

TARTU ÜLIKOOL  
LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND  
Füüsika Instituut

Ranno Kena

**AUTOMATISEERITUD PÄIKESEVARI  
TAEVAKAAMERALE**

Bakalaureusetöö arvutitehnikas (12 EAP)

Juhendaja: Joel Kuusk

Luban töö kaitsmisele:

Juhendaja .....

*allkiri, kuupäev*

Tartu 2013

## Sisukord

Sissejuhatus.....	3
1. Päikese kiirguse mõõtmise ja taeva pildistamise vajadus.....	5
2. Alternatiivsed meetodid taeva pildistamiseks ja otsese päikese kiirguse varjamiseks ..	6
2.1. Liikumatu võru .....	6
2.2. Ribaga kumerpeegel .....	7
2.3. Liikuv poolvõru .....	7
2.4. Päikesejälgija.....	8
2.5. Tartu Observatooriumis siiani kasutusel olnud seade .....	9
3. Varju liigutaja disain.....	10
3.1. Nõuded .....	10
3.2. Tööpõhimõte.....	10
3.3. Varju asendi arvutus .....	12
3.3.1. Ajavõrrand .....	13
3.3.2. Päikese seniitnurk ja asimuut.....	14
3.3.3. Koordinaatteisendus objektiivide koordinaatsüsteemist tiguülekanne koordinaatsüsteemi .....	15
4. Seadme tehniline teostus.....	16
4.1. Mehaanika .....	16
4.1.1. Mootorid ja ülekanded .....	16
4.2. Elektroonika .....	17
4.3. Tarkvara.....	20
4.3.1. Kasutajaliides.....	20
4.3.2. RTC ja koordinaadid.....	21
4.3.3. Fotodiodid.....	21
Kokkuvõte.....	22
Kasutatud kirjandus .....	23
Summary.....	25
Lisa 1. Elektroonika skeem.....	26

## Sissejuhatus

Tartu (Tõravere) Observatooriumi taimkatte kaugseire tööühma üheks keskseks uurimisteenaks on kiirguslevi taimkattes ja selle kasutamine taimkatte, eelkõige metsade optilises kaugseires. Uuringu jaoks arendatakse taimkatte kiirguslevimudeleid. Uuringuid tehakse Järvelja õppe-katsebaasi metsades ja nende kohal.

Maa peal päikesekiirguse mõõtmisel, olenemata sellest, kas mõõdetakse otse päikeselt saabunud või millelki peegeldunud kiirgust, on häirivaks asjaoluks atmosfäär, mida päikeselt saabunud kiirgus peab läbima. Eriti kiireid ja tugevaid muutusi põhjustavad päikese eest läbi liikuvad pilved. Seetõttu on kiirgusmõõtmise kvaliteedi hindamise seisukohalt oluline teada pilvede hulka ning nende asendit päikese suhtes.

Taevapildi jäädvustamiseks kasutatakse kalasilmobjektiiviga kaamerat. Kalasilmobjektiiv võimaldab teha pildi, mis jäädvustab kogu nähtava taevapinna. Otsene päikesekiirgus muudab aga pildi kasutuks, mistõttu tuleb varjata otsene päikesekiirgus kalasilmobjektiivile, et jääks näha päikese vahetu ümbrus, mis on kiirgusmõõtmiste seisukohalt kõige olulisem.

Tänapäeva kaamerates on säriautomaatika, mis sõltuvalt valgustustingimustest ja objekti heledusest määrab ära sobiva säriaaja. Lisaks ka intervallvõte, mis võimaldab teha pilte mingi aja tagant. Seega on pildistamise automatiseerimine juba ära tehtud. Kuid varju liigutajad, mis liigutaksid varju päikese ette, on väga kallid.

Varju liigutamise ülesanne on analoogne teleskoobi suunamisele. Kaks kõige levinumat teleskoobi monteeringut on ekvatoriaalne ja asimutaalne. Ekvatoriaalse monteeringu korral on ülesseadmine keerukas, sest üks telgedest peab olema samasuunaline Maa pöörlemisteljega. Kiirgust mõõdetakse aga erinevates kohtades ning selleks läheb vaja portatiivset seadet. Asimutaalse monteeringu juhtimine on keerulisem, aga tänapäeva arvutustehnika ja mikrokontrollerite areng teeb selle realiseerimise suhteliselt vähese vaevaga võimalikuks.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on disainida ja ehitada automatiseeritud seade, mis varjaks otsese päikesekiirguse objektiivile. Seadme tööpõhimõtte seisneb varju liigutamises päikese ette geograafilise asukoha ning kuupäeva ja kellaaja järgi ja objektiivi ümber paigutatud varjualasse jäävate fotodiodide signaali abil. Valmistatava seadme jaoks on kasutada Nikon D5100 kaamera, millel on olemas nii säriautomaatika

kui ka intervallvõte ja Sigma AF 4,5 mm F2,8 EX DC Circular Fisheye objektiiv kogu taeva pildistamiseks. Vari koos kaameraga peab kinnituma standardse 1/4"-20 UNC keermega kaamera statiivile.

## 1. Päikese kiirguse mõõtmise ja taeva pildistamise vajadus

Tartu Observatooriumi taimkatte kaugseire tööühmas on juba pikka aega arendatud taimkatte kiirguslevimudeleid. Need loovad tarviliku teoreetilise baasi mõistmaks, kuidas päikesekiirgus levib taimkattes ning peegeldub ja hajub sellelt. Nende teadmiste abil on võimalik ennustada, kuidas teatud parameetritega taimkate peaks päikesekiirgust peegeldama. Samas on võimalik samade teadmiste abil lahendada niinimetatud pöördülesannet, ehk taimkattelt peegeldunud ja näiteks satelliitsensori poolt registreeritud signaali põhjal hinnata taimkatte parameetreid. Teoreetilised kiirguslevimudelid on kaugseireandmete interpreteerimise aluseks.

Mudelite arendamiseks on tarvis võrdlusandmeid reaalsest elust. Taimkatte peegeldusteguri arvutamiseks on tarvis mõõta nii objektile langevat kui sellelt peegeldunud kiirgust. Metsa puhul on peegeldunud kiirguse mõõtmine võimalik ainult õhusõidukilt või satelliidilt, aga ei ole võimalik samal ajal igas punktis mõõta ka objektile langenud kiirgust. Seetõttu registreeritakse valgustatust mõnel läheduses asuval lagendikul ning eeldatakse olevat sama kogu katsepiirkonna ulatuses. See eeldus kehtib vaid pilvitu ilma korral ning selle kontrollimiseks on tarvilik jäädvustada ka pilvisuse infot.

Taeva pildistamisel tuleb varjata otsene päikesekiirgus objektiivile kuna pildistamisel kasutatavad CCD (*charge-coupled device*) või CMOS (*complementary metal-oxide-semiconductor*) tehnoloogial valmistatud sensorid ei suuda teha nii head pilti, et päikese vahetu ümbrus näha jääks. CCD sensori puhul tekiks küllastatus ning pildil olev valgusallikas ja tema ümber olevad naaberpikslid oleksid rikunud [1]. Nikon D5100 sees kasutatava CMOS sensori korral ei riku küllastatus naaberpikseid, aga kasutatav optika pole ideaalne ning hajuvalguse tõttu on ikkagi päikese vahetu ümbrus ülevalgustatud ja informatsioon kadunud.

## 2. Alternatiivsed meetodid taeva pildistamiseks ja otsese päikesekiirguse varjamiseks

Taeva pildistamiseks ja otsese päikesekiirguse varjamiseks on mitmeid erinevaid meetodeid. Järgnevalt on välja toodud mõned viisid koos heade omaduste ning puudustega.

### 2.1. Liikumatu võru

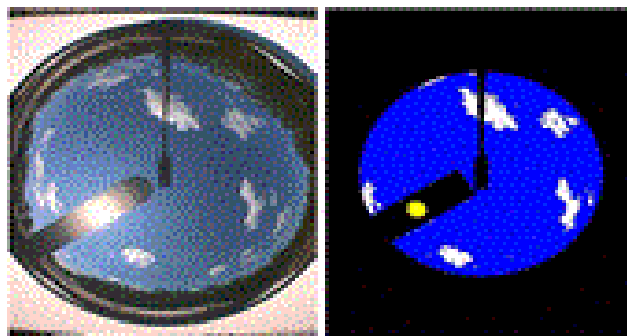
Üheks meetodiks on paigutada kaamera ette liikumatu võru. Võru asend kaamera suhtes on seatud nii, et päikesekiirgus on varjatud kogu päeva ulatuses. Sellise võru üheks suureks puuduseks on see, et võru paikneb kogu aeg pildil terve Päikese näiva trajektoori ulatuses, mistõttu on pildil palju kasutat võru osa. Et võru heidaks objektiivile varju terve päeva jooksul, tuleks seade üles seada täpselt õigesse asendisse kompassi ja loodi abil. Kui on vaja otsest päikesekiirgust varjata pikema aja vältel, siis tuleb võru asendit iga paari päeva tagant korrigeerida, kuna Päikese näiv trajektoor sõltub kuupäevast. Võru eeliseks on päikesekiirguse kindel varjamine kogu päeva ulatuses, kui seade on õigesti üles seatud. Joonisel 2.1. on toodud näide liikumatu võru kasutamisest.



**Joonis 2.1.** Püranomeeter hajuskiirguse mõõtmiseks [2].

## 2.2. Ribaga kumerpeegel

USA-s tegelev ettevõtte *Yankee Environmental Systems* on välja töötanud seadmed taeva pildistamiseks. TSI (*Total Sky Imager*)-880 ja TSI-440 seadmete tööpõhimõte seisneb selles, et kaamera pildistab kumerpeeglit peegeldunud taevapilti. Vari on kantud ribana otse peegli pinnale ja peeglit pööratakse vastavalt Päikese ööpäevasele näivale liikumisele. Võrreldes statsionaarse võruga on vähem taevast pidevalt kaetud, aga ikkagi rohkem kui liigutatava varjuga. Antud varju tööpõhimõte on erinev võrreldes täisvõruga. Peeglil olev riba katab Päikese muutuvast seniitnurgast tingitud näiva liikumise. TSI-880 teeb koheselt pilditöötluse, kus leitakse taevas olevate pilvede hulk ning pilt salvestatakse JPEG failiformaati. TSI-440 salvestab pildid ja hiljem pildid töödeldakse. Tõenäoliselt leiab tuvastusseade ainult rünpilvi, aga kiirgusmõõtmiste korral on olulised ka kiudpilved, kui need asuvad päikese ees. Mõlemad seadmed võimaldavad reaajas jälgimist üle TCP/IP ühenduse. Seadmed on aga kallid ning peeglit pilti tehes jääb ka kaamera pildile, mistõttu pildilt saadakse vähem infot. Joonisel 2.2. on vasakul kaamera tehtud pilt ning paremal TSI-880 seadme töödeldud pilt [3].



**Joonis 2.2.** TSI-880 seadme tehtud pildid [3].

## 2.3. Liikuv poolvõru

Analoogselt ribaga kumerpeegli meetodile, kasutatakse liikuvat poolvõru. Poolvõru pöörlemistelg on paralleelne Maa pöörlemisteljega ning võru liigutatakse ümber seadme. Võru liikumine järgib Päikese ööpäevast käiku. Võru pikkus on valitud selline, et otsene päikesekiirgus oleks varjatud sõltumata kuupäevast (päikese kõrgusest). Selle meetodi eeliseks on, et vajaduse korral saab võru keerata allapoole sensori vaatevälja. Joonisel 2.3. on toodud näide liikuva poolvõru kasutamisest [4].



**Joonis 2.3.** *RSP(Rotating Shadowband Pyranometer)* [4].

#### **2.4. Päikesejälgi**

Kipp & Zonen firma on loonud seadme, millele saab paigaldada kuni kolm mõõtmisseadet koos varjudega. Seade suudab järgida Päikese asukohta kellaaja järgi ning seadmel on lisaks päikese sensor, mis suudab määrata päikese asukohta. Kellaaja korrigeerimine toimub GPS (*Global positioning system*) abil, mis võimaldab saada väga täpset kellaega. Seadet liigutakse nii, et vari järgib päikese trajektoori ning varjab vajadusel mõõteriistale päikese kiirguse. Päikese sensori abil suudetakse päikest järgida ka siis, kui seade pole kindlal pinnasel või pole väga täpselt paigaldatud. Seadme varju suurus on minimaalne, varjates võimalikult vähe hajuskiirgust. Kuid antud seadme mõõtmeid ja kaalu arvestades ei ole ta portatiivne [5].



**Joonis 2.4.** *Päikese järgimis seade SOLYS 2* [5].

## 2.5. Tartu Observatooriumis siiani kasutusel olnud seade

Tartu Observatooriumis toimub taeva pildistamine kaameraga, millel on kalasilmobjektiiv. Otsese päikesevalguse ette paigutatakse vari manuaalselt. See tähendab, et iga 10–15 minuti tagant peab keegi varju edasi liigutama. Antud töö on ajakulukas ning nõuab pidevat tähelepanu. Kui vari ei asu enam täpselt päikese ees, siis tehtud pildilt enam korrektset informatsiooni pole võimalik saada. Taevast pildistatakse Tõraveres mõned korrad aastas välitööde ajal. Vajadus uue seadme järele tuleneb sellest, et välitööde ajal on tülikas käsitsi varju edasi sättida, kuna on tarvis muid töid teha. Joonisel 2.5. on pildid taevast ja kasutatavast seadmest. Vasakpoolne pilt taevast on korrektne, keskmine pilt on rikutud, kuna Päike polnud täielikult varjatud.



**Joonis 2.5.** Taevast tehtud pildid ja seade taeva pildistamiseks [6].

## 3. Varju liigutaja disain

### 3.1. Nõuded

Käesoleva bakalaureusetöö raames disainiti seade, mille ülesanne on liigutada vari kaamera ette nii, et see kataks otsese päikesekiirguse objektiivile, varjates samas minimaalselt päikese vahetut ümbrust. Järgnevalt on toodud nõuded, mida tuleb seadme disainimise juures arvestada:

- Varju liigutamine peab toimuma täpselt.
- Seade peab olema portatiivne, autonoomne ja lihtsasti üles seatav.
- Seadme disaini puhul tuleb arvestada Nikon D5100 kaamera ning Sigma kalasilmobjektiivi mõõtudega.

### 3.2. Tööpõhimõte

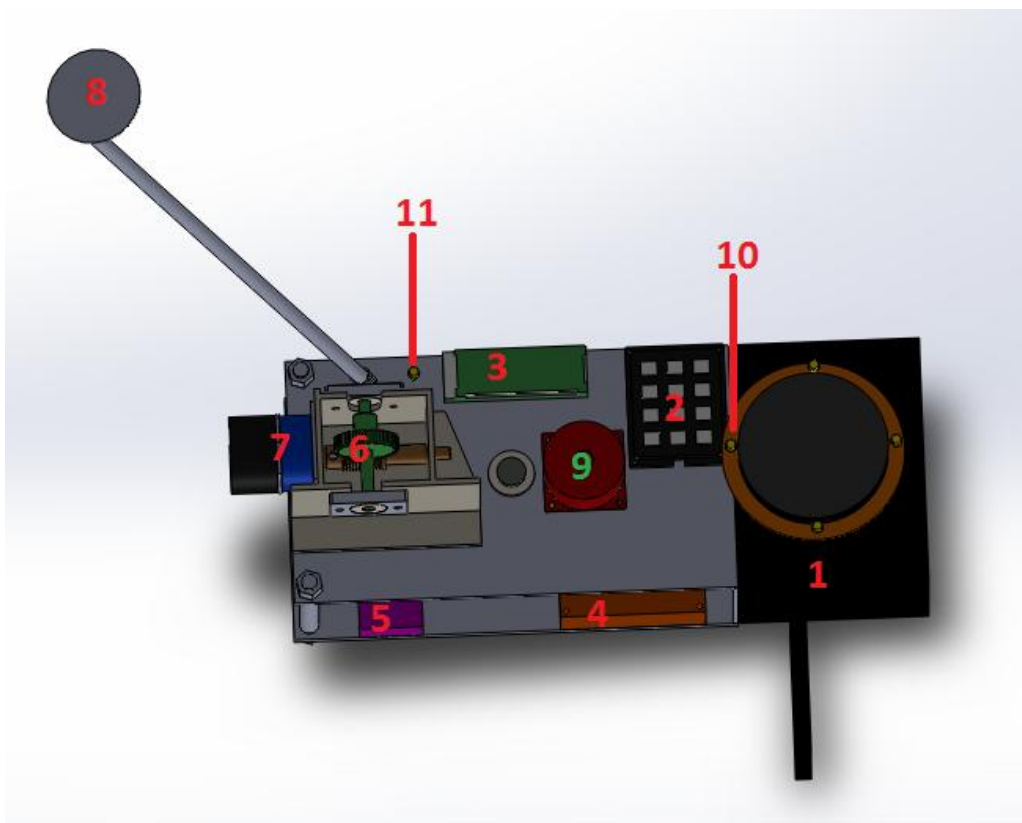
Seadme tööpõhimõte seisneb konstruktsiooni asimutaalses liigutamises ja varju seniitnurga muutmises reaaliajakella (RTC – *real time clock*) ja fotodiodide signaali põhjal. Kalasilmobjektiiviga kaamera on kinnitatud seadme konstruktsiooni külge, mistõttu liigub ka kaamera, kui seadet liigutatakse asimutaalselt. See tähendab ka seda, et kaamera tehtud pilt ei ole alati tehtud samas positsioonis. Ideaalis oleks tarvis, et kaamera asukoht ümbritseva suhtes ei muutuks kogu pildiseeria jooksul, kuid antud kaamera omadusi arvestades ei leitud lihtsat ja sobivat lahendust selle teostamiseks. Kaamera seadistamiseks tuleb ligi pääseda kaamera nuppudele, et seada intervallvõte, ning kaamera ekraan peab olema nähtav, et kontrollida vaadet, mida pildistatakse ning kaamera parameetreid. Seetõttu tuli kaamera paigutada nii, et konstruktsioon vajalikele osadele ette ei jääks.

Seadme keskvõll kinnitatakse kaamera statiivile standardse 1/4"-20 UNC keermega. Keskvõllile kinnitatakse seadme raam kahe laagri abil, et oleks võimalik muuta seadme asimuuti. Kahte laagrit kasutakse kuna see muudab seadme konstruktsiooni mehaaniliselt tugevamaks. Konstruktsioon peab olema tugev, sest raskuskese ei ole seadme keskel ehk ei asu keskvõlli kohas. See tuleb kaamera paigutamisest raami ühele küljele. Kaamera raskuse tasakaalustamiseks on tiguülekanne koos varjuga raami teise otsa paigutatud.

Lisaks on kellaaja ja koordinaatide sisestamiseks vajalik 4x3 klaviatuur ning 16x2 sümboliga vedelkristallekraan (LCD – *liquid-crystal display*), kuhu kuvatakse vastav info. Antud komponendid kinnitatakse samuti seadme raami külge selliselt, et neid oleks mugav kasutada.

Vari kinnitatakse võlli külge liblikmutriga, mida on võimalik näpuga keerata. Lihtne kinnitus võimaldab seadme ülesseadmisel vari koheselt õigele kõrgusele fikseerida ning seadme transportimine on lihtsam, kui vari on seadme küljest eemaldatud. Varju manuaalselt paika seadmine muudab seadme tarkvara lihtsamaks, kuna siis ei pea tarkvaraliselt meeles pidama, mis asendis vari viimati oli. Lisaks võib sel juhul kasutada Päikese asukoha arvutamiseks lihtsustatud, aga seetõttu ka ebatäpsemat algoritmi.

Joonisel 3.1. on toodud pilt seadme kolmemõõtmelisest (3D – *three-dimensional space*) joonisest. 3D joonis on tehtud SolidWorks 2012 programmisega.



**Joonis 3.1.** Pilt disainist: 1 – kalasilmobjektiiviga kaamera, 2 – klaviatuur, 3 – displei, 4 – elektroonikaplaat, 5 – aku, 6 – tiguülekanne, 7 – tiguülekanne mootori reductoriga, 8 – vari koos varrega, 9 – samm-mootor asimuudi muutmiseks, 10 – trükkplaat koos nelja fotodiodiga, 11 – vajadusel lisatav fotodiod.

Varju liigutamine toimub RTC-lt saadud kuupäeva ja kellaaja ning kasutaja poolt sisestatud seadme geograafilise asukoha järgi. Kuid ainult RTC järgi varju liigutamine ei pruugi piisavalt täpne olla ja nõuab hoolikat justeerimist seadme paigaldamisel. Seetõttu on kasutatud ka nelja fotodiodi, mis paigutatakse 90° sammuga võimalikult ligidale kalasilmobjektiivi ümber, et ka diodid jääksid varjualasse. Fotodiodid paigutatakse ümber objektiivi trükkplaadist välja freesitud rõngale joodetuna. Rõngas toetub objektiivi randi peale ning ei vaja lisakinnitust. See võimaldab lihtsasti rõngast objektiivile paigaldada või seda eemaldada. Fotodiodid võimaldavad seada varju väga täpselt otsese päikese kiirguse ette. Kuid fotodiodidest pole enam kasu, kui vahelduva pilvisusega ilma korral Päike pikaks ajaks pilve taha kaob või õhukeste pilvede tõttu on otsese ja hajusa kiirguse suhe väike ning vari pole kontrastne.

Vajaduse tekkimisel tuleb lisada üks fotodiod, mis ei ole varjatud otsese päikese kiirguse eest. Kui neli objektiivi ümber paiknevat fotodiodi annavad sarnase signaali, siis on võimalik lisadiodi signaaliga võrreldes hinnata, kas kõik neli diodi on varjus või päikese käes.

Seadme kogu elektroonika saab toite 3-elementiliselt LiPo (liitium-ioon polümeer) akult, mis kinnitub seadme kere külge. Aku pinget tuleb jälgida, et see ei langeks alla +9 V. Seda on vaja, kuna LiPo-tüüpi aku liigne tühjenemine kahjustab akut. Täiesti tühjaks saamise korral ei pruugi enam võimalik olla seda uuesti täis laadida [7]. Kui aku pinge langeb alla +9 V, siis aku säästmiseks varju enam ei liigutata ja katkestatakse võimalikult paljude elektroonikaseadmete töö tarkvaraliselt. Displei jäetakse tööle ja sellele kuvatakse info aku tühjenemise kohta. Lõpliku toite väljalülitamine toimub seadme kasutaja poolt.

### **3.3. Varju asendi arvutus**

Seadme paigaldamisel ja käivitamisel seatakse vari õigesse asendisse. Seejärel tuleb varju edasi liigutada vastavalt Päikese näivale liikumisele. Teades kellaega ning seadme geograafilist asukohta, on võimalik välja arvutada Päikse asukoht ning varju asendit vastavalt sellele muuta.

Ühtne ajaarvestus põhineb nullmeridiaani kohalikul keskmisel päikeseajal (GMT – *Greenwich mean time*). Keskmise päikeseaja järgi on kõik päevad 24 tunni pikkused. Kuna Maa orbiit ei ole täpselt ringikujuline ning Maa pöörlemistelg ei ole paralleelne orbiidi tasandi normaaliga, on realselt päevad veidi erineva pikkusega ja Päike asub

ülemises kulminatsioonis keskmise päikeseaja järgi täpselt kell 12:00 vaid üksikutel päevadel aastas. Tõeline päikeseaeg võib keskmisest päikeseajast erineda enam kui veerand tundi [9]. Keskmise päikeseaja ning tõelise päikeseaja erinevust nimetatakse ajavõrrandiks.

### 3.3.1. Ajavõrrand

Ajavõrrand on kohaliku keskmise päikeseaja erinevus tõelisest päikeseajast. See väljendab Päikese tegeliku liikumise ebaühtlust aasta jooksul. Järgnevalt on kirjeldatud ajavõrrandi arvutamist.

Maa orbitaalne kiirus on

$$W = \frac{360}{365,24} \quad (3.1)$$

kraadi päevas. Keskmise kiirusega liiguks Maa talvisest pööripäevast alates orbiidil

$$A = W \times (D + 10) \quad (3.2)$$

kraadi, kus D on päeva number aastas (1.jaanuar = 0). 10 päeva lisandub, kuna see on ligikaudne arv päevi detsembrikuisest pööripäevast kuni esimese jaanuarini. Arvestades aga, et Maa orbiidi ekstsentrilisus on 0,0167, saame esimest järku parandi lisamisel, et talvisest pööripäevast alates on Maa orbiidil liikunud

$$B = A + \left(\frac{360}{\pi}\right) \times 0,0167 \times \sin(W \times (D - 2)) \quad (3.3)$$

kraadi. Parandi lisamisel on arvestatud, et Maa asub periheelis umbes 3.jaanuari paiku. Seejärel leitakse, palju erineb Maa asukoht keskmise kiirusega orbiidil liikudes asukohast tegeliku kiirusega liikudes projitseerituna ekvatoriaalsele tasapinnale

$$C = \frac{\left(A - \tan^{-1}\left(\frac{\tan(B)}{\cos(23,44^\circ)}\right)\right)}{180} \quad (3.4)$$

Tulemus on jagatud 180-ga, et saada erinevus poolpöõretena. Kuna  $\tan^{-1}(x)$  on perioodiline funktsioon, võib arvutuseks kasutatav algoritm tagastada sobimatu väärtuse. Selle vältimiseks leitakse ajavõrrand minutites

$$EoT = 720 \times (C - \text{rint}(C)) \quad (3.5)$$

kus nint(C) tähendab ümardamist lähima täisarvuni ja Maa teeb oma telje ümber pool pööret 720 minutiga.

Toodud ajavõrrandi arvutamise maksimaalseks veaks on öeldud 6,0 sekundit [8], kuid arvutades ajavõrrandi väärtused 2013. a. 1.jaanuari, 17.mai ning 1.novembri jaoks ja võrreldes tulemusi Tähetorni kalendris [9] antud väärtustega, saadi erinevusteks vastavalt -26", +3" ja -11". Samas on antud seadme juures selline arvutusviis piisavalt täpne, kuna alguses seatakse vari juba õigesse asendisse ja edasi tuleb ainult jälgida Päikese liikumist. Varju sünkroonsus tuleb tagada tundide, mitte päevade või kuude lõikes.

### 3.3.2. Päikese seniitnurk ja asimuut

Teades ajavõrrandit, on võimalik arvutada mingil ajahetkel teatud geograafilises punktis Päikese seniitnurk ja asimuut. Seniitnurga arvutamiseks tuleb teada Päikese tunninurka

$$h = \frac{x - 12}{24} \times 360 \quad (3.6)$$

kus  $x = \text{UTC kellaeg (tundides)} + \text{ajavõrrand (tundides)} + \text{geograafiline pikkuskraad}/360 \times 24$ . Lisaks tuleb arvutada sellele ajahetkele vastav Päikese kääne

$$\delta = -\sin^{-1}(\sin(23,44^\circ) \times \cos(B)) \quad (3.7)$$

kus B on valemiga (3.3) arvutatud nurk, mille võrra on Maa oma orbiidil liikunud alates talvisest pööripäevast. Seniitnurka arvutatakse järgneva valemiga [10] :

$$\theta_s = \cos^{-1}(\sin \rho \times \sin \delta + \cos \rho \times \cos \delta \times \cos h) \quad (3.8)$$

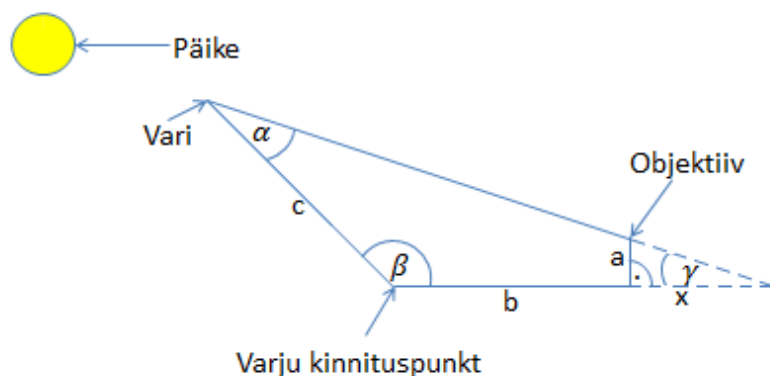
kus  $\rho$  on geograafiline laiuskraad.

Päikese asimuudi võib leida kasutades järgnevat valemit [11] :

$$\phi_s = \begin{cases} \cos^{-1} \left( \frac{\sin \delta - \sin(90^\circ - \theta_s) \times \sin \rho}{\cos(90^\circ - \theta_s) \times \cos \rho} \right), & \text{kui } h < 0 \\ 360^\circ - \cos^{-1} \left( \frac{\sin \delta - \sin(90^\circ - \theta_s) \times \sin \rho}{\cos(90^\circ - \theta_s) \times \cos \rho} \right), & \text{kui } h > 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

### 3.3.3. Koordinaatteisendus objektiivi koordinaatsüsteemist tiguülekande koordinaatsüsteemi

Kuna varju liigutava tiguülekande väljundvõll ei asu objektiivi läbival sirgel, tuleb õige varju kõrguse leidmiseks teha koordinaatteisendus objektiiviga seotud taustsüsteemist tiguülekandega seotud koordinaatsüsteemi. Seda selgitab joonis 3.2.



**Joonis 3.2.** Varju asendi  $\beta$  arvutamine Päikese kõrguse  $\gamma$  järgi.

Kui on teada Päikese kõrgus  $\gamma$ , varju varre pikkus  $c$ , objektiivi kaugus  $b$  ja kõrgus  $a$  tiguülekande väljundvõllist, saab arvutada varju asendi  $\beta$ . Täisnurksest kolmnurgast saab arvutada

$$x = \frac{a}{\tan \gamma} \quad (3.10)$$

ning siinusteoreemi kasutades leitakse

$$\alpha = \sin^{-1} \left( \frac{\sin \gamma \times (b + x)}{c} \right) \quad (3.11)$$

Teades, et kolmnurga sisenurkade summa on  $180^\circ$ , saab leida varju nurga

$$\beta = 180^\circ - \alpha - \gamma \quad (3.12)$$

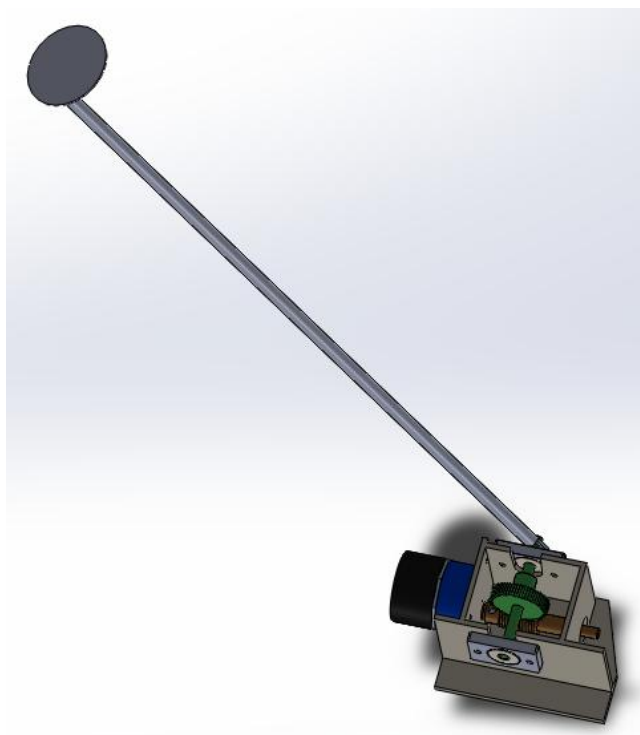
Kuna alguses seatakse vari õigesse asendisse, siis edaspidi tuleb arvutada Päikese kõrguse muutusele  $\Delta\gamma$  vastav varju asendi muutus  $\Delta\beta$ . Kuna tiguülekande ning reduktori ülekandearvud ja samm-mootori ühele sammule vastav pöördenurk on teada, saab arvutada vajaliku samm-mootori sammude arvu, et seada vari õigesse asendisse.

## 4. Seadme tehniline teostus

### 4.1. Mehaanika

#### 4.1.1. Mootorid ja ülekanded

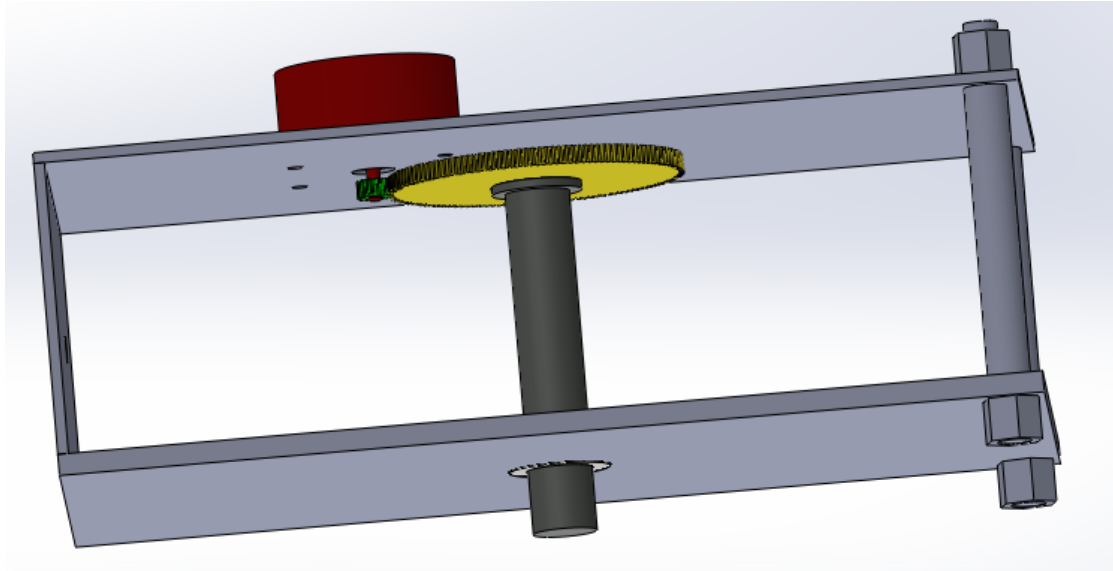
Käesoleva seadme juures kasutatakse kahte samm-mootorit. Neist üks on ühenduses tiguülekande sisendvõlliga muutes varju seniitnurka. Tiguülekande ülekandearv on 32:1, kus sisendvõlli 32 tiiru tegemisel teeb teoratas ühe tiiru, ning jõudluse veelgi suurendamiseks on mootor ühendatud sisendvõlliga 25:1 reduktori kaudu, kus mootori 25 pöördega teeb reduktori väljundvõll ühe tiiru. Tegu on paljundusmasina seest pärit mootori ning tiguülekandega. Joonisel 4.1. on antud mootor kujutatud mustana, reduktor sinisena ja tiguülekande sisendvõll pruunina. Sellise jõudlusega mootorit, mis suudaks ilma tiguülekandeta üles-alla liigutamist teha, pole otstarbekas kasutada energiakulu ja täpsust arvestades. Teoratta võlli külge on kinnitatud varras, mille otsas on vari. Teoratas ja võll on kujutatud joonisel 4.1. rohelisena. Tiguülekande isepidurduvus võimaldab varju hoida samas asendis energiat kulutamata.



**Joonis 4.1.** Mootor tiguülekande ja varjuga.

Teist samm-mootorit kasutatakse terve seadme asimuudi muutmiseks. Mootor on kinnitatud seadme konstruktsiooni külge. Mootori võllile on kinnitatud väiksem

hammasratas, mis on hambumises suurema hammasrattaga. Suurem hammasratas on fikseeritud statiivile kinnitatud teljele, mille külge kogu seadme konstruktsioon laagrite abil kinnitub. Joonisel 4.2. on kujutatud mootor punasena, tema küljes olev väike hammasratas rohelisena ja suur hammasratas kollasena.

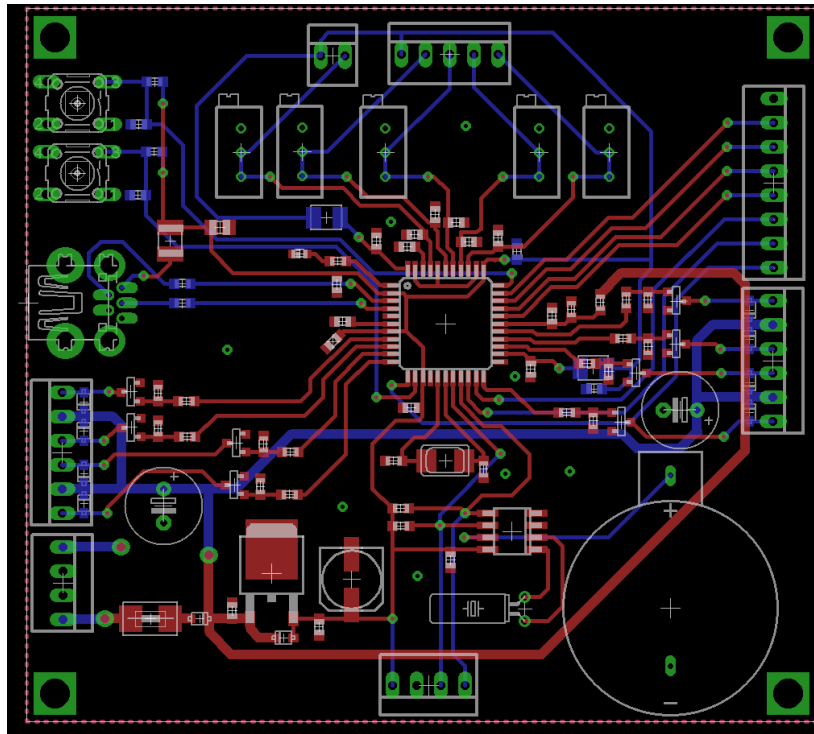


**Joonis 4.2.** Mootor ülekandega seadme asimuudi muutmiseks.

## 4.2. Elektroonika

Mootorite liigutamiseks tehti elektroonika skeem ja trükkplaadi disain vastavalt varju liigutamiseks vajaminevatele komponentidele. Skeemi ja plaadi tegemiseks kasutati EAGLE programmi versiooni 6.2.0.

Varju elektroonika skeem on toodud lisas 1 ning trükkplaadi disain on kujutatud joonisel 4.3. Kogu süsteemi juhib Atmega32U4-AU mikrokontroller, skeemil tähistatud IC-VARI, mis töötab 16 MHz taktsagedusel. Lisaks on plaadil RTC kiip IC3, mis võimaldab täpset kellaega meeles pidada. RTC juurde kuuluvad ka autonoomse toite patarei BAT1 ja 32 kHz kvarts Q1 kellaaja säilitamiseks ja täpseks tööks. RTC on ühendatud mikrokontrolleriga I<sup>2</sup>C liidese vahendusel. Ka displei on mikrokontrolleriga ühendatud I<sup>2</sup>C liideselega. Plaadi peal on RESET nupp S4 ja HWB nupp S3 ning mini-USB ühendus CN2, mis võimaldavad mikrokontrollerit uuesti programmeerida või kontrollerit taaskäivitada. Mõlemale nupule on paralleelselt ühendatud 100 nF kondensaatorid C16 ning C17 klirina ehk korduvate ühenduste ja katkestuste vältimiseks lülituse momendil.



**Joonis 4.3.** Varju elektroonikaplaat.

Kogu elektroonika töötab 740 mAh mahutavusega 3-elementilise +11,1 V<sup>1</sup> LiPo aku toitel, mis ühendatakse skeemiga aku balansseerimispistiku<sup>2</sup> abil. Trükkplaadil on JST EH seeria pistik X2, mis on kasutusel näiteks firma Kokam toodetud akudel. Samuti on võimalik mini-USB +5 V toitega tööle panna kogu elektroonika, välja arvatud mootorid. Pärast aku pistikut asuvad skeemis 2,2 A rakendumisvooluga polümeerkaitse F2 ja pooljuhtdiod D9. Diod kaitseb elektroonikat toitepinge valepidi ühendamise eest. Pärast diodi on +11,1 V toide viidud mõlemale mootorile ning aku pinget mõõtmiseks mikrokontrolleri analoog-digitaalmuunduri (ADC – *analog-to-digital converter*) viigu külge. Enne ADC viiguga ühendust on takistitest R7 ja R8 pingejagur pinget vähendamiseks, kuna ADC maksimaalne lubatud sisendpinge on +5 V. Lisatud on ka kondensaatoreid C19 häirete vähendamiseks. Samal põhjusel on mõlema mootori toitele ühendatud 330 µF elektrolüüt-kondensaatoreid C24 ja C25 nimipingega 25 V.

Antud seadme puhul kasutatakse mähiste keskväljavõttega bipolaarseid samm-mootoreid, mis võimaldavad kasutada lihtsat transistoridega juhtimisskeemi. Mootorite

<sup>1</sup> +11,1 V on nominaalpinge, see võib olla sõltuvalt aku laetuse astmest vahemikus +9 V kuni +12,6 V.

<sup>2</sup> Balansseerimispistik võimaldab laadimisel jälgida iga LiPo elemendi pinget eraldi, et kõik elemendid saaksid ühtlaselt täis laetud [7].

juhtimisskeem koosneb n-tüüpi väljatransistoridest T1-T8 ja pooljuhtdiodidest D1-D8. Transistoride jaoks on lisatud 10  $\Omega$  takistid R9-R16 ja 1 M $\Omega$  takistid R18-R25. 10  $\Omega$  takisti on ühendatud jadamisi transistori paisuga, et piirata maksimaalset voolu, mida paisule antakse. Pinge sisselülitamise hetkel võib tekkida suur vool ning ilma takistita võib see rikkuda transistori või mikrokontrolleri. Lisaks aitab see takisti vähendada lülitamise hetkel tekkivaid kõrgsageduslikke häireid. 1 M $\Omega$  takistid on lisatud, et eemaldada transistori paisult laeng, kui mikroprotsessori väljund on kõrgeoomilises seisus ehk ei tüüri transistorit. See juhtub näiteks siis, kui seadet käivitatakse või mikroprotsessorit programmeeritakse. Ilma 1 M $\Omega$  takistita jääks pais triivima ehk vastavalt ümbritsevale mõjutusele oleks transistor avatud või suletud. Pooljuhtdiodid D1-D8 on ühendatud vastuparalleelselt mootori mähistega, et lühistada transistori avamise hetkel mähises indutseeritud elektromotoorjõud. Ilma diodideta kasvaks pinge transistoril väga suureks ja põletaks transistori läbi [12]. Mootorite ühendamiseks on plaadil kuueklemmilised 2,54 mm MOLEX pistik X3 ja JST EH pistik X4.

Akult tulev +11,1 V pinge muundatakse pingemuunduriga IC1 +5 V pingeks, sest teised elektroonikakomponendid töötavad +5 V toitepingel. Pingemuundurile on lisatud kondensaatorid C9 ja C10 vastavalt komponendi andmelehele [13]. Lisatud on 330  $\mu$ F alumiinium-elektrolüüt-kondensaator C26 nimipingega 6,3 V toitepinge silumiseks. Pingemuunduri sisendi ja väljundi vahele on lisatud diod D10, mis laseb voolu läbi ainult väljundist sisendisse. Diod on vajalik selleks, et pingemuunduril pinged ühtlustuksid, kui elektroonikaplaat saab toite USB-lt.

Fotodiodide jaoks on plaadile pandud kahe klemmiga 2,54 mm MOLEX pistik X5 ja viie klemmiga 2,54 mm MOLEX pistik X1. Kaks pistikut on pandud selle pärast, et vajadusel lisada viies varju alast väljas olev fotodiod teiste fotodiodidega võrdlemiseks. Kuna fotodiodide vool ei ole teada ja tuleb määrata katseliselt, siis fotodiodi takisti sobiva väärtuse lihtsamaks leidmiseks on kasutatud 100 k $\Omega$  potentsiomeetreid POTE-POTE4. Potentsiomeetritele on paralleelselt ühendatud 330 nF kondensaatorid C8 ja C11-C14 müra silumiseks. Fotodiodid on ühendatud Atmega mikroprotsessori ADC viikude külge. Atmega mikroprotsessoril on võimalik diferentsiaalsete kanalite eelvõimendust tarkvaraliselt muuta ja see võimaldab vajaduse korral ADC dünaamilist ulatust suurendada [14]. Selleks on ADC1 viik ühendatud toiteallika miinus-klemmiga, et oleks võimalik mõõta diferentsiaalsete kanalitega signaale ehk teistelt ADC viikudelt mõõdetakse tulemusi ADC1 suhtes.

Elektroonikaplaadi mõlemal poolel on vaba vasespind ühendatud toiteallika miinusklemmiga mürade vähendamiseks analoogsignaalide jaoks. Analoogosa toiteahelasse on häirete vähendamiseks lisatud induktiivpoolid L1-L2 ja kondensaatorid C22-C23 vastavalt Atmega32U4 andmelehele [15].

### **4.3. Tarkvara**

Kogu elektroonikat juhitakse mikroprotsessori abil, millele on vastav kood kirjutatud programmeerimiskeeles C. Peamisteks kasutajaga suhtlemise vahenditeks on displei ja klaviatuur. Displei abil kuvatakse kasutajale infot ning klaviatuuri abil saab kasutaja valida mida displeil kuvatakse ja vajadusel uuendada andmeid. Varju mootorite liigutamine toimub kellaaja, koordinaatide ja fotodiodide signaali põhjal.

Praeguse seisuga on tarkvara osast tööle saadud ainult kõikide seadmetega suhtlemine ehk kõik vajaminevad seadmed töötavad. Seadmete funktsionaalsus pole veel realiseeritud ning järgnev tarkvara töötamise kirjeldus on hüpoteetiline.

#### **4.3.1. Kasutajaliides**

Displeile on võimalik kuvada kolme erinevat režiimi:

- geograafilised koordinaadid
- päikese asukoht
- kuupäev, aku pinge ja kellaeg koos ajatsooniga.

Kuvatavat infot vahetatakse klaviatuuri sümboliga „\*“. Koordinaatide režiimis kuvatakse displeil geograafilised koordinaadid, kus seade asub. Koordinaadid tuleb seadme ülesseadmisel manuaalselt sisestada. Selleks tuleb minna koordinaatide seadistamisrežiimi klaviatuuri sümboliga „#“. Seadistamisrežiimis hakkab displeil vilkuma vastav märgikoht, kuhu tuleks sisestada uus number, mida saab teha klaviatuuri numbritega 0 kuni 9. Päikese asukoha režiimis kuvatakse displeile Päikese seniitnurk ja asimuut, mis arvutatakse arvestades geograafilisi koordinaate, kuupäeva ja kellaega. Selles režiimis ei ole võimalik midagi seadistada. Kuupäeva, aku pinge ja kellaaja režiimis kuvatakse vastavad andmed nende kohta. Kuupäeva ja kellaaja info saadakse RTC-lt, mida on võimalik ka antud režiimis seadistada, vajutades klaviatuuri sümbolit „#“. Sisestades uusi väärtusi kuupäeva või kellaaja kohta, uuendatakse koheselt RTC registrid. Aku pinget kuvatakse displeil, et kasutaja näeks, kui aku pinge hakkab +9 V ligidale langema. Kui kasutaja ei märka aku pinge langemist alla +9 V, siis kuvatakse

displeile teade, et aku on liiga tühi ning võimalikult paljude voolu tarbivate seadmete töö lõpetatakse tarkvaraliselt.

#### **4.3.2. RTC ja koordinaadid**

Varju liigutatakse mootoritega vastavalt RTC-lt saadud kuupäeva ja kellaaja andmete järgi arvestades seadme geograafilist asukohta. Sisestades õiged seadme asukoha koordinaadid ning täpse kellaaja, on ajaliselt teada Päikese seniitnurk ja asimuut. Seadme ülesseadmisega on vari seatud juba nii, et see varjab otsese päikese kiirguse, mistõttu hakkab seade varju edasi liigutama alates sisselülitamisest, võttes aluseks sel kellaajal oleva Päikese asukoha. Varju asukohta muudetakse kord minutis, selle ajaga nihkub Päike ligikaudu veerand kraadi. Täpne nihke suurus ja suund leitakse peatükis 3.3. toodud arvutuskäiku kasutades. Nende põhjal arvutatakse välja millist mootorit ja kui palju liigutama peab.

#### **4.3.3. Fotodiodid**

Varju täpsemaks paika seadmiseks kontrollitakse pärast kellaaja järgi liigutamist ümber objektiivi asuvate fotodiodide signaalide väärtusi. Võrreldakse kõiki fotodioode omavahel. Kui mingi, eeldatavasti korraga ühe, fotodiodi väärtus erineb suuresti teiste omadest, siis hakatakse varju liigutama suunas vastavalt sellele, milline diod teistest erines. Eeldatavasti on see diod varjatud alast väljaspool ning kui vari õigesti paika liigutatakse, muutuvad kõikide fotodiodide signaalide väärtused enam-vähem võrdseks.

## **Kokkuvõte**

Käesoleva bakalaureusetöö raames disainiti autonoomne seade, mis varjaks otsese päikesekiirguse taeva pildistamisel kalasilmobjektiiviga kaamerale. Seda on tarvis Tartu Observatooriumi kaugseire osakonnal välitööde käigus.

Töös kirjeldatakse lühidalt erinevaid võimalikke viise otsese päikesekiirguse varjamiseks ning varasemalt Tartu Observatooriumis kasutusel olnud päikesevarju. Välja on toodud seadme disainimise juures järgitavad nõuded ning valitud lahenduse tööpõhimõte. Tuletatud on arvutuskäik varju õige asendi leidmiseks teades kuupäeva, kellaaega ja seadme geograafilist asukohta. Suur osa tööst keskendub seadme mehaanika, elektroonika ja tarkvara kirjeldamisele.

Varju liigutatakse reaajakella, geograafiliste koordinaatide ja fotodiodide signaali põhjal. Reaajakell ja kasutaja poolt sisestatud koordinaadid võimaldavad arvutada Päikese seniitnurga ja asimuudi. Varju liigutamiseks kasutatakse kahte samm-mootorit. Täiendav varju asendi korrigeerimine toimub objektiivi ümber paigutatud varjualasse jäävate fotodiodide signaalide põhjal. Seadme tööd juhib mikrokontroller Atmega32U4-AU. Kogu seadme tarkvara kirjutatakse programmeerimiskeeles C.

Bakalaureusetöö käigus valmistati ja testiti seadme elektroonika osa. Tarkvara kirjutamisel on saadud ühendus kõikide funktsionaalsete osadega (reaajakell, mootorid, fotodiodid, aku pinge kontroll, displei, klaviatuur), kuid ei jõutud realiseerida täit funktsionaalsust. Välja on valitud mehaanilise osa põhimõtteline lahendus ja loodud SolidWorks 2012 tarkvaras selle esialgne 3D mudel.

Seadme valmis saamiseks tuleks kõigepealt realiseerida fotodiodide järgi varju liigutamine. Selleks oleks vaja valmis ehitada ka seadme mehaaniline pool. Seejärel tuleks lisada varju asendi arvutus ning kasutajaliidese täielik funktsioneerimine.

## Kasutatud kirjandus

1. Fellers, J. T., Davidson, W. M., CCD Saturation and Blooming, <http://learn.hamamatsu.com/articles/ccdsatandblooming.html> (27.04.2013).
2. Measure of sky radiation, <http://visual.merriam-webster.com/earth/meteorology/meteorological-measuring-instruments/measure-sky-radiation.php#shadow-band28371> (15.04.2013).
3. Yankee Environmental Systems, INC., Cloud Cover, <http://www.yesinc.com/products/cloud.html> (15.04.2013).
4. University of Oregon, Solar Radiation Monitoring Laboratory, Ascension Technology Rotating Shadowband Pyranometer (RSP), <http://solardat.uoregon.edu/AscensionRSP.html> (24.04.2013).
5. Kipp & Zonen, Solys 2, <http://www.kippzonen.com/?product/2021/SOLYS+2.aspx> (25.04.2013).
6. Kuusk, J., Tartu Observatoorium, Erakogu.
7. Wikipedia, Lithium polymer battery, [https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium\\_polymer\\_battery](https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_polymer_battery) (20.03.2013).
8. Wikipedia, Equation of time, [http://en.wikipedia.org/wiki/Equation\\_of\\_time#Alternative\\_calculation](http://en.wikipedia.org/wiki/Equation_of_time#Alternative_calculation) (18.05.2013).
9. Annuk, K., Puss, A., Tempel, E., Tuvikene, T., *Tartu Tähetorni kalender 2013. aastaks. LXXXIX aastakäik*. Tartu Observatoorium, Tõravere, 2013.
10. Wikipedia, Solar zenith angle, [http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_zenith\\_angle](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_zenith_angle) (17.05.2013).
11. Wikipedia, Solar azimuth angle, [http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_azimuth\\_angle](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_azimuth_angle) (17.05.2013).
12. Wikipedia, Flyback diode, [http://en.wikipedia.org/wiki/Flyback\\_diode](http://en.wikipedia.org/wiki/Flyback_diode) (09.01.2013).
13. STMicroelectronics, Standard Positive Voltage Regulator, L78M05AB, <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00000448.pdf> (09.01.2013).

14. Atmel Corporation, Atmega16U4/32U4 Preliminary, „ADC Voltage Reference“, <http://www.atmel.com/Images/doc7766.pdf> (16.01.2013).
15. Atmel Corporation, Atmega16U4/32U4 Preliminary, „ADC Noise Canceler“, <http://www.atmel.com/Images/doc7766.pdf> (16.01.2013).

## Summary

### Automated sun shade for sky imager

Ranno Kena

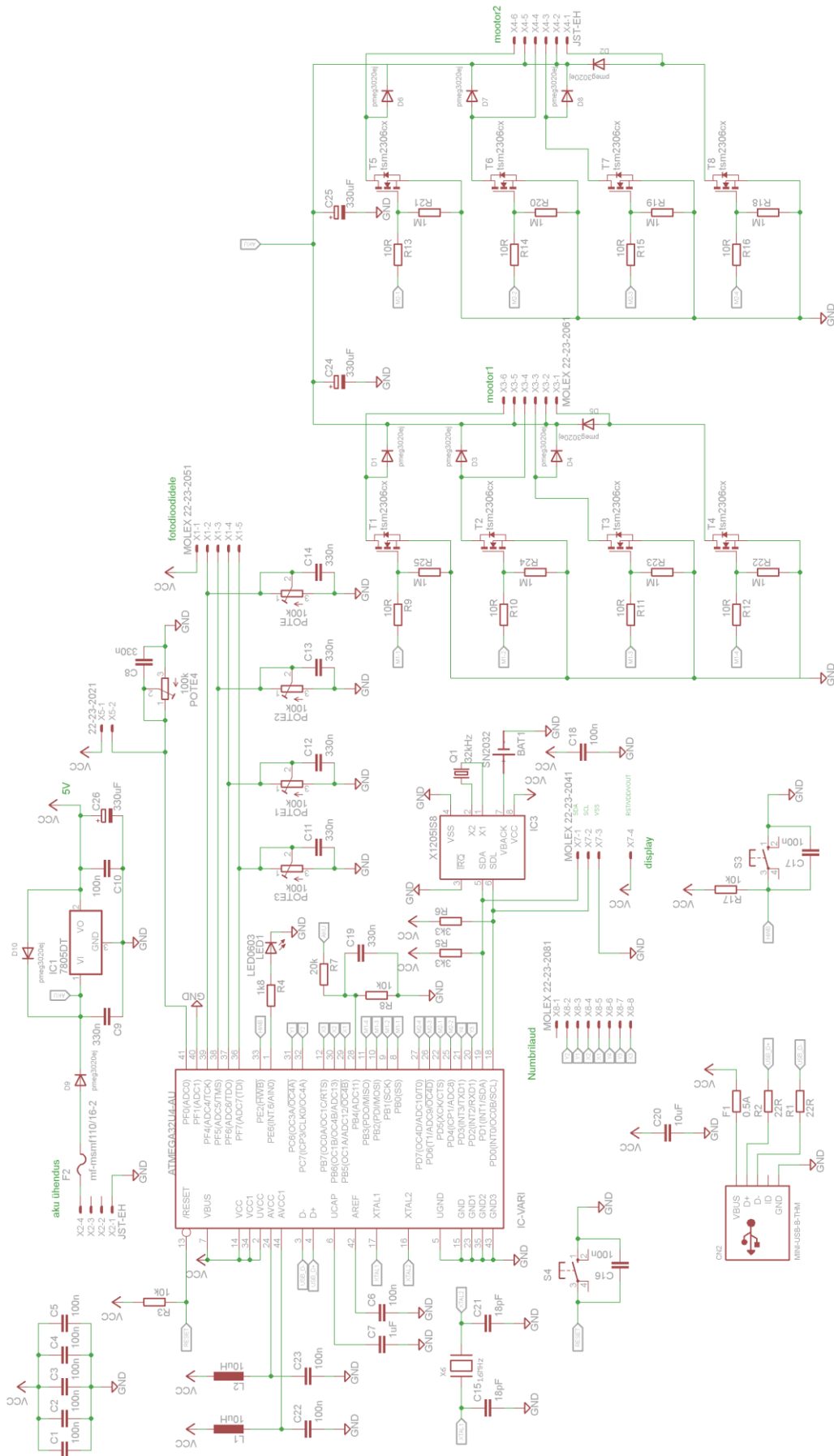
Scientists at Tartu Observatory have been developing vegetation radiative transfer models for a long time. Reference data from real life is needed for development and validation of the models. Clouds affect illumination conditions significantly, therefore, during field measurements it is necessary to store information about clouds. When taking pictures of the sky the lens has to be protected from direct sunlight because the CCD and CMOS sensors are unable to take a picture where the proximate area of the sun can be seen.

As a result of this bachelor's thesis an autonomous device for a camera with a fish eye lens was designed, that will obscure direct sunlight when taking pictures of the sky. It is needed in the fieldwork of Tartu Observatory's remote sensing department.

When developing this device different ways of shielding direct sunlight were studied. The final design of the device is based on the shade that is currently used in the observatory and what will be automated. The followed requirements and work principle of designing the device are brought out. Calculations are derived for finding the right position of the shade knowing the date, time and geographical position of the device. The shade is moved based on the real-time clock, geographical coordinates and photodiodes signal. The real-time clock and coordinates make it possible to calculate the solar zenith and azimuth angle. Two stepper motors are used to move the shade. Additional shade position adjustment happens on the basis of the signals from the photodiodes that are placed in the shadow region around the lens.

During the bachelor's thesis the electronics section of the device was prepared and tested. When writing the software connections to all functional parts were obtained, but full functionality was not reached. The principle solution of the mechanical part is selected and an initial 3D model has been generated in Solidworks 2012 software.

# Lisa 1. Elektroonika skeem



**Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina Ranno Kena

*(autori nimi)*

(sünnikuupäev: 12.10.1990)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

2.

AUTOMATISEERITUD PÄIKESEVARI TAEVAKAAMERALE,

*(lõputöö pealkiri)*

mille juhendaja on Joel Kuusk,

*(juhendaja nimi)*

1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 22.05.2013. *(kuupäev)*