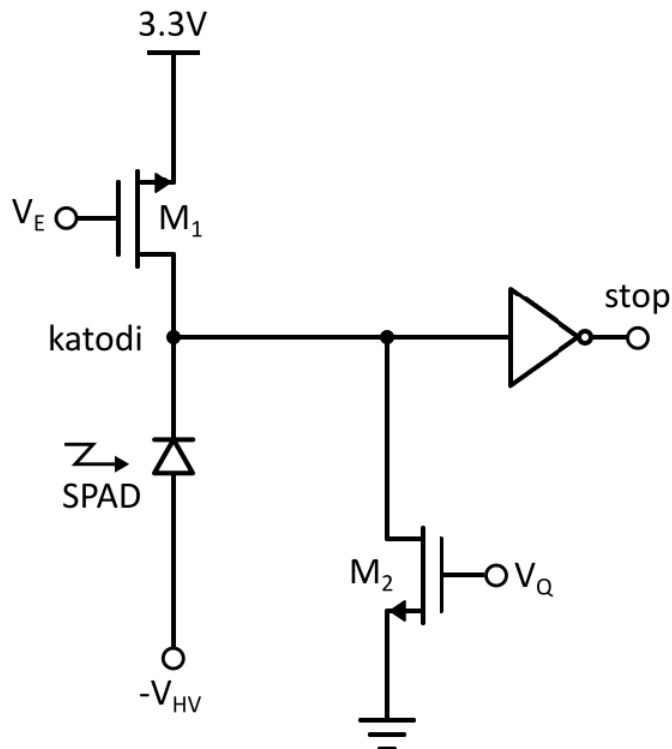
Transistori M_1 toimii piirissä kytkimenä. Sitä ohjataan transistorin hilalle saapuvalla ulkoisella ohjaussignaali, jota kutsutaan trigger-signaaliksi. Pulssisyklin alussa kytkin on avoin, jolloin kondensaattori C_1 latautuu jännitteeseen V_{HV} vastuksen R_b kautta. Kun kytkin suljetaan, sähkövirta alkaa kulkea piirin RC-haaran läpi. Kondensaattoriin latautunut varaus ei purkautu välittömästi, minkä seurauksena jännite diodin katodilla asettuu tasolle $-V_{HV}$. Tällöin laserdiodi LD alkaa johtamaan ja samalla purkamaan kondensaattorin varausta. [7]

Diodin LD läpi kulkevasta virrasta voidaan generoida ulkoinen ajoitusignaali ohjaamaan aikavälin mittausta vastuksen R_d avulla. Laserdiodin ohjausvirta saa aikaan negatiivisen jännitepulssin vastuksen R_d yli. Tämä pulssi vietään 450Ω :n sarjavastuksen kautta ulkoiselle piirille 50Ω :n koaksiaalikaapelin välityksellä. Sarjavastuksen tarkoitus on vaimentaa signaali sopivaksi ajoituspiirille, jossa on 50Ω :n kuormavastus. Tällöin saadaan 1:10 vaimennus ajoituspulssille.

1.3. Ilmaisim

Aikatason diffuusissa kuvantamisessa lähetettyjen valopulssien vastaanottamiseen käytetään tyypillisesti aikaportitettuja (time-gated), yksittäisiä fotoneja ilmaisevia vyöryvalodiodeja (SPAD). SPAD on valodiode, joka on biasoitu läpilyöntijännitteen yläpuolelle, jolloin yksittäinen saapuva fotoni riittää aiheuttamaan vyöryläpilyönnin diodissa. [5] Ilmaisimen rakenne voidaan toteuttaa käyttäen yksittäistä SPAD:ä tai kytkemällä yhteen satoja tai tuhansia SPAD:jä matriisiksi muodostaen rakenteen, jota kutsutaan piielektronimoninkertaistajaksi (SiPM). CMOS-teknologian avulla toteutettuna sekä vastaanotin ja aikavälinmittauselektronikka voidaan integroida samalle piirille. [8]

Kuvassa 3 on esitettyä vastaanottimen rakenne. SPAD:ä pystytään aktiivisesti ohjaamaan transistorien M_1 ja M_2 avulla. Alkutilanteessa transistorin M_1 hila on 3,3 V:n käyttöjännitteessä ja M_2 :n V_Q -jännitteellä (3,3 V) SPAD pidetään alle läpilyöntijännitteen. Kun vastaanotin saa start-signaalin lähettimeltä, jännitteet V_Q ja V_E asettuvat 0V:iin, minkä seurauksena diodin katodi latautuu transistorin M_1 kautta käyttöjännitteeseen. Kun hilajännite V_E palautetaan 3,3V:iin, SPAD on niin sanotusti aktiivisessa tilassa valmiina vastaanottamaan fotoneita. [5]



Kuva 3. SPAD-vastaanottimen piirikaavio.

1.4. Aikavälinmittauspiiri

Jotta tutkitusta kohteesta saadaan muodostettua luvun 1.1 kuvan 1 mukainen DTOF-kuvaaja, fotonien kulkeutumisaikaa väliaineessa tulee mitata. Kulkeutumisaikaa kuvaa termi Time-of-Flight (TOF), suomeksi lentoaika, joka kertoo kuinka kauan lähetetyltä fotonilta kestää kulkeutua väliaineen kautta ilmaisimeen.

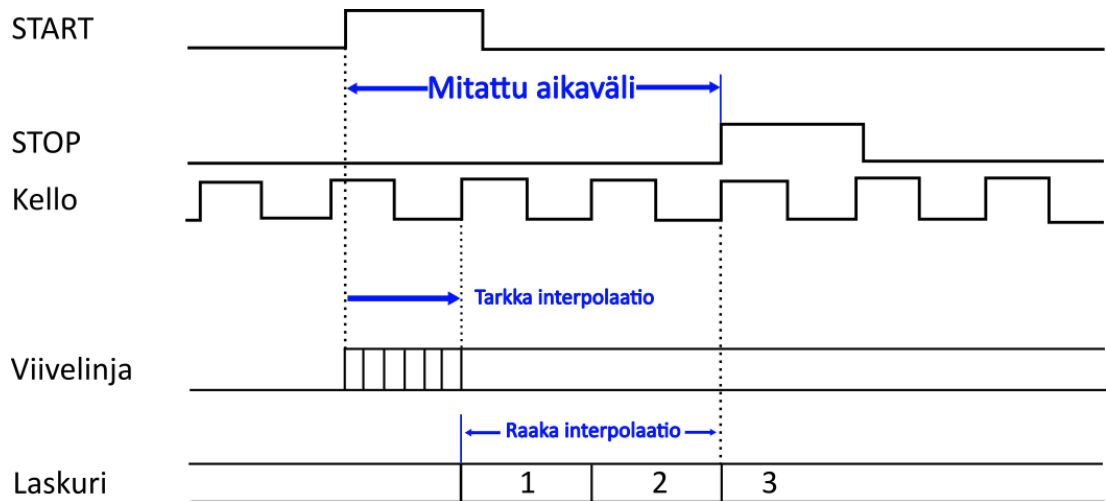
Lentoajan laskemiseen käytetään erillistä aikavälinmittauspiiriä, TDC:tä (Time-to-Digital Converter), jonka toimintaa ohjataan ulkoisilla ajoitussignaaleilla.

Yksinkertaisimmillaan TDC:n rakenne koostuu oskillaattorista ja laskurista, jossa laskuri laskee kellojaksoja. Asynkronisten signaalien aikaväli voidaan digitalisoida laskemalla tietyllä taajuudella toimivan oskillaattorin kellojaksojen määrä mitattavan aikavälin aikana. Yleensä tarvitaan tätä monimutkaisempaa rakennetta, sillä CMOS-tekniologialla toteutetun TDC:n kellotaajuus halutaan yleensä alhaiselle, noin 10 – 100 MHz:n taajuudelle. Yksinkertaisemmalla rakenteella lyhyen matkan mittauksissa oskillaattorin kellotaajuuden tulisi olla gigahertsien luokassa, jotta riittävä resoluutio saavutettaisiin.

Kellotaajuutta voidaan pienentää esimerkiksi interpoloimalla ajoitussignaalien saapumisajat suhteessa kellonjaksoon. Yleinen menetelmä TDC:n toteuttamiseksi perustuu Nutt-menetelmään, jossa käytetään laskurin ja interpolaattorin yhdistelmää, jolloin aikavälinmittaukselle saadaan laaja dynaaminen alue ja parempi tarkkuus. [9-10]

Tehokas menetelmä TDC:n toteuttamiseen on käyttää integroituja viivelinjoja ja interpolaatiota. Viivelinjassa kellojakso jaetaan pienempiin yhtä pitkiin jaksoihin, minkä seurauksena mittaustarkkuutta saadaan parannettua huomattavasti. [9]

Kuvassa 4 on esitettyä aikakuvaaja kuvitteellisesta aikavälinmittauksesta. Start-signaali käynnistää mittauksen, jonka aikana laskuri laskee kuluneet kellojaksot siihen asti, kunnes piiri saa stop-signaalin. Laskurilla saadaan toteutettua niin sanottu ”raaka” interpolaatio. Tarkempi interpolaatio saadaan aikaiseksi viivelinjoilla.



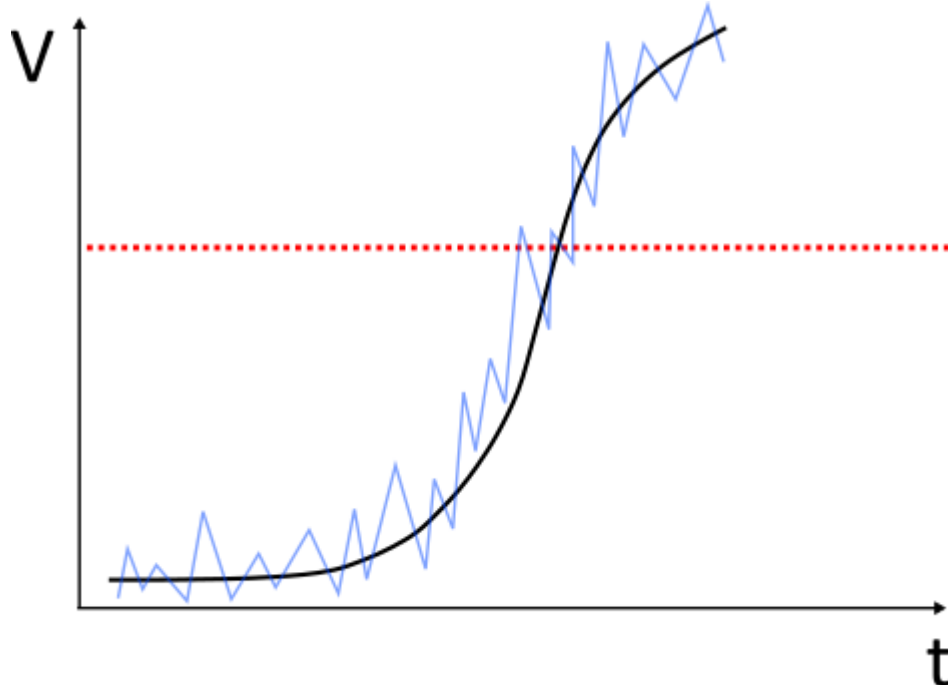
Kuva 4. Kuvaaja aikavälin laskennan periaatteesta.

1.5. Jitteritön start

Aikavälinmittauspiirille saapuva ajoitusignaali, eli niin sanottu start-signaali, määrittää millä ajanhetkellä fotoneja aletaan kerätä. Start-signaalin ajankohtaa säätämällä voidaan määrätä, miltä syvyydeltä fotoneja halutaan mitata. Jos ajoitusignaali asetetaan myöhemmälle ajankohdalle, ainoastaan ilmaisimeen saapuvat myöhäiset fotonit ilmaistaan, ja siten kuvantaminen saadaan rajattua kohteen syvimpiin kerroksiin.

Start-signaali voidaan generoida laserlähettimelle tulevasta ulkoisesta ohjaussignaalista. Ohjaussignaalin esiintyy satunnaista kohinaa, minkä seurauksena start-signaali ei generoidu joka pulssilla täysin samassa ajankohdassa, vaan sen ajoituksessa esiintyy pientä satunnaista virhettä, niin sanottua ”jitteriä”.

Kuvassa 5 on esitetty ohjaussignaalin pulssin nouseva reuna, sekä sinisellä signaalissa esiintyvää satunnaista kohinaa. Start-signaali generoidaan alkavaksi, kun ohjaussignaalin jännite ylittää halutun jännitteen arvon, kuvattuna punaisella. Ideaalisessa tilanteessa ilman kohinaa, signaali generoitaisiin aina samalla ajanhetkellä, mutta kohinan vaikutuksesta signaalin jännite voi hetkellisesti ylittää jänniterajan ennen optimaalista ajanhetkeä, minkä seurauksena start-signaali generoituu väärällä ajanhetkellä.



Kuva 5. Ulkoisen ohjaussignaalin jännite ajan funktiona.

Kohinan aiheuttaman jitterin lisäksi myös ohjaussignaalin tuottava pulssigeneraattori luo signaaliin pientä jitteriä, joka on esitetty kuvassa 6. Ideaalisessa tilanteessa pulssit lähetettäisiin aina samalla taajuudella, esimerkiksi 10 MHz:ä, jolloin pulssien välinen aikaero olisi vakioarvona 0,1 mikrosekuntia. Pulssigeneraattori ei kuitenkaan toimi täysin ideaalisesti, minkä seurauksena lähetystaajuus voi hieman vaihdella hetken mukaan, jolloin pulssien välisissä aikaeroissa esiintyy pientä virhettä. Pulssigeneraattorin aikavirheen myötä myös start-signaali generoidaan väärällä ajanhetkellä, minkä seurauksena jitter etenee aikavälinmittauspiirille saakka.



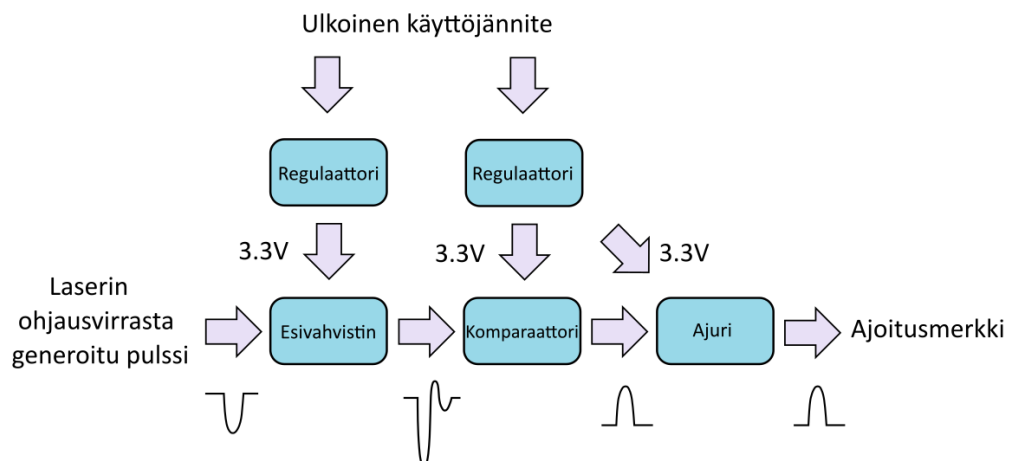
Kuva 6. Pulssigeneraattorin pulsseja ja siinä esiintyvää jitteriä.

Jitteriä saadaan pienennettyä generoimalla ajoitussignaali ulkoisen ohjaussignaalin sijaan laserdiodin ohjausvirrasta. Laserdiodin läpi kulkevaa virtaa käytettäessä sekä lähetetty valopulssi että ajoitussignaali generoidaan samasta virrasta, jolloin aikavirheiden esiintyvyys pienenee huomattavasti ja lopputuloksena saadaan vähemmän jitteriä sisältävä start-signaali.

2. AJOITUSMERKIN GENEROINTIPIIRI

2.1. Laserpulssittimen rakenne

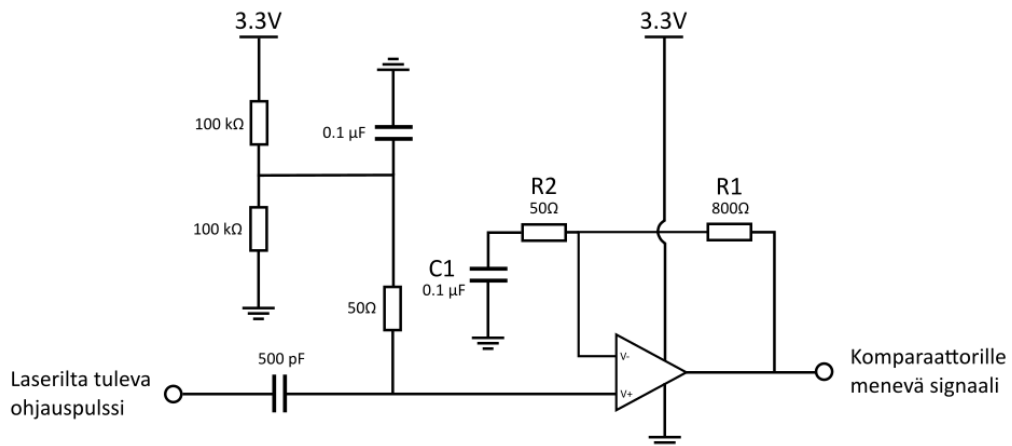
Kuvassa 7 on yksinkertaistettu esitys ajoitusmerkin generoivan piirin rakenteesta. Luvussa 1.2 esitetyn lähettimen laseriodin läpi kulkeva virta toimii lähteenä ajoitusmerkin generoinnille. Laserin ohjausvirrasta generoitu jännitepulssi tuodaan esivahvistimeen, joka vahvistaa pulssia. Vahvistuksen jälkeen komparaattori vertailee jännitepulssia käyttäjännitteestä saatuun referenssitasoon ja muodostaa sen perusteella lopullisen logiikkatasoisen ajoitussignaalin. Lopuksi komparaattorin tuottama ajoitussignaali viedään ulos piiriltä ajurilla, joka pystyy ajamaan aikavälinmittauspiirin 50Ω :n kuormavastusta koaksiaalikaapelin kautta. Esivahvistimen, komparaattorin ja ajurin tarvitsemat käyttäjännitteet tuotetaan ulkoisesta käyttäjännitteestä regulaattoreilla.



Kuva 7. Ajoitusmerkin generointipiirin lohkokaavio

2.1.1. Esivahvistin

Kuvassa 8 on piirin esivahvistimen piirikaavio. Esivahvistimelle tuleva signaali saadaan laserlähettimestä, jonka rakenne on kuvattuna luvun 1.2 kuvassa 2. Signaali on 1 MHz:n taajuudella oleva noin 1 nanosekunnin pituinen negatiivinen pulssi. Regulaattorin avulla ulkoinen käyttöjännite pudotetaan operaatiovahvistimelle sopivaksi 3,3 V:n jännitteeksi, minkä lisäksi kahden 100 k Ω :n vastuksella saadaan samalla tuotettua sopiva DC-taso pulssille. Yksinkertaisen jännitejaon perusteella käyttöjännite puolittuu, ja pulssin DC-tasoksi saadaan noin 1,6 V.



Kuva 8. Esivahvistimen piirikaavio.

Esivahvistuksen tarkoituksena on vahvistaa saapuvaa signaalia siten, että pulssin amplitudi kasvaa, ilman DC-tason vahvistusta. Esivahvistus toteutetaan käyttämällä suoraa operaatiovahvistinkytkentää, jonka vahvistus määräytyy vastuksien R1 ja R2 perusteella. Tuloporttien V+ ja V- välille voidaan ajatella virtuaalinen oikosulku piensignaalitasolla, jolloin molemmat portit ovat 0 V:n jännitteessä. Tällöin operaatiovahvistimen lähtöjännite V_{out} saadaan laskettua jännitejaolla tulojännitteestä V_{in} kaavalla 1:

$$V_{out} * \frac{R2}{R2+R1} = V_{in} \quad (1)$$

Kytkenän vahvistus A_v saadaan kaavan 1 avulla muotoon:

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R1}{R2}$$

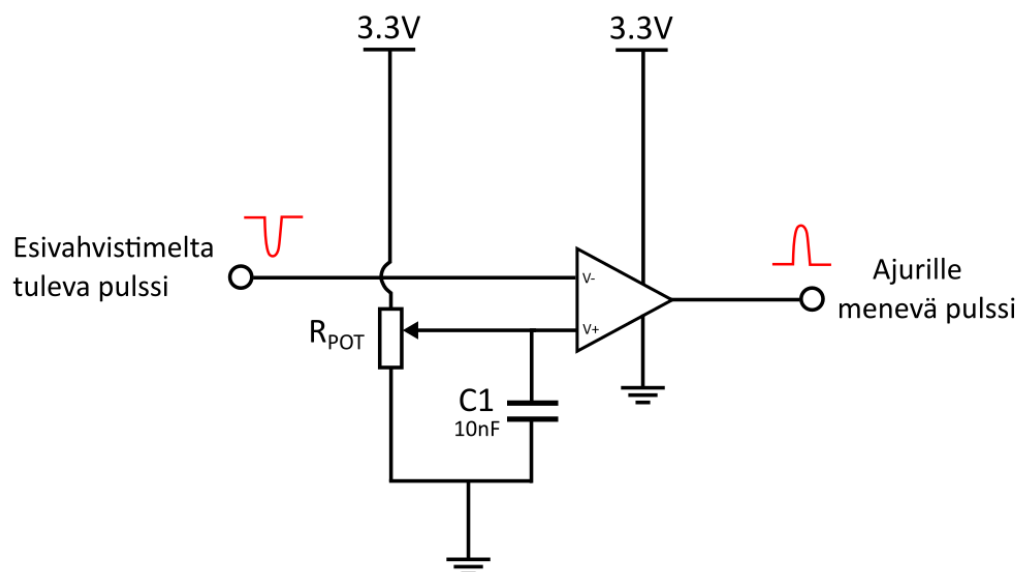
Jolloin 50 Ω :n ja 800 Ω :n vastuksilla vahvistukseksi saadaan:

$$A_v = 1 + \frac{800\Omega}{50\Omega} = 1 + 16 = 17 \left(\frac{V}{V}\right)$$

Tulevan jännitepulssin amplitudi vahvistuu siten ideaalisessa tilanteessa 17-kertaiseksi. Takaisinkytkentään tarvitaan kondensaattori C1 estämään DC-tason vahvistuminen lähtöön, sillä muuten vahvistettu 17-kertainen jännitetaso ylittäisi operaatiovahvistimen käyttöjännitteen, minkä seurauksena halutun pulssin sijasta vahvistimen lähdössä näkyisi tasainen 3,3V:n käyttöjännite.

2.1.2. Komparaattori

Kuvassa 9 on esitetty piirin kääntävä komparaattorirakenne. Komparaattorin V- tuloon saapuu esivahvistimen vahvistama jännitepulssi, jota verrataan portin V+ referenssisignaaliin. Referenssisignaali tuotetaan regulaattorilta saadusta käyttöjännitteestä säätövastuksen avulla. 3,3V:n jännitteestä voidaan asettaa haluttu kynnyksjännite säätämällä vastuksen resistanssia. Komparaattori vertaa porttien V+ ja V- välistä jännite-eroa. Kun vahvistettu negatiivinen jännitepulssi hetkellisesti alittaa asetetun kynnyksjännitteen rajan, komparaattorin lähtöjännite nousee. Komparaattori siis muodostaa alkuperäisestä saapuvasta jännitepulssista käänteisen, eli positiivisen logiikkatasoisen jännitesignaalin.



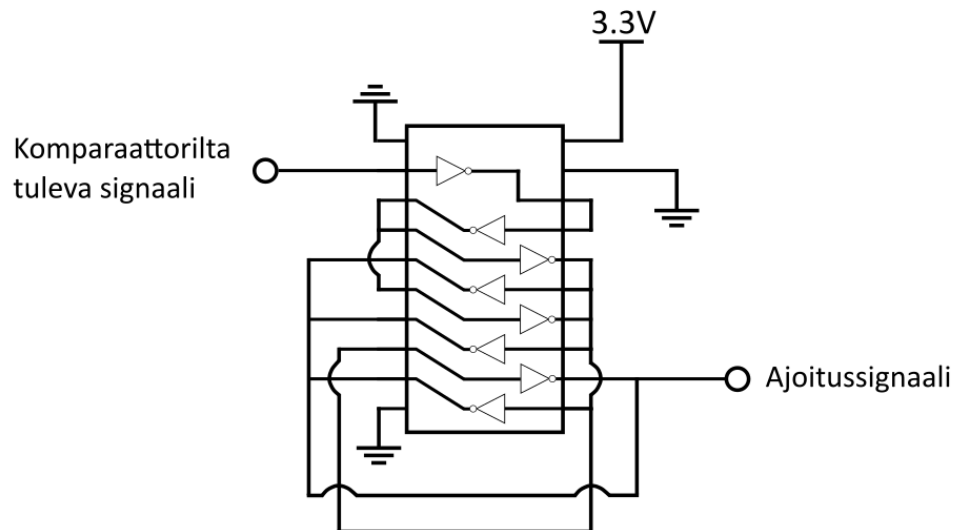
Kuva 9. Komparaattorin piirikaavio.

Kohinan ja häiriöiden vuoksi komparaattorille tulevassa signaalissa voi esiintyä ylimääräistä värähtelyä DC-tason ympärillä. Säätämällä kynnyksjännite tarpeeksi alhaiseksi, niin etteivät hetkelliset värähdykset alita sitä, kohinasta aiheutuvat liipaisut saadaan poistettua.

2.1.3. 50 Ohmin ajuri

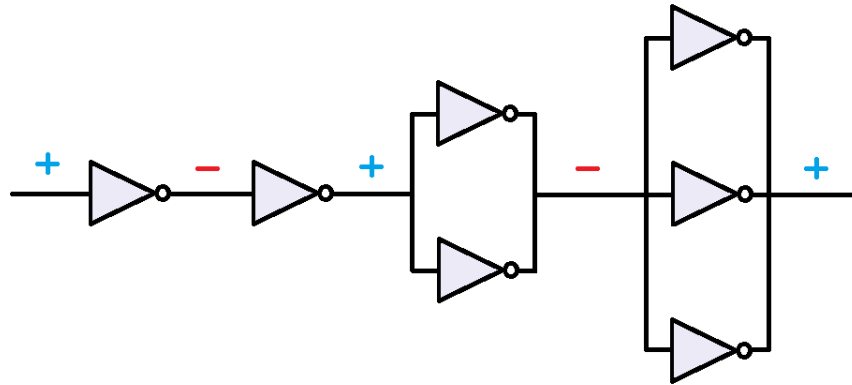
Komparaattorin lähdöstä saatu logiikkasignaali on muodoltaan sopiva ajoitusignaaliksi aikavälinmittauspiirille. Valmis ajoitusignaali siirretään ulos generointipiiriltä 50 Ω :n koaksiaalikaapelin avulla. Koska komparaattorin maksimivirranantokyky on vain 20 mA:n luokkaa, se ei riitä ajamaan 50 Ω :n kuormaan logiikkatasoista signaalia. Tällöin täytyy komparaattorin jälkeen käyttää vielä ajuripiiriä. Työssä käytetyn ajuripiirin virranantokyky on 200 mA:n luokkaa, jolloin se pystyy ajamaan 3,3 V:n logiikkatasoisen signaalin aikavälinmittauspiirille.

Kuvassa 10 on esitetty 20-pinninen 74AC240 line driver -ajuri. Komponentin sisällä on kymmenen invertteriä. Pinnit 10 ja 20 ovat varattu käyttöjännitteelle ja maatasolle, sekä pinnit 1 ja 19 tilanohjaukseen. Muut pinnit ovat yhteydessä sisäisiin inverttereihin. Kytkemällä näitä pinnejä sarjaan inverttereistä voidaan muodostaa pitkä yhtenäinen ketju, jonka avulla ajoitusignaalin pulssi saadaan ajettua 50 Ω :n kuormaan. [11]



Kuva 10. Ajurin piirikaavio.

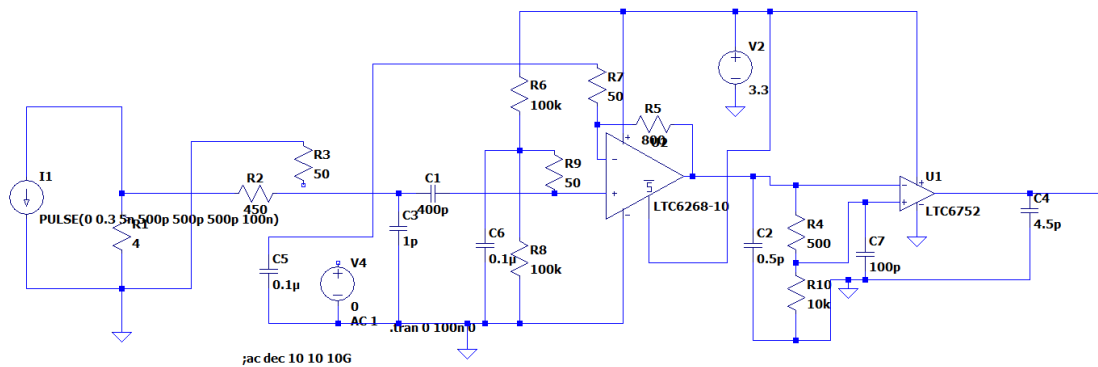
Kuvassa 11 nähdään ajurin kytkennät yksinkertaistetussa muodossa. Kytkentä koostuu neljästä invertteriryhmästä sarjaan kytkettynä. Ajokykyä saadaan parannettua, kun inverttereiden määrää ryhmittäin lisätään kytkemällä useampia inverttereitä yhteen rinnakkain. Invertteriryhmiä on parillinen määrä sarjakytkennässä, jotta ajurin tulo- ja lähtöjännitteet pysyvät samanmerkkisinä.



Kuva 11. Ajurin invertterikytkennät.

3. SIMULOINTI

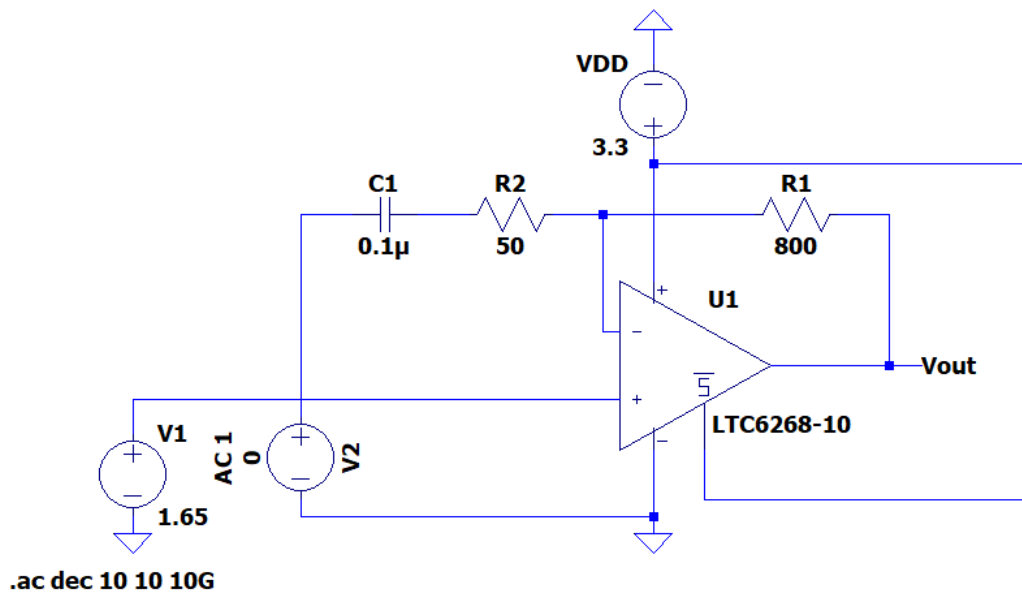
Ajoitusmerkin generoivaa piiriä simuloidaan käyttäen Linear Technologyn LTSpice -piirisimulaatio-ohjelmaa. Piirin simulaatiomalli on esitettyä alla olevassa kuvassa 12. Simulaatiomalli sisältää generointipiirille tulevaa ulkoista laserohjaimen pulssia mallintavan virtalähteen I1, esivahvistimen sekä komparaattorin. Generointipiirissä oleva ajurilla ei ole olennaista vaikutusta piirin toiminnan stabiilisuuteen tai ajoitusignaalin muotoon, joten se on jätetty pois simulaatiomallista.



Kuva 12. Piirin LTSpice-simulaatiomalli.

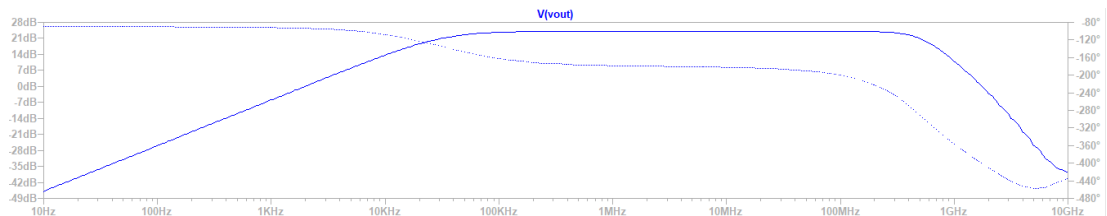
3.1. Boden-kuvaaja

Boden-kuvaajan avulla tutkitaan piirissä tapahtuvia muutoksia taajuuden funktiona. Sen avulla nähdään, miten signaalin vahvistus ja vaihe käyttäytyy eri taajuuksilla. Boden-kuvaajasta nähdään myös käytetyn vahvistimen kaistanleveys ja sen avulla saadaan mallinnettua piirin stabiilisuutta. Ajoitusmerkin generointipiirissä signaali vahvistetaan esivahvistimella, ja muilla piirin osilla ei ole vaikutusta signaalin vahvistukseen. Vahvistimen toimintaa voidaan siten simuloida paremmin yksinkertaistamalla piiriä ja tarkastelemalla vain esivahvistinta ja siihen liittyviä komponentteja. Yksinkertaistetun simulointipiirin malli on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Esivahvistimen simulaatiomalli.

Simuloidaan vahvistinta AC-analyysillä taajuusalueella 10Hz-10GHz 1,65 V:n tulojännitteellä. Kuvassa 14 on esitettyä solmupisteestä V_{out} saatu Boden-kuvaaja. Tumma yhtenäinen viiva kuvaa vahvistusta desibeleissä eri taajuuksilla. Katkonainen viiva kuvaa signaalin vaihetta. Kuvaajan perusteella vahvistus kaistalla on 24 dB, joka vastaa noin 15,8-kertaista vahvistusta.

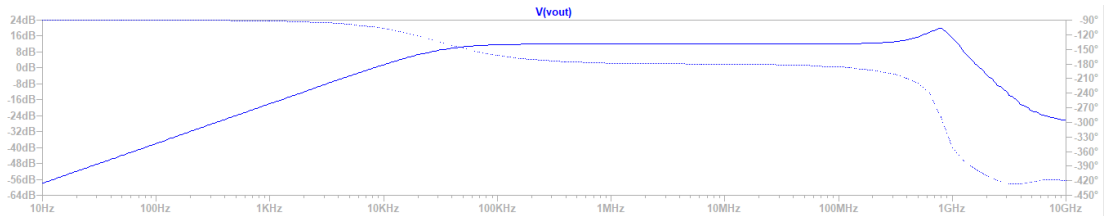


Kuva 14. Vahvistimen Boden-kuvaaja.

Vahvistimen rajataajuudet sijaitsevat pisteissä, joissa vahvistus laskee -3dB kaistalla olevasta vahvistuksesta. Kuvaajan perusteella vahvistimen alarajataajuudeksi saadaan siten määriteltyä 31,6 kHz ja ylärajataajuudeksi 492 MHz. Vahvistimen datalehdessä vahvistimen ylärajataajuudeksi on määritelty 500 MHz, joka vastaa simuloitua ylärajataajuuden arvoa. [12]

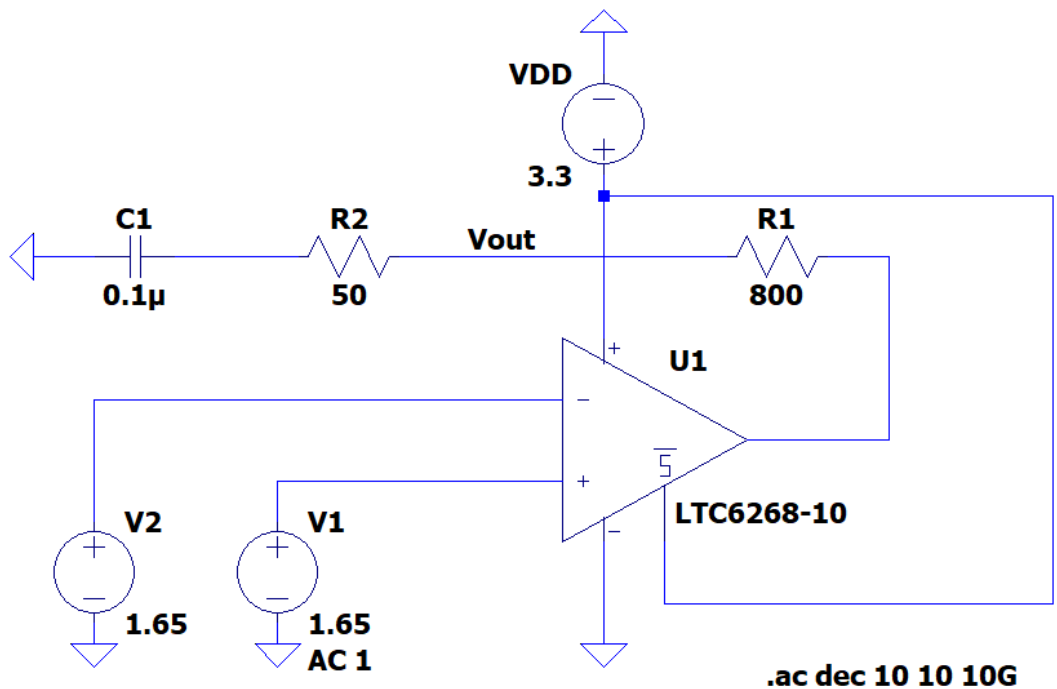
Rajataajuuksien erotuksesta saadaan laskettua vahvistimen kaistanleveys. Kaistanleveydeksi saadaan siten simulaation perusteella $492 \text{ MHz} - 31,6 \text{ kHz} = 491,7 \text{ MHz}$. Vaihekuvaajasta nähdään vaiheen olevan alussa -90° , minkä jälkeen vaihe laskee edelleen 90 astetta rajataajuuksien kohdalla.

Kuvan 14 tapauksessa vahvistin on stabiili ja Boden-kuvaaja on tasainen. Pientämällä vahvistusta, esimerkiksi muuttamalla vastuksen R1 arvoa 800 Ω :sta 200 Ω :iin. Alla olevasta kuvasta 15 nähdään, miten ylärajataajuuden kohdalla havaitaan piikitystä ja vaihesiirto jyrkkenee, minkä seurauksena kaistanleveys pienenee ja vahvistimen toiminta muuttuu siten epästabiilimmaksi. [13, sivut 84-85]



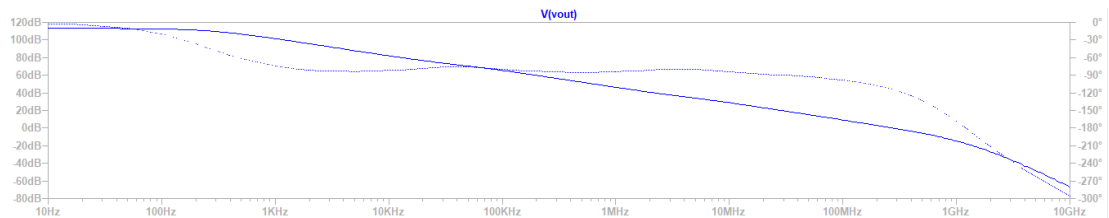
Kuva 15. Boden-kuvaaja epästabiilissa tilanteessa.

Tutkitaan vahvistimen vaihevaraa ja stabiilisuutta kuvan 16 piirillä. Vahvistinta ei ole takaisinkytketty ja nyt silmukkavahvistus saadaan mitattua vastusten R1 ja R2 välisestä pisteestä.



Kuva 16. Silmukkavahvistuksen simulointi.

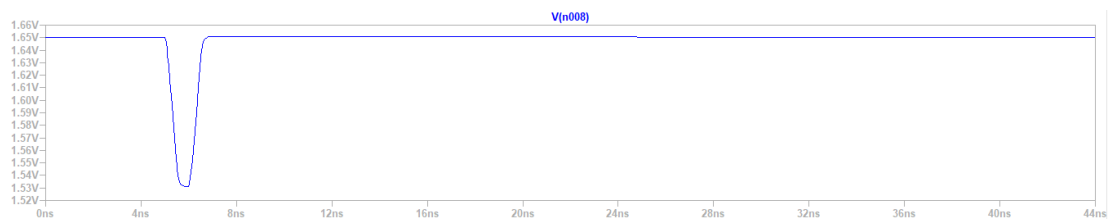
Vaihevara määritetään kuvasta 17 tarkastelemalla vaihesiirtoa pisteessä, jossa silmukavahvistus laskee 0 dB:n alapuolelle. Tämä piste sijaitsee taajuudella 275 MHz, jossa vaihe on -114° . Vaihevara saadaan vertaamalla, kuinka kaukana saatu vaihesiirto on -180 asteesta. Vaihevaraksi saadaan siten $180^\circ - 114^\circ = 66^\circ$. Yli 45 asteen vaihevaraa voidaan pitää stabiilina, ja tasainen vaste saadaan, kun vaihevara on $60-70^\circ$. Tämän perusteella vahvistimen toiminnan voidaan sanoa olevan stabiili, eikä amplitudivasteessa ilmene piikitystä, kuten kuvasta 14 voidaan todeta. [13, sivu 130]



Kuva 17. Silmukavahvistuksen kuvaaja.

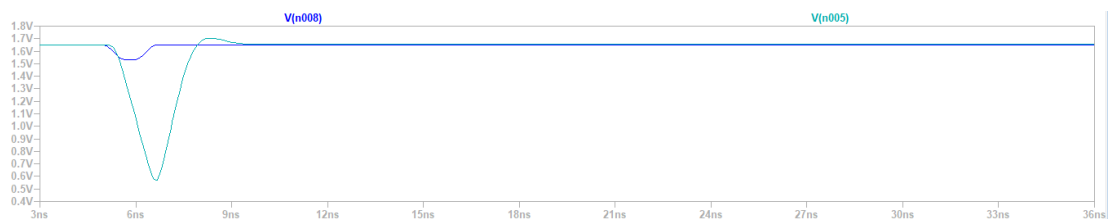
3.2. Transientti

Transienttisimulaatiolla saadaan kuvattua generointipiirin toimintaa ajan funktiona. Piirin simulaatiomallissa tarkastellaan yksittäisen pulssin muotoa vaiheittain sen edetessä vahvistimen ja komparaattorin läpi. Simulaatiomallissa virtalähde generoi 5 nanosekunnin viiveen jälkeen 1,5 nanosekunnin mittaisen yksittäisen pulssin, joka kuvaa laserin ohjausvirrasta saatavaa pulssisignaalia. Pulssi on esitettyä kuvassa 18.



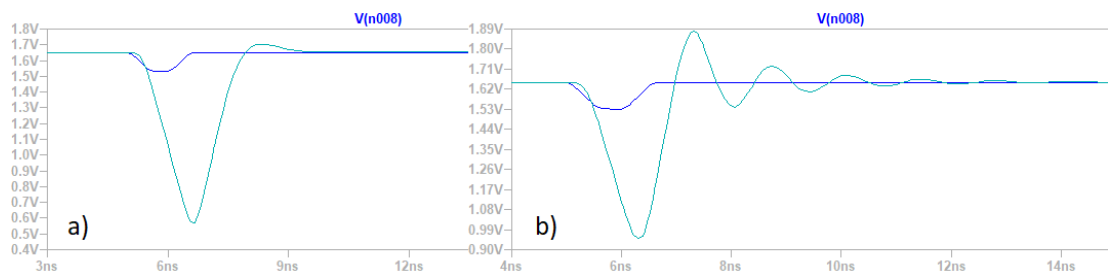
Kuva 18. Simuloitu ohjausvirran pulssi.

Kuvassa 19 sininen signaali kuvaa signaalipulssia ennen vahvistusta ja vihreä vahvistuksen jälkeen. Negatiivisen pulssin amplitudi on ennen vahvistusta noin 100 mV ja vahvistuksen jälkeen amplitudi on kymmenkertaistunut.



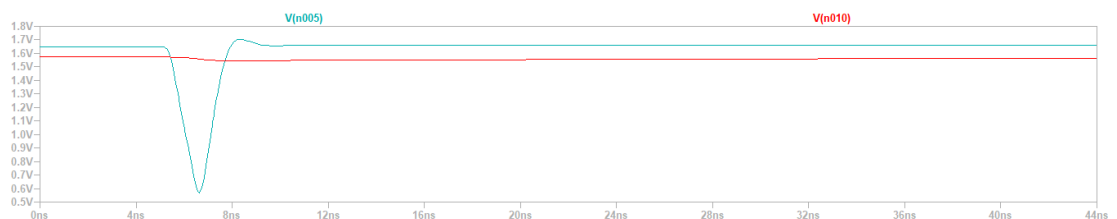
Kuva 19. Vahvistuksen vaikutus signaaliin.

Kuvassa 20 on esitettyä pulssin muodon muuttuminen eri vahvistuksilla. a) -kohdassa esivahvistimen vastuksen R1 koko on $800\ \Omega$:a ja vahvistus teoriassa 17-kertainen. b) -kohdassa vastus on $200\ \Omega$:a, jolloin signaalin kokonaisvahvistus on pienempi. Simulaation perusteella huomataan, että vahvistusta pienentäessä signaalin värähtely asetetun jännitetaso ympärillä lisääntyy. Liian suuret värähtelyt voivat aiheuttaa ylimääräisiä liipaisuja komparaattorilla, mutta toisaalta vahvistuksen kasvaessa samalla myös käytettävä kaistanleveys pienenee. Vahvistuksen tulee siten olla tarpeeksi suuri, jotta vahvistin toimii stabiilisti, mutta myös tarjota sopiva kaistanleveys vahvistukselle. $50\ \Omega$:n ja $800\ \Omega$:n vastuksia käytettäessä vahvistus saadaan asetettua sopivalle tasolle siten, ettei signaali värähtele ja kaistanleveys pysyy sopivana.



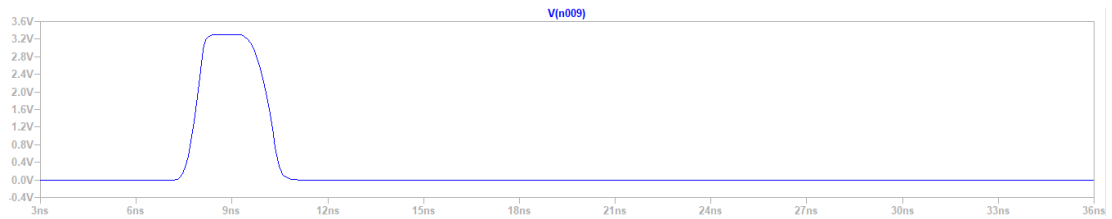
Kuva 20. Signaalin muoto eri vahvistuksen arvoilla.

Kuvassa 21 on vihreällä esivahvistettu pulssisignaali ja punaisella komparaattorin toiseen tuloporttiin asetettu jännitetaso, johon komparaattori vertaa saapunutta pulssisignaalia. Jännitetaso voidaan säätää simulaatiomallissa sopivaksi kuvan 12 vastuksien R4 ja R10 suhteella, tai käyttäen säätövastusta. Komparaattorin jännitetasoa säätämällä saadaan estettyä mahdolliset värähtelyjen aiheuttamat liipaisut.



Kuva 21. Komparaattorille saapuvat signaalit.

Kuvassa 22 on esitettyä komparaattorin lähdöstä saatu lopullinen ajoitusignaali. Pulssi muistuttaa luvun 1.4 kuvan 4 logiikkatasoista ”Start”-signaalia, missä jännitetaso vaihtelee kahden jännitetason välillä, tässä tapauksessa 0 V:n ja käyttöjännitteen, eli 3,3 V:n välillä. Aikavälinmittauspiiriä ohjaavan pulssin tulee olla vähintään 1 nanosekunnin mittainen, jotta TDC ehtii reagoida signaalin muutokseen. Kuvasta 19 ajoitusignaalin pulssin leveydeksi saadaan 10 nanosekuntia, jolloin sen voidaan todeta olevan riittävä aikavälinmittauspiirin ohjaukseen.



Kuva 22. Komparaattorin tuottama ajoitusignaali.

4. YHTEENVETO

Aikatason diffuusin kuvantamisen tuloksena saatu DTOF-kuvaaja esittää fotonien etenemistä tutkittavassa väliaineessa ajan suhteena. Lentoaika kuvaa aikaa, joka yksittäiseltä fotonilta kestää kulkea lähettimestä vastaanottimeen. Lentoaikaa mitataan käyttäen aikavälinmittauspiiriä, jonka toimintaa ohjataan ajoitussignaalin avulla. Jitterin minimoimiseksi ajoitussignaali generoidaan erillisellä piirillä suoraan fotonin lähettävästä laserlähettimen ohjausvirrasta. Ohjausvirrasta saatu negatiivinen jännitepulssi vahvistetaan esivahvistimella, minkä jälkeen komparaattorilla siitä muokataan 3.3 V:n positiivinen logiikkatasoinen ajoitussignaali. Lopuksi pulssin virta vahvistetaan sopivaksi käyttäen erillistä ajuria, minkä jälkeen valmis ajoitussignaali voidaan siirtää aikavälinmittauspiirille koaksiaalikaapelilla.

Piirin toiminnan kannalta rajoittavia tekijöitä ovat esivahvistimen stabiilisuus ja sen kaistanleveys, minkä lisäksi ajoitussignaalin amplitudin tulee olla käyttöjännitteen suuruinen, sekä pulssin leveys vähintään nanosekunnin luokkaa. Luvun 3 AC-simulaatiotulosten perusteella nähdään esivahvistimen stabiilisuuden ja kaistanleveyden olevan käänteisesti riippuvaisia toisistaan. Esitetyillä komponenttiarvoilla Boden-kuvaajan ja vaihevaran perusteella vahvistimen toiminta voidaan todeta stabiiliksi ja kaistanleveys sopivaksi. Transienttisimulaatiolla mallinnetaan ajoitussignaalin muotoa sen edessä piirillä. Tuloksista huomataan, että esivahvistuksen aiheuttamasta värähtely ei aiheuta komparaattorissa ylimääräisiä liipaisuja, vaan lopputuloksena saadaan amplitudiltaan ja pulssinleveydeltään sopiva ajoitussignaali. Näin ollen generointipiirin tuottaman ajoitusmerkin voidaan todeta sopivan aikavälinmittauspiirin ohjaamiseen.

5. LÄHTEET

- [1] Patterson M.S., Chance B., Wilson B.C., “Time resolved reflectance and transmittance for the noninvasive measurement of tissue optical properties”, 1989.
- [2] Durduran T., Choe R, Baker W.B., Yodh A.G., “Diffuse Optics for Tissue Monitoring and Tomography”, 2010.
- [3] Pifferi A., Contini D., Dalla Mora A., Farina A., Spinelli L., Torricelli A., “New frontiers in time-domain diffuse optics, a review”, 2016.
- [4] Alayed M., Deen M., “Time-Resolved Diffuse Optical Spectroscopy and Imaging Using Solid-State Detectors: Characteristics, Present Status, and Research Challenges” 2017.
- [5] Nissinen J., Nissinen I., Jahromi S., Talala T., Kostamovaara J., “Time-gated CMOS SPAD and a Quantum Well Laser Diode with a CMOS driver for Time-Resolved Diffuse Optics Imaging”, 2018.
- [6] Dalla Mora A., Contini D., Martelli F., Tosi A., Boso G., Farina A. ... Pifferi A., “Towards next-generation time-domain diffuse optics for extreme depth penetration and sensitivity”, 2015.
- [7] Nissinen J., Kostamovaara J., “A High Repetition Rate CMOS Driver for High Energy Sub-ns Laser Pulse Generation in SPAD-Based Time-of-Flight Range Finding”, 2016.
- [8] Dalla Mora A., Martinenghi E., Contini D., Martelli F., Tosi A., Boso G., ... Pifferi A., “Fast silicon photomultiplier improves signal harvesting and reduces complexity in time-domain diffuse optics”, 2015.
- [9] Jansson J.-P, Mäntyniemi A., Kostamovaara J., “A CMOS time-to-digital converter with better than 10 ps single-shot precision”, 2006.
- [10] Nissinen I., “CMOS Time-to-Digital Converter Structures for the Integrated Receiver of a Pulsed Time-of-Flight Laser Rangefinder”, 2011, sivu 22.
- [11] 74ACT240 Datalehti URL: <http://www.mouser.com/ds/2/149/74ACT240-888464.pdf>
- [12] LTC6268-10 Datalehti URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/626810f.pdf> LTC6268-10
- [13] Rahkonen T., ”PIIRITEORIA II” (c) 1996-2018