

TARTU ÜLIKOOL
Füüsika-keemiateaduskond
Keskkonnanüüsika instituut

Markko Paas

**Metsa kiirgusrežiimi uurimine CCD-radiomeetriga
Digitaalpiltide radiomeetriline korrektsioon**

Magistritöö taimkatte kaugseirest

Keskkonnanüüsika erialal

Juhendaja:

Tartu Observatooriumi vanemteadur, geofüüsika doktor
Andres Kuusk

TARTU 2004

Sisukord

Sissejuhatus.....	3
1 CCD-radiomeeter.....	4
1.1 Seadme ehitus.....	4
1.2 Mõõtmisprotseduur.....	7
2 Piltide esmane töötlus.....	8
2.1 Pimevool.....	8
2.2 Tsentreerimine.....	9
2.3 Vinjeteerimine.....	10
3 Ülevaade metrooloogilistest probleemidest.....	12
3.1 Peegeldumine sisendoptikas.....	12
3.2 Taeva heledus metsa- ja lagedapiltidel.....	12
3.3 Hajusa ja summaarse kiirguse suhte mõõtmine etalonplaadi abil.....	14
3.4 Süsteemi optiline mudel.....	15
4 Peegeldumine	16
4.1 Peegeldustsentri asukoht	16
4.2 Peegelduse korrektsioon.....	17
5 Impulsskoste.....	19
5.1 Signaali-müra suhe.....	20
5.2 Impulsskoste määramine.....	21
5.2.1 Punktallikas.....	22
5.2.2 Valge ketas mustal taustal.....	24
5.2.3 Must ketas valgel taustal.....	26
5.2.4 Impulsskoste kokkuvõte.....	27
6 Korrektsioonialgoritm.....	30
7 Tulemused.....	31
7.1 Mudelpiltide korrigeerimine.....	31
7.2 Mõõteseeriade korrigeerimine.....	33
7.3 Etalonplaadi piltide korrektsioon.....	35
Kokkuvõte.....	36
Kirjandus.....	37
Abstract.....	38

SISSEJUHATUS

Käesolev magistritöö on jätk bakalaureusetööle, mis käsitles metsa kiirgusrežiimi uurimiseks kasutatava CCD-radiomeetri mõõtetulemuste töötlemist. Tartu Observatooriumis taimkatte kaugseire töörühmas ehitatud CCD-radiomeetriga on tehtud aastatel 1999-2003 palju mõõtmisi, mis on osaliselt ka juba publitseeritud [1]. Mõõtmistulemuste (digitaalpiltide) täpsemal uurimisel aga selgusid olulised heledusmoonutused, mis takistavad pilte radiomeetriliselt interpreteerimast. Käesolevas töös ongi detailselt välja toodud avastatud probleemid (peegeldumine ja hajumine radiomeetri sisendoptikas) ja võimalikud põhjused (optika lahtiste pindade määrdumine ja kahjustumine, ebastabiilne mehhaanika). Püütakse leida ka korrektsioonialgoritm, mis võimalikult hästi taastaks pildi lähtudes radiomeetristest vajadustest.

Käesoleva magistritöö esimeses peatükis on seadme ja mõõtmisprotseduuri kirjeldus. Järgmises peatükis on kordusena välja toodud varem teada olnud ja bakalaureusetöös [2] esitatud esmase töötluse etapid: pimevoolu lahutamine, kaadri tsentri leidmine ja vinjeteerimise korrektsioon. Kolmandas osas on lühidalt tutvustatud digitaalpiltidel nähtavaid probleeme — peegeldusefekti ja hajumise efekti. Nende modelleerimist käsitletakse peatükkides 4 ja 5. Kogu korrektsioonialgoritm antakse plokk skeemina peatükis 6. Meetodi kontroll ja korrektsiooni tulemused on 7. peatükis.

1 CCD-RADIOMEETER

1.1 Seadme ehitus

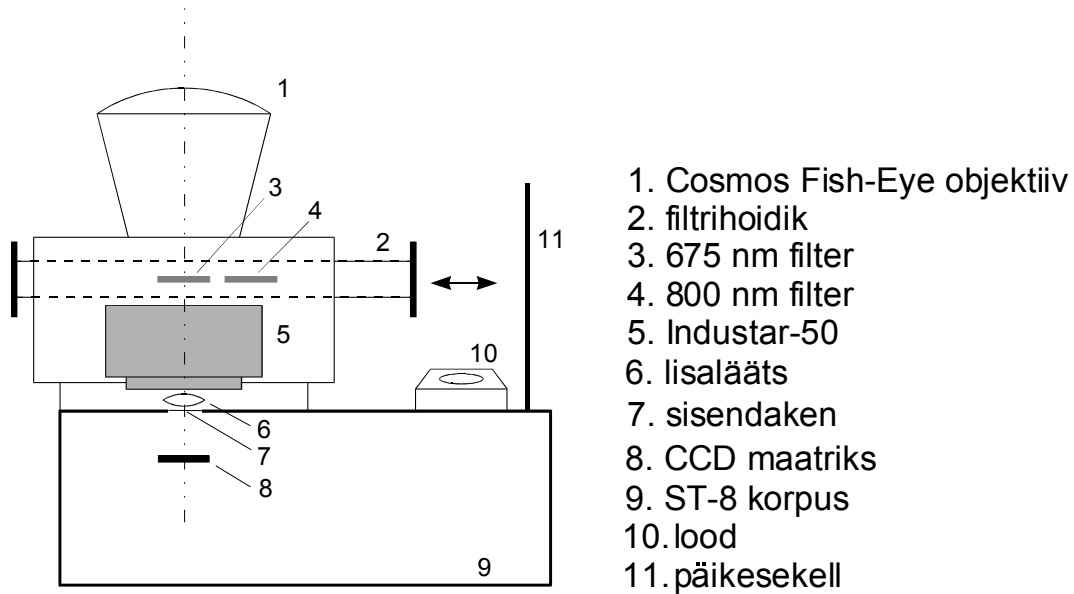
Taimkatte (metsa) kiirguslevi uurimiseks kasutatav CCD-radiomeeter on ehitatud amatöörastronoomias kasutatava CCD-kaamera ST-8 baasil (joonis 1). Kaamera ST-8 on valmistanud Santa Barbara Instrument Group [3]. Kaamerale on lisatud kalasilm-objektiiv "Cosmos Fish-Eye" (1) ning käsitsi liigutatav filtrisahtel, milles on kaks interferentsfiltrit: punane (3) (läbilaskvuse maksimumi lainepikkus $\lambda = 675 \text{ nm}$, poollaius $\Delta\lambda = 24 \text{ nm}$) ja lähisinfrapunane (4) ($\lambda = 800 \text{ nm}$, $\Delta\lambda = 9 \text{ nm}$). Sisendoptikas on kokku 9 avatud pinda, kuhu sattunud tolmu võib põhjustada kiirguse hajumist — 2 kalasilm-objektiivil (1), 2 interferentsfiltril (3 ja 4), 2 Industar-50 objektiivil (5), 2 lisaläätsel (6) ja 1 hermeetilise kambri sisendaknal (7). Radiomeetrit on võimalik jahutada kuni 25°C alla keskkonna temperatuuri. CCD-sensori temperatuuri on võimalik stabiliseerida $0,1^\circ\text{C}$ täpsusega. Elektromehhaaniline katik võimaldab säriaegu 0,11 sekundist kuni kümnete minutiteni. Vesiloodi (10) abil tagatakse seniidi sattumine kaadri keskele. Otsene päikesevalgus põhjustab ka minimaalse säriaega korral CCD-pikslite ületäitumist, selle vältimiseks varjatakse otsene päikesekiirgus paraja suurusega ekraaniga, mis on samuti radiomeetri korpuse külge ühendatud. Päikesekeella (11) jälgides pööratakse seade paralleelseks päikese tasandiga — nii satub Päikese kujutis alati pildil samale asimuudile. Päikese tasandi kujutis pildil on tsentrit läbiv horisontaalne pikslirida.

Radiomeetris on tundlikuks elemendiks CCD-matriks KAF1600 (6), mis koosneb 1530×1020 elemendist suurusega $9 \times 9 \mu\text{m}$. Sensori pimevool on 25°C juures vähem kui 10 pA/cm^2 . Sensori kvantefektiivsus on toodud joonisel 2 [4]. Mõõtmistulemused digitaliseeritakse 16-bitise analoog-digitaal muunduriga ja salvestatakse sülearvuti kõvakettale. Salvestamisprogramm tekitab faili, mis koosneb 2880-baidisest päisest ja 1024×1020 16-bitisest positiivsest täisarvust.

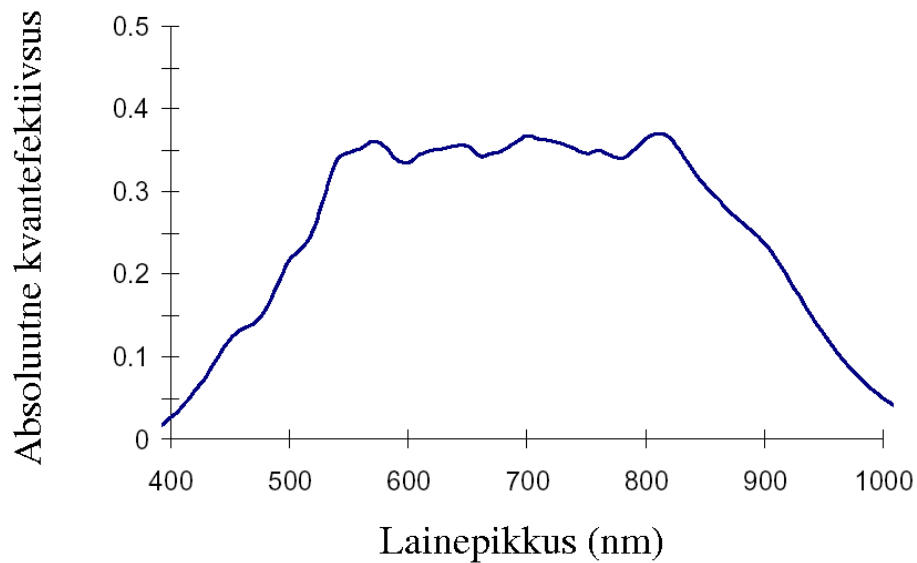
Radiomeetri nurkprojektsioon on polaarnurga θ vahemikus 0° - 85° peaaegu lineaarne. Polaarnurk avaldub kolmandat järku polünoomina:

$$\theta = 0,1533 \times r + 1,461 \times 10^{-7} \times r^2 + 3,459 \times 10^{-8} \times r^3, \quad (1)$$

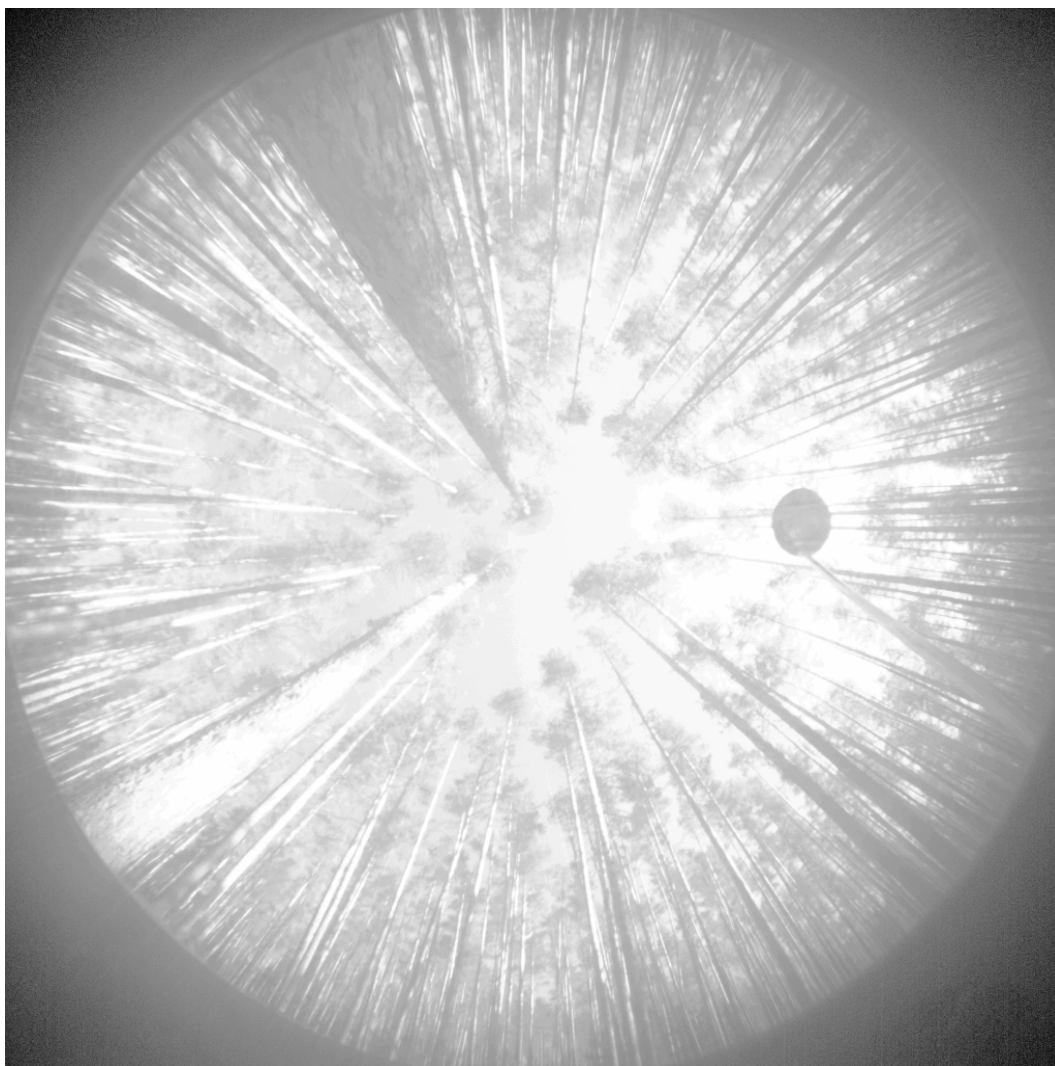
kus r on kaugus seniidist pikslites. Seega on sensori diskreetsusest tingitud minimaalne nurklahutusvõime $2 \times 0.15^\circ = 0.3^\circ$.



Joonis 1. CCD-radiomeeter



Joonis 2. CCD-sensori KAF-1600 kvantefektiivsus



Joonis 3. CCD-radiomeetriga tehtud pilt. Täiskasvanud männimets Järveljal. Kasutatud on punast filtrit

1.2 Mõõtmisprotseduur

Mõõdetavas metsas tuleb märkida 10-20 mõõtepunktist koosnev trass. Samuti tuleb leida metsale lähedal asuv kuid võimalikult lage ala, kus saaks võrdluseks mõõta taeva fooni. CCD-radiomeeter paigaldatakse statiivile, kõrgust saab muuta vahemikus 60-120 cm. Seade jahutatakse temperatuurini +5°C. Difuusse pealelangeva kiirguse määramiseks teostatakse seeria alguses ja lõpus mõõtmine metsa lähedal lagedal väljal. Samuti mõõdetakse aegajalt kaetud objektiiviga seadme pimevoolu. Metsa sees asuvate mõõtepunktide läbimisel tuleb rangelt jälgida varem paika pandud koordinaate, et radiomeeter paikneks puutüvede ja okste suhtes juhuslikult.

Igas mõõtepunktis sooritatakse kaks mõõtmist — üks punase, teine infrapunase filtriga — tavaliselt säriaajaga 0,2 s. CCD-radiomeetri üles seadmiseks tuleb

- asetada seade eelnevalt märgitud kohale
- seade loodida
- pöörata seade päikesekella abil päikese tasandiga paralleelseks
- kontrollida, et päikese-ekraan varjutaks objektiivi.

Mõõtmiste vahele jääb umbes üheminutiline paus, mis kulub andmete ülekandmiseks arvutisse ja radiomeetri viimiseks järgmisse mõõtmispunkti. Raskemini läbitavas metsas võib radiomeetri uude mõõtepunkti viimine võtta kuni 5 minutit. Kogu 20-punktilise seeria mõõtmiseks kulub vähemalt 1,5 ... 2 tundi.

Töös on kasutatud järgmiste välimõõtmiste andmeid:

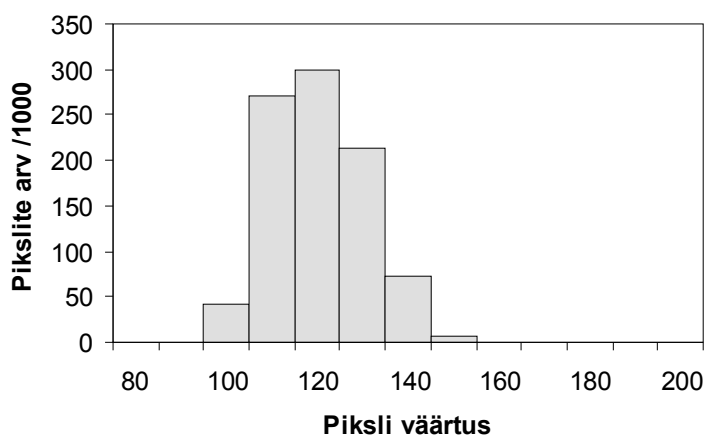
- 1999/141 (21. mai 1999) Järvelja (58°13'N, 27°08'E), männik 70 a.
- 2000/161_1 (9. juuni 2000) Flakaliden (64°07'N, 19°27'E), Põhja-Rootsi, väetatud kuusik 40 a.
- 2003 Tõravere energiavõsa, lepp 3 a.

2 PILTIDE ESMANE TÖÖTLUS

Piltide esmase töötamise eesmärk on kõrvaldada mõõtmistulemustest elementaarsed süstemaatilised vead. Bakalaureusetöös [2] on käsitletud järgmisi süstemaatilise vea allikaid: pimevool (2.1), kujutise ebatäpne asetsemine pildil (2.2) ja vinjeteerimine (2.3). Käesoleva uurimustöö käigus selgusid ka uued süstemaatilisi vigu põhjustavad nähtused nagu radiomeetri sisendoptikas toimuv peegeldus ja hajumine, mida käsitlen eraldi peatükis 3.

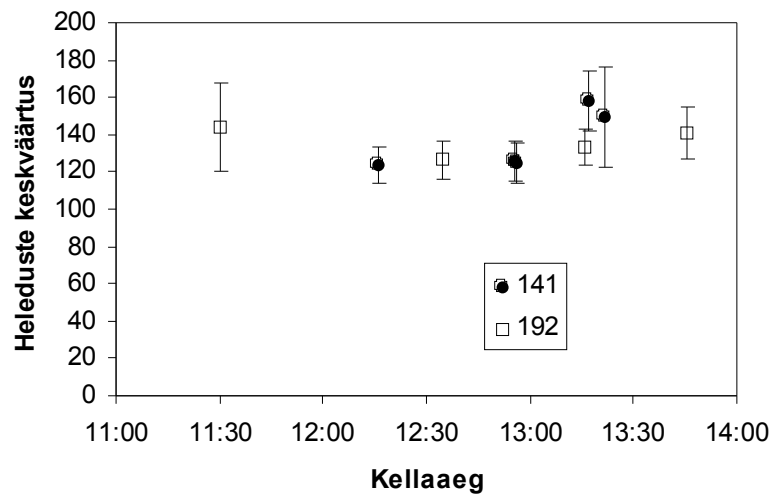
2.1 Pimevool

Praktiliselt iga radiomeetriline seade annab nullist erineva lugemi ka juhul, kui pealelangev kiirgus on nulli viidud (näiteks objektiiviga katmise abil). See nn pimevool põhjustab süstemaatilise vea, mis tuleb lugemist maha lahutada. Pimevool ei ole kõikidel pikslitel sama, see tuleb iga piksli kohta eraldi määrata ja seega peab pimevoolu käsitlema pildina nagu tavalist mõõtetulemustki. Pimevoolupildi saamiseks teeme pildi kaetud objektiiviga. Uurime, kuidas käitub pimevool mõõteseria käigus. Pildi koguvool on võrdeline pildi pikslite väärtuste integraalsummaga. Selle leidmiseks arvutame kõikide pikslite väärtuste summa. Valime piltide hulgast suletud sisendavaga tehtud pildid ja arvutame nende pimevoolutugevused.



Joonis 4. Pimevoolu jaotus heleduse järgi

Jooniselt 5 näeme, et pimevool piksli kohta on suhteliselt väike (keskväärtus 120-160) võrreldes mõõteandmetega (pikslite keskväärtus 4000-5000) ja ei sõltu märkimisväärselt ajast. Üksikute pikslite pimevoolude võimalike erinevuste arvestamiseks valime kõige väiksema standardhälbega pimevoolupildi ja lahutame selle pikselhaaval igast edaspidi töödeldavast pildist. Kasutatud pimevoolupildi pikslite heleduse jaotus on joonisel 4.



Joonis 5. Pimevoolupiltide pikslite keskväärtused koos standardhälvetega kahes erinevas mõõteseria: 1999/141 ja 1999/192.

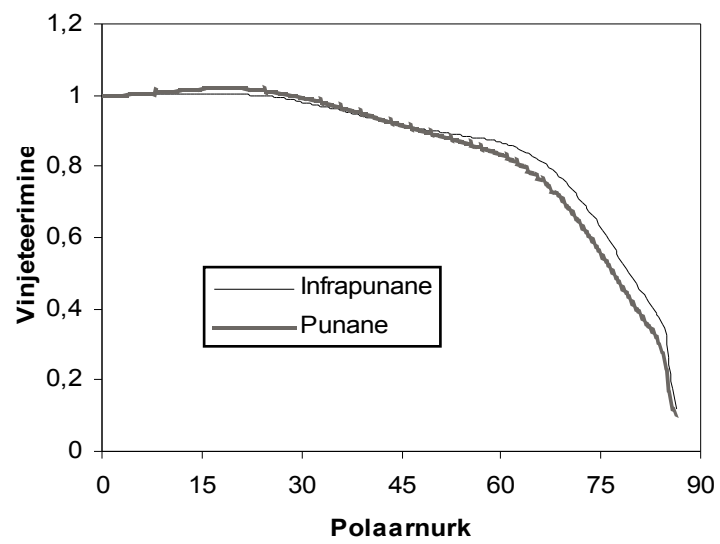
2.2 Tsentreerimine

Erinevate mõõtmiste juures kujutise asukoht pildil varieerub veidi. Kõige tõenäolisemalt võib selle põhjuseks olla filtrisahtli mittejäik mehhanism ja sisendoptika komponentide telgede mittekokkulangemine. Üks võimalus pildi keskpunkti ehk seniidi leidmiseks on teha seda kaadri ringikujulise serva järgi. Serv pole aga alati nii konkreetne (eriti metsas tehtud piltidel), et otsimist oleks võimalik automatiseerida. Kaadri keskpunkti leidmiseks serva järgi on loodud interaktiivne graafiline utiliit `coord.tcl`. See programm kuvab valitud pildi ja joonistab sellele kahest kontsentrisest ringjoonest koosneva "sihiku", mida kasutaja saab nihutada ning suurendada/vähendada. Samuti on võimalik muuta ringjoone värvi. Kasutaja peab sihikuringi sättima silma järgi nii, et kaadri serva üleminek jääks täpselt kahe sihikuringi vahele. Kõige täpsemalt õnnestub seda

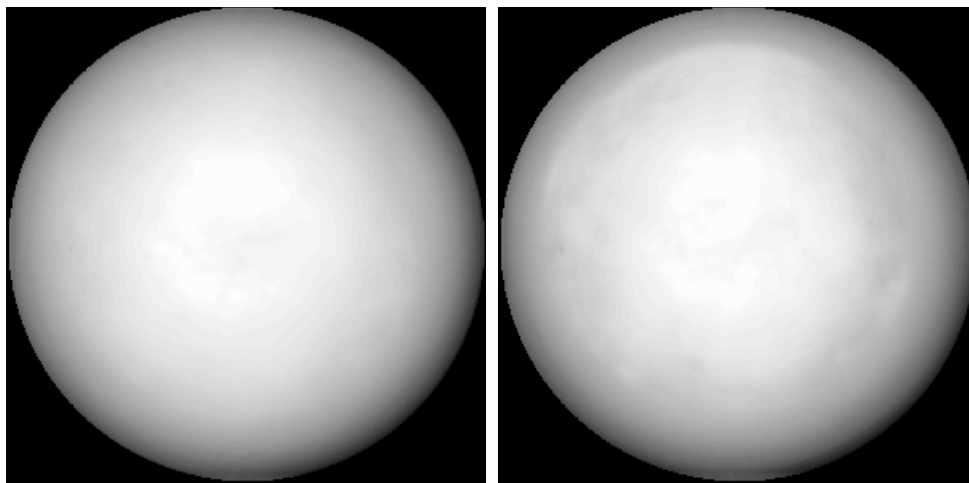
teha siis, kui sihiku värvus ja heledus on lähedased pildi heledusega. Programm väljastab leitud keskpunkti koordinaadid, mis antakse edasi järgneva töötlusetapi skriptile.

2.3 Vinjeteerimine

Vinjeteerimine (ingl. *vignetting*) tähendab optilise instrumendi tundlikkuse sõltuvust vaatesuunast. Kasutatava radiomeetri objektiivi vinjeteerimine on mõõdetud 1-meetrise läbimõõduga integreerivas sfääris. Üle asimuudi keskmistatud vinjeteerimine on kujutatud joonisel 6. Lisaks polaarnurgale sõltub vinjeteerimine vähemal määral ka asimuudist (joonis 7). Peale selle võivad pikslid olla ka üksteisest sõltumatult erineva tundlikkusega — ühtlase heledusega objekti pildistamisel saadakse mitteühtlane kujutis. Seda nimetatakse ka tasaväljaprobleemiks. Seetõttu tuleb korrektsioon läbi viia pikselhaaval. Korrigeerimisprogrammis jagatakse töödeldava pildi piksel läbi vastava vinjeteerimispildi piksliga ning korrutatakse skaleerimiskonstandiga 30 000. Skaleerida on vaja korrigeeritud pildi säilitamiseks 16-bitiste täisarvude failis.



Joonis 6. Vinjeteerimine keskmistatuna üle asimuudi.

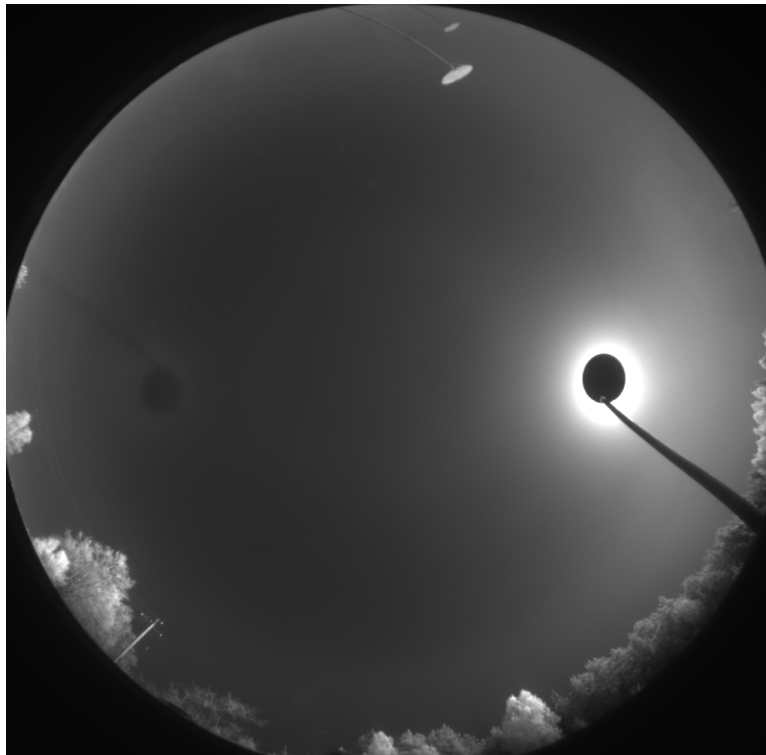


Joonis 7. Integreerivas keras punase ja infrapunase filtriga saadud vinjeteerimispildid.

3 ÜLEVAADE METROLOOGILISTEST PROBLEEMIDEST

3.1 Peegeldumine sisendoptikas

Tüüpilisel lagedapildil on näha kontrastsetest objektidest tekkivad peegelkujutised. Selgelt on see efekt näha päikese-ekraani (nii punases kui ka infrapunases lainelas) ja horisondi lähedase metsa puhul (infrapunases lainelas) (joonis 8). Peegelkujutise heledus on suurusjärgus mõni protsent originaalkujutise heledusest.

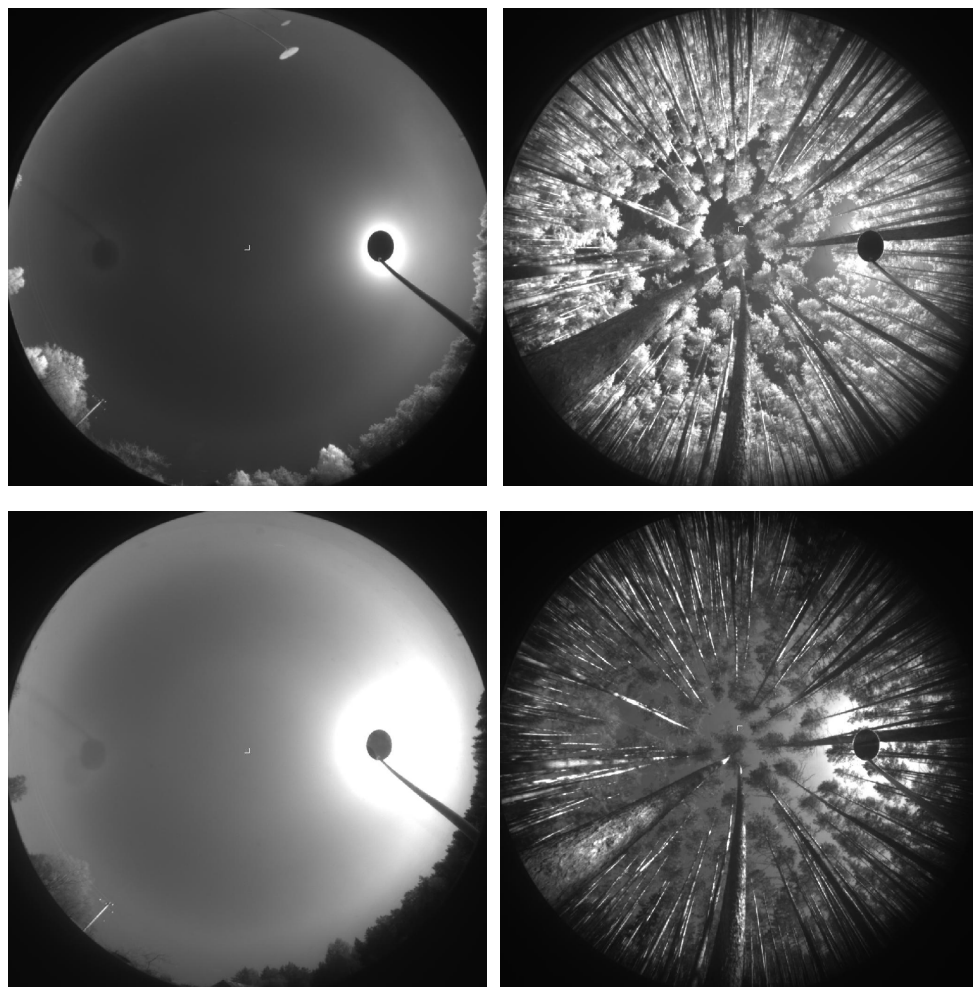


Joonis 8. Lageda pilt infrapunase filtriga. Selgesti on näha päikese-ekraani peegelkujutis ja üleval vasakul ka veidi heleda metsa peegelkujutist. Järvelja 1999/141.

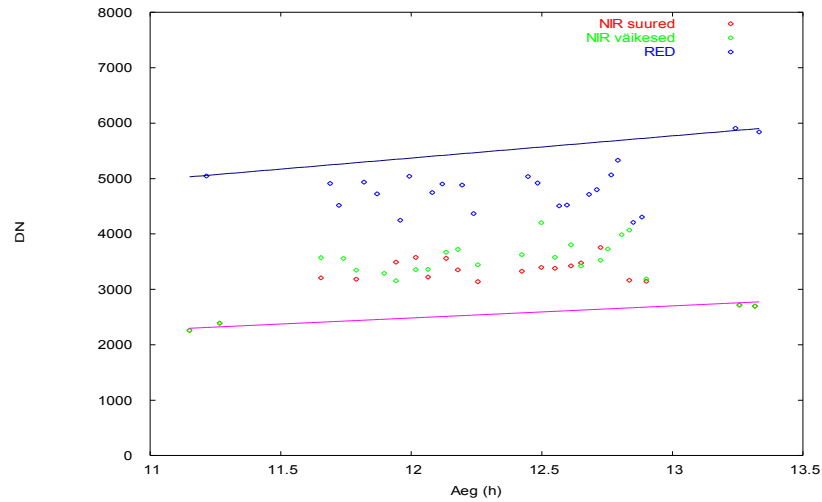
3.2 Taeva heledus metsa- ja lagedapiltidel

Infrapunases lainelas (joonisel 9 kaks ülemist pilti), kus taevas on oluliselt tumedam kui puude võrad, moonutavad ümbritsevad heledad objektid tumeda taeva heledust. Sama nähtus on vähemal määral jälgitav ka punases lainelas

(joonisel 9 kaks alumist pilti), kus taevas on heledam kui võrad. Antud näidispiltidel on võimalikult seniidi lähedalt valitud 11×11 aknas arvutatud pikslite heleduse keskväärtused. Infrapunases lainelas on metsapildil prooviaknas keskmine heledus ca 50% suurem kui lagedapildil ja punases lainelas on metsapildil prooviaknas heledus ca 10% väiksem kui lagedapildil. Joonisel 10 on toodud ajalises järjestuses seeriaste piltidelt valitud taevalade heledused. Infrapunases lainelas on vahet tehtud ka suurte (diameeter ca 40 pikslit) ja väikeste (diameeter ca 20 pikslit) taevalade vahel.



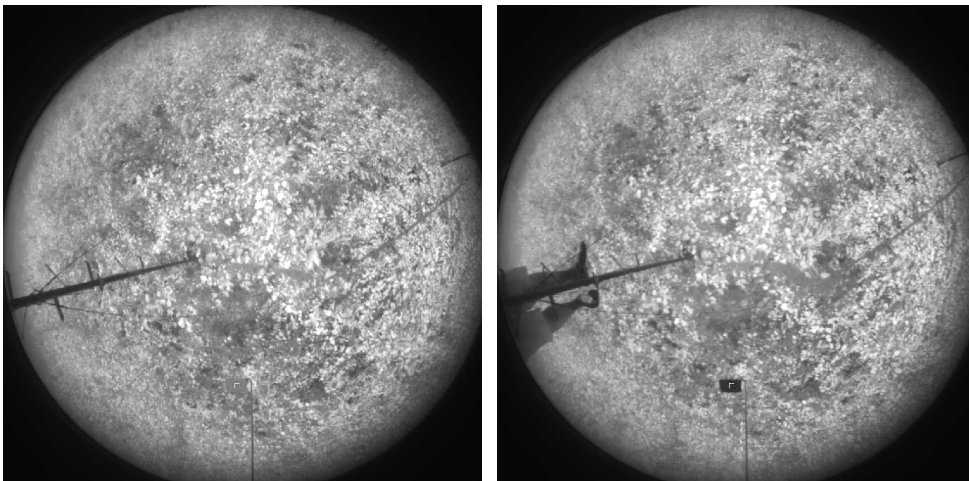
Joonis 9. Lageda- ja metsapildid infrapunases (üleväl) ja punases (all) lainelas. 1999/141, Järvselja männik.



Joonis 10. Seniidilähedase taevaala heleduse muutus mõõteseeria jooksul infrapunase (NIR) ja punase (RED) filtri korral. Järvelja 1999/141.

3.3 Hajusa ja summaarse kiirguse suhte mõõtmine etalonplaadi abil

Tõraverse energiavõsas 29.07.2003 teostatud mõõtmiste käigus hinnati muuhulgas ka hajunud ja summaarse kiirguse suhet (joonis 11). CCD-radioomeetriga mõõdeti energiavõsast peegeldunud kiirgust. Radiomeetri vaatevälja asetati väike etalonplaat, mida valgustas kogu pealelangev valgusvoog (otsene ja difuusne). Hajuskiirguse mõõtmiseks varjati ekraaniga etalonplaadile langev otsene kiirgus (joonis 11, paremal).

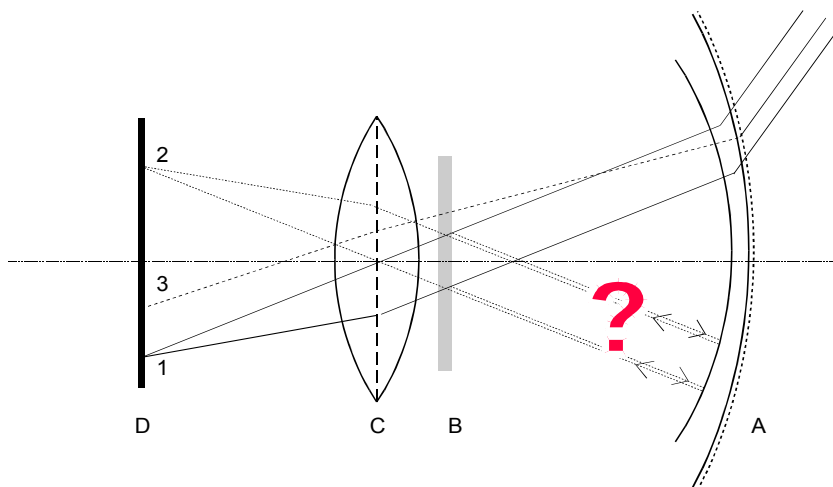


Joonis 11. Etalonplaadi mõõtmine. radiomeeter asub katsevõsa kohal. Parempoolsel pildil on etalon varjatud otsese kiirguse eest. Energiavõsa katselapp Tõraveres 29.07.2003

Infrapunase filtriga tehtud piltidel märgitud akendes arvutatud signaali keskvväärtused annavad (pärast nulli lahutamist ja vinjeteerimise korrektsiooni) hajusa ja summaarse kiirguse suhteks 0,41. Sama kuupäeva päikesefotomeetri andmeid kasutades annab atmosfäärikorrektsiooni pakett 6S selleks suhteks 0,12 (kontinentaalne aerosool) kuni 0,19 (mereline aerosool). Seega võrdlus päikesefotomeetri andmetega annab mõõteveaks rohkem kui 100%.

3.4 Süsteemi optiline mudel

Lähtuvalt eelpooltoodud nähtustest võib koostada radiomeetri optilise mudeli (joonis 12). Radiomeetrisse sisenev kiirgus hajub oletatavasti peamiselt kalasilm-lisaobjektiivil esimesel, keskkonnamõjudele avatud pinnal A ja jõuab CCD-sensoril D punkti 3. Tegelikult on süsteemis kokku üheksa avatud pinda (kaks kalasilm-objektiivil, kaks interferentsfiltril, kaks põhiobjektiivil, kaks lisaläätsel ja üks kaamera hermeetilise kambri sisendaknal), millele võib olla kogunenud tolm, mis võib valgust hajutada. Sarnast hajumist on kirjeldatud ka satelliidil asuva kaamera juures, kui selle objektiivile on kondenseerunud kütusejäägid [5]. See tekitab tähtede kujutiste nõrga, kuid väga laiaulatusliku ($r > 100$ pikslit) laialimäärdumise. Mingil põhjusel koonduvad ka interferentsfiltrilt B peegeldunud kiired tagasi CCD-sensorile D ja tekitavad sellel peegelkujutise 2, mis asub päriskujutise 1 suhtes peegelpositsioonil.

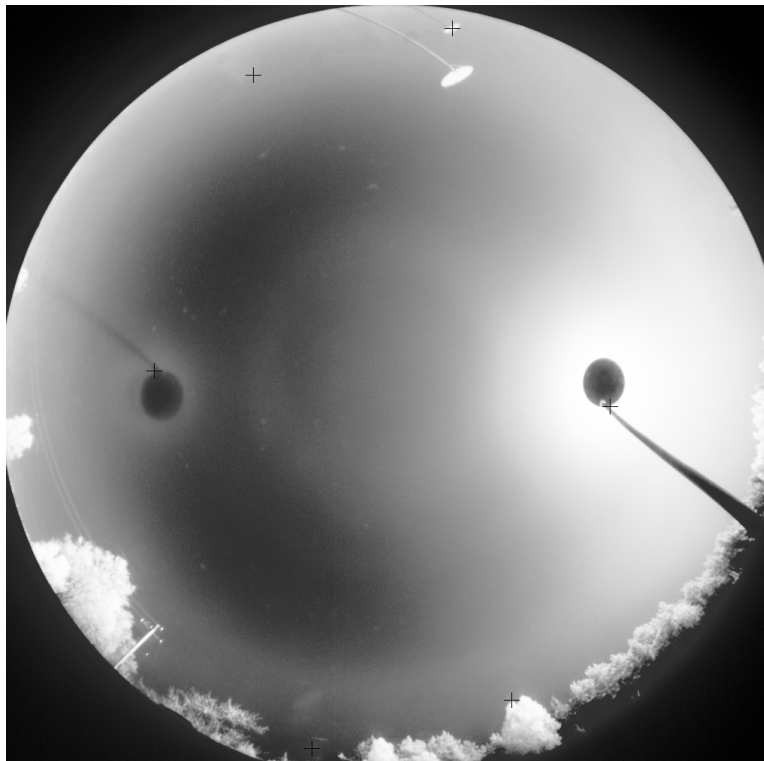


Joonis 12. CCD-radiomeetri optiline mudel

4 PEEGELDUMINE

4.1 Peegeldustsentri asukoht

Lagedapiltide pealt võib leida erinevaid objekte koos neile vastavate peegeldunud kujutistega. Võttes mõne kontrastse objekti koordinaadi ja vastava peegelduse koordinaadi, võime arvutada punkti koordinaadid, mille suhtes peegeldumine toimus. Seda punkti nimetame edaspidi pildi peegeldustsentriks. Kontrollime ühe konkreetse pildi (möötepäev 1999/141, Järvelja männik) abil, et peegeldustsenter ei sõltu vaatenurgast (joonis 13). Tabelis 1 on toodud peegeldustsentri koordinaatide arvutuskäik.



Joonis 13. Peegeldustsentri määramine pildilt kontrastsete objektide abil. Järvelja 1999/141.

objekt	x1	y1	x2	y2	$cx = \frac{x1+x2}{2}$	$cy = \frac{y1+y2}{2}$
ekraan	804	540	197	492	500,5	516,0
kaugem ekraan	594	31	407	1000	500,5	515,5
võratipp	673	935	329	94	501,0	514,5

Tabel 1. Peegeldustsentri määramine

Peegeldustsentri asukoha uurimiseks viidi läbi täiendavaid laboratoorseid eksperimente, uuriti punktvalgusallika ja selle peegelkujutise asendit. Eksperimendi tulemused näitasid, et filtri vahetamisel peegeldustsenter muutub juhuslikult (peegeldumine toimub ilmselt interferentsfiltri pinnalt), küll aga korreleerub see mõnevõrra kaadri keskpunktiga. Ka kaadri asend CCD-maatriksil on seotud interferentsfiltri asendiga. Kuna peegeldustsentrit saab leida ainult kontrastsetelt objektidelt, mida leiab vaid lagedapiltidelt, siis tuleb iga mõõteseeria jaoks lagedapiltidelt leida peegeldustsentri nihe kaadri keskkoha suhtes. Edaspidises töötuses saab igale pildile peegeldustsentri leida liites punktis 2.2 kirjeldatud meetodil leitud kaadri keskpunktile peegeldustsentri nihke.

4.2 Peegelduse korrektsioon

Eeldame, et võrdeline osa valitud pikslile langevast kiirgusest on ära peegeldunud ja sattunud peegelpikslile. Valitud pikslis registreeritud signaali otselangenud ja peegeldunud komponendid on

$$\begin{aligned} w'_{ij} &= w_{0ij}(1-\alpha) \\ w''_{ij} &= w_{0mn}\alpha \end{aligned} \quad (2)$$

kus α on peegeldumiskoeffitsient, w_{0ij} ja w_{0mn} tähistavad CCD-maatriksi eeldatavaid lugemeid valitud pikslis ja peegelpikslis, kui peegeldusefekt puuduks. Piksli ja sellele vastava peegelpiksli kiirgusbilansi saab üles kirjutada järgmise võrrandisüsteemi abil:

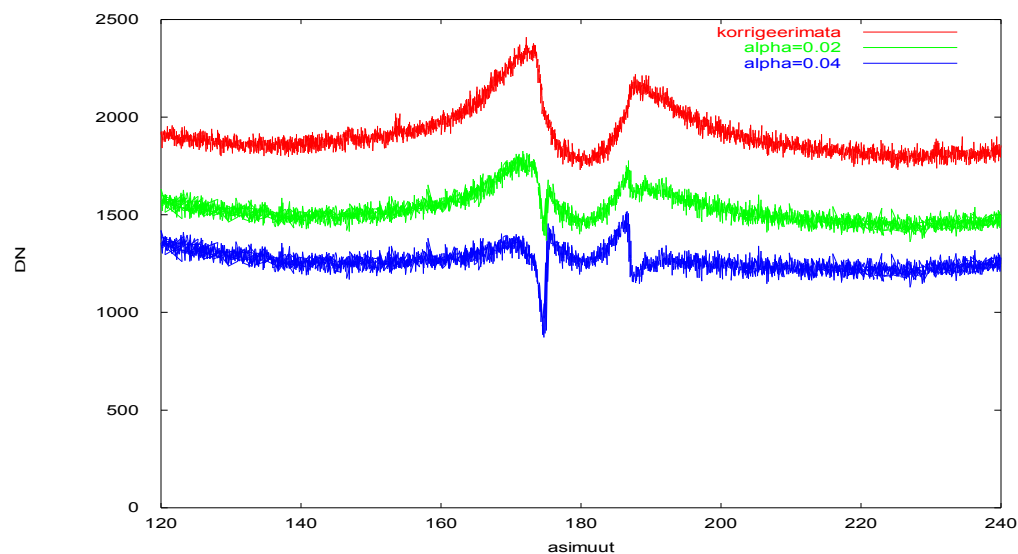
$$\begin{cases} w_{ij} = w_{0ij}(1-\alpha) + w_{0mn}\alpha \\ w_{mn} = w_{0mn}(1-\alpha) + w_{0ij}\alpha \end{cases} \quad (3)$$

kus w_{ij} ja w_{mn} on CCD-maatriksi lugemid. Peegelpiksli koordinaadid on $m=2i_c-i$ ja $n=2j_c-j$, kus i_c ja j_c on peegeldustsentri koordinaadid. Tegu on lineaarvõrrandisüsteemiga, mille lahend avaldub kujul

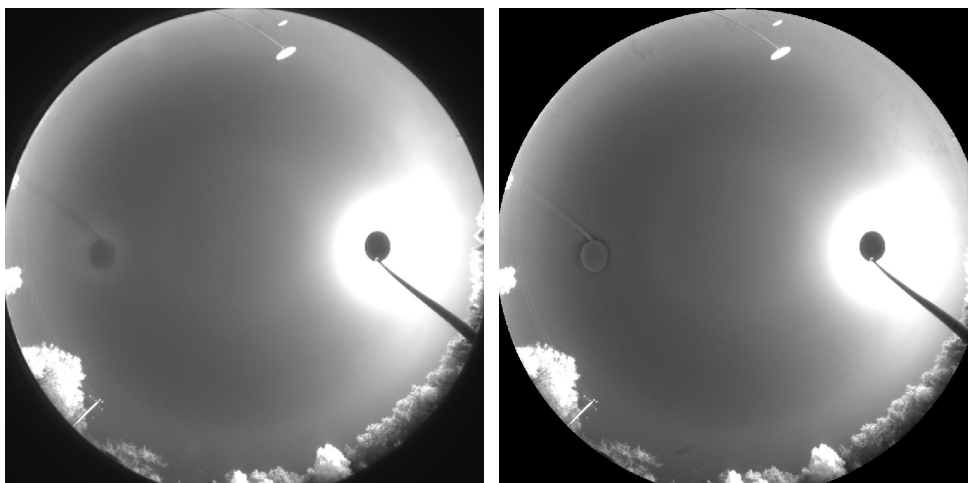
$$w_{0ij} = \frac{w_{ij}(1-\alpha) - w_{mn}\alpha}{(1-2\alpha)} \quad (4)$$

Peegeldumiskoeffitsient α tuleb määrata katseliselt, võrreldes suhteliselt ühtlase heledusega lagedapildil päikesevarju peegelkujutise heledust oma ümbruse heledusega. Joonisel 14 on toodud pikslite heledused päikesevarju peegelkujutist läbival almukantaraadil erinevate peegeldumiskoeffitsientidega korrigeeritud

juhtudel. Parema jälgitavuse huvides on iga järgmine lõige nihutatud 200 ühiku võrra allapoole. Piisavalt hea tulemuse saame, kui võtame $\alpha=0,04$. Korrigeeritud pilt on toodud joonisel 15.



Joonis 14. Peegeldumise korrektsiooni mõju pikslite heledusele päikesevarju peegelkujutist läbival almukantaraadil. Kõige väiksem on moonutus $\alpha=0,04$ korral. Alumised seeriad on pildil parema jälgitavuse jaoks nihutatud 200 ja 400 ühiku võrra allapoole. Järvelja 1999/141.



Joonis 15. Infrapunase lagedapildi peegeldumise korrektsiooni tulemused. Vasakul on peegeldus korrigeerimata, paremal korrigeeritud. Järvelja 1999/141

5 IMPULSSKOSTE

Punktides 3.2 ja 3.3 kirjeldatud kiirguse laialimäärdumise nähtusi põhjustab sisendoptikas toimuv hajumine. Teatud vaatesuunast (punktvalgusallikast) langev kiirgus ei satu mitte ainult ettenähtud pikslile, vaid jaotub laiali mingile pildiosale. Sellist hajumist saab modelleerida sisendsignaali ja seadme impulsskoste (punkthajumise funktsioon, *impulse response*, *point spread function*, PSF) konvolutsioonina. Sisuliselt on PSF süsteemi väljund punktvalgusallika mõõtmise korral. Vaatleme juhtu, kus puudub müra ja mõjub ainult impulsskoste. Sel juhul kirjeldab signaali hajumist faasiruumis konvolutsioonivõrrand

$$g(x, y) = \iint h(x-u, y-v) f(u, v) du dv = h(x-u, y-v) \otimes f(u, v), \quad (5)$$

kus f on sisendpilt, h on süsteemi impulsskoste (PSF) ja g on väljundpilt – registreeritud mõõtetulemus. Spektriruumis teiseneb konvolutsioon maatriksielementide korrutamiseks

$$G = H \cdot F, \quad (6)$$

kus G , F ja H on diskreetse Fourier' pöörde abil saadud sagedusesitused maatriksitest g , f ja h . Suurust H nimetatakse ka süsteemi sageduskosteks. Dekonvolueerimiseks nimetatakse konvolutsiooni kõrvaldamist, algse sisendpildi taastamist

$$\hat{F} = G \cdot W \quad (7)$$

, kus W on spektraalne filter. Kui süsteem on müravaba, siis saab edukalt kasutada nn inversioonfiltrit

$$W(u, v) = \frac{H(u, v)^*}{|H(u, v)|^2} \quad (8)$$

kus H^* on impulsskoste kaaskompleks. Selle filtri probleem on pildil leiduva kõrgsagedusliku müra ülesvõimendamine (Kõrgete sageduste korral on H väike). Selle meetodi korral ei tohi H sisaldada nullpunkte. Täiendava müra korral on parem kasutada Wieneri parameetrilist filtrit

$$W(u, v) = \frac{H(u, v)^*}{|H(u, v)|^2 + \gamma \cdot \frac{1}{|H(u, v)|^2}} \quad (9)$$

, kus PN ja PS on vastavalt müra ja signaali võimsusspektrid. Selline filter toimib suure signaali-müra suhte korral inversioonfiltrina ja kõrgete sageduste juures, kus

müra on suhteliselt rohkem, madalpääsfiltrina. Parameetri γ abil saab muuta madalpääsfiltri osatähtsust, selle väärtus tuleb määrata visuaalselt. Liiga tugeva madalpääsfiltri korral kaovad pildilt detailid ja teravad kontuurid pehmenevad, liiga nõrga madalpääsfiltri korral tekib teravate kontuuride ümber lainetus. Inversioon- ja Wieneri filtreid on käsitletud enamikus signaalitöötuse alases kirjanduses, näiteks [6] või [7]. Käesoleva optilise süsteemi korral eeldame, et H , PN ja PS on pöördsummeerilised, seega saame

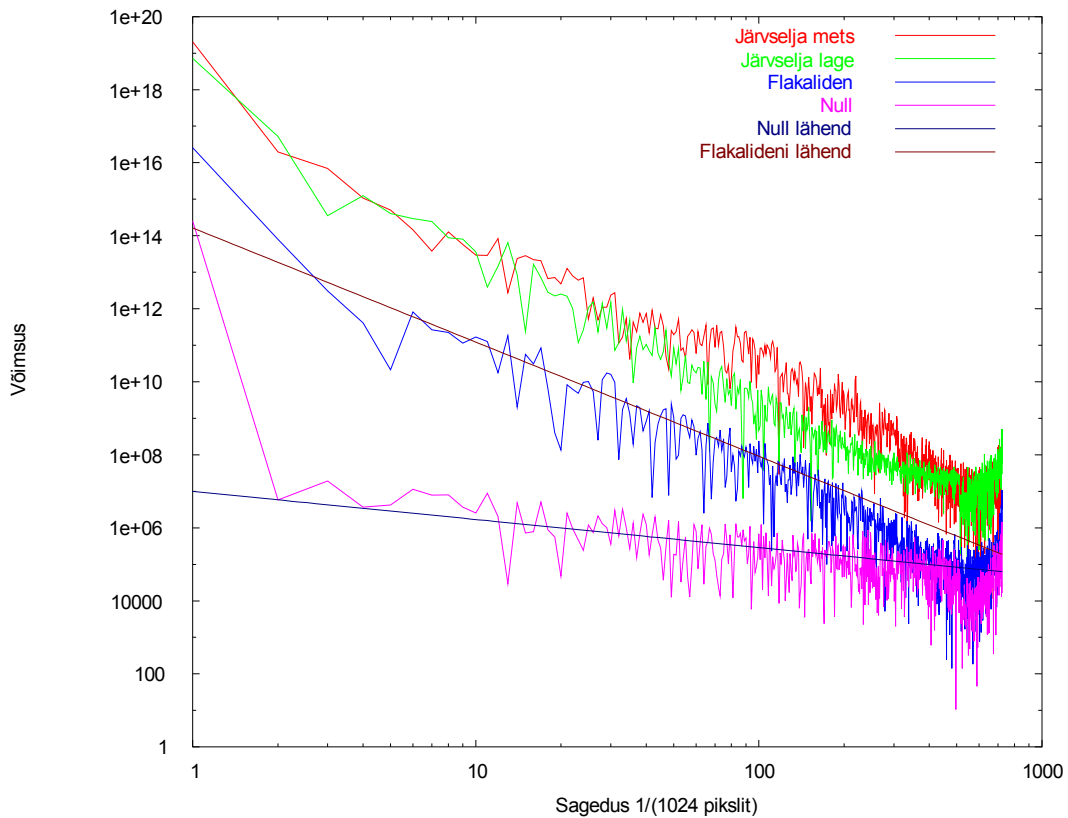
$$W(w) = \frac{H(w)^*}{|H(w)|^2 + \gamma / SNR^2(w)} \quad (10)$$

kus w on kaugus 0-sagedusest spektriruumis ja $SNR(w)$ on signaali-müra suhe (*Signal/Noise Ratio*). Wieneri filtri rakendamiseks on vaja eksperimentaalselt määrata signaali-müra suhe ja impulsskoste.

5.1 Signaali-müra suhe

Signaali-müra suhte juures on oluline registreerida selle sõltuvus sagedusest. Suhte suurus ise ei ole nii oluline, sest seda saab korrigeerida parameetriga γ (valem 9). Joonisel 16 on toodud mõningate iseloomulike mõõteseeriade spektrid. Järvelja männimetsa pildid on kontrastsed ja muutlikud, seetõttu on signaali võimsusspekter kõigi sageduste juures kõrgem. Infrapunase filtriga tehtud pildil on taevast ühtlane ja tume, see kajastub pildi nõrgemas spektris. Flakalideni tiheda kuusiku seerias on metsapiltide muutlikkus väiksem, seetõttu spekter ka nõrgem. Müra spekter on leitud kaetud objektiiviga tehtud pildilt. Spektrid on lähendatud logaritmilises skaalas sirgetega. Et mitte üle hinnata signaali-müra suhet, võtame universaalsesse kasutusse kõige nõrgema spektri (Flakalideni kuusik). Valemissse 10 sobival kujul avaldatuna saame signaali-müra suhteks

$$\begin{aligned} \frac{1}{SNR^2(w)} &= \frac{9.96 \cdot 10^6 \cdot \exp[-0.770 \cdot \log(w)]}{1.64 \cdot 10^{14} \cdot \exp[-3.13 \cdot \log(w)]} = \\ &= 6.09 \cdot 10^{-8} \cdot \exp[2.37 \cdot \log(w)] \end{aligned} \quad (11)$$



Joonis 16. Signaali ja müra spektrid

5.2 Impulsskoste määramine

Põhimõtteliselt on võimalik optilise süsteemi impulsskostet määrata mõõtes mustal taustal asuva punktvalgusallika poolt tekitatud signaali. Teatud kaugusest alates võib ka kettakujulise objekti lugeda punktiks ja nii saab hinnaga PSF-i käiku suuremate raadiuste korral. Kaudsel meetodil saab impulsskostet leida ka suvalise tuntud kujuga sisendsignaali abil. Näiteks hele ketas mustal pinnal või must ketas heledal pinnal. Lähtudes valemist 6, saame spektriruumis PSF-i avaldada

$$H = \frac{G}{F} \quad (12)$$

Seega saame spektriruumis põhimõtteliselt leida PSF-i suvalise registreeritud signaali G abil, kui me vaid teame originaalsignaali F või suudame seda modelleerida.

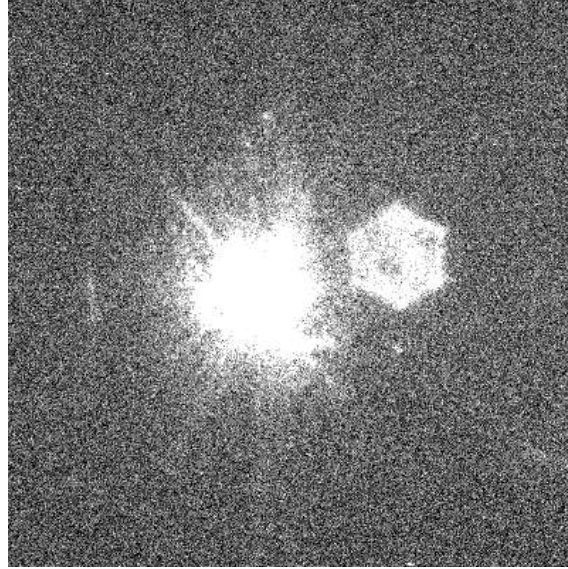
Praktikas on moonutuste mõõtmiseks sobivate piltide modelleerimine keeruline. Kõige lihtsamate piltide — ühtlase heledusega objekt ühtlasel taustal — korral on raske tagada ühtlast heledust üle kogu objekti ja tausta. Läbi viidud mudelobjektide pildistamise eksperimendid on toodud tabelis 2 .

<i>Nr</i>	<i>Kuupäev</i>	<i>Objekt</i>	<i>Keskkond</i>	<i>Eksperimenti läbiviija(d)</i>
1	24.01.2004 25.01.2004	punktallikas	diafragmad	Andres Kuusk
2	23.03.2004	valge ketas	must ribidega toru	Andres Kuusk, Markko Paas
3	11.05.2004	must ketas	integreeriv sfäär	Andres Kuusk, Uno Veismann
4	14.05.2004	valge ketas	must ribidega toru	Andres Kuusk

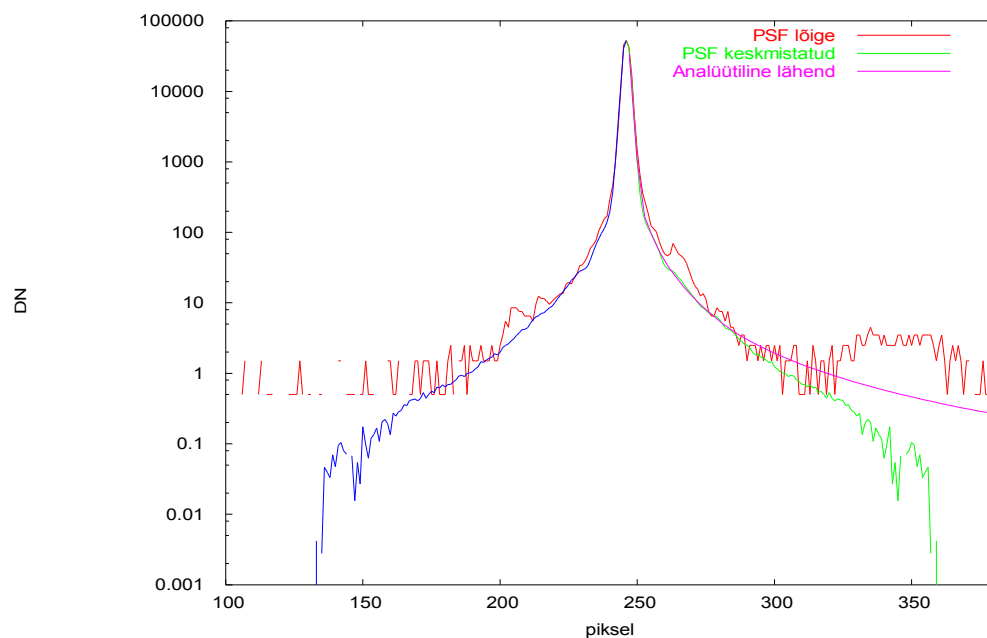
Tabel 2. Impulsskoste määramiseks tehtud eksperimendid

5.2.1 Punktallikas

Punktallika korral on selle väikeste mõõtmete tõttu üsna lihtne takistada valguse pääsemist mittevajalikesse kohtadesse. Valgusallikas (taskulambipirn) on asetatud väikese ribidega toru sisse (aktinomeetri toru) ja pandud mõne meetri kaugusele radiomeetrist. Sellisel kaugusel asuva lambi hõõgniidi kujutis mahub ühele pikslile Valgusallika ja radiomeetri vahel on täiendavad diafragmad, et vältida hajunud kiirguse fooni. Probleemseks osutub uuritava hajumisfunktsiooni kadumine mürasse. Mürataseme vähendamiseks tehakse vaheldumisi 70 punktallika pilti ja 70 fooni pilti (otsene kiirgus valgusallikast varjatud). Seejärel keskmistatakse punktallika ja fooni vahe pildid.



*Joonis 17. Osa punktallika pildist. Tugevalt üles
võimendatud, et oleks näha tegelik struktuur*



Joonis 18. Punktallika pildi läbilõige, üle asimuudi keskmistatud PSF ning analüütiline lähend

Joonisel 17 avaldub, et süsteemi tegelik PSF ei ole sugugi pöördsummeetriline funktsioon, nagu eeldasime peatüki teoreetilises osas. Lisaks paistab nõrk kuusnurkne peegelkujutis. NB! See ei ole sama, mis peatükis 3.4 kirjeldatud peegeldus, vaid täiendav, nõrgem ja laialihajunud peegelkujutis. Selle asend

punktallika kujutise suhtes sõltub punktallika kujutise koordinaadist. Graafikul 18 on näha horisontaalne lõige, mis läbib PSF tippu. PSF on keskmistatud üle II ja III veerandi, mis kuusnurka ei sisalda. Analüütiline lähend on toodud allpool valemis 13.

Paremas servas pikslitel 320 ... 370 on näha ka läbilõige kuusnurga alumisest servast. Lahutades kuusnurka sisaldava pildiosa summaarsest intensiivsusest (11751) fooni (1001) ja võrreldes seda valgusallika kujutise summaarse intensiivsusega (762834), saame tulemuseks, et kuusnurkse peegelukjutise moodustab ligikaudu 1,4% langenud kiirgusest.

5.2.2 Valge ketas mustal taustal

Valge ketta pilti saab modelleerida ühtlase heledusega kettakujulise valgusallika abil. Sellised täppisinstrumendid on küll olemas [8], kuid need ei ole käesoleva ülesande jaoks kättesaadavad.

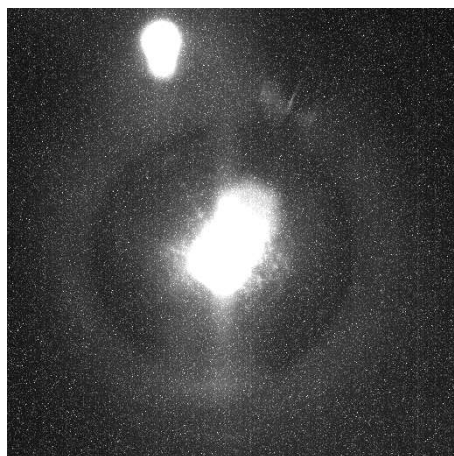
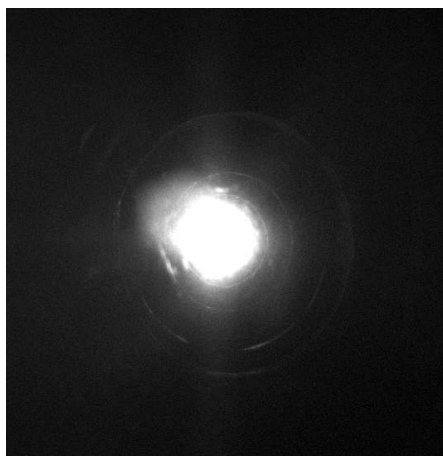
Eksperimendis annab kettakujulise kujutise 100mm optilise kera 30 mm väljundava. Suurema pindalaga valgusallika korral saame parema signaali-müra suhte kui punktallika korral. Valgusallikas asub radiomeetrile küllalt lähedal (40 ... 20 cm), keskkonna fooni vältimiseks on valgusallika ja radiomeetri vahele asetatud mustast paberist valmistatud toru. Ühekordsel peegeldumisel hajub suurte langemisnurkade korral isegi mustalt pinnalt palju valgust, seetõttu on toru täidetud ribidega, mis on asetatud nii, et ühekordselt peegeldunud valguse jõudmine objektiivile oleks tõkestatud. Katseseadme ehitus on joonisel 19. Eksperimendid 2 ja 4 erinevad teineteisest toru pikkuse ja ribide asendi poolest. Joonisel 20 parempoolsel pildil on näha 2. eksperimendi puudujääk ribide paigutuse osas — hele rõngas on tingitud ühekordsest peegeldumisest toru mustaksvärvitud seinalt. Vasakpoolsel pildil on näha ainult peened diafragmade servad. Mõlemal pildil on näha kuusnurkne peegeldus, parempoolsel ka peegelpunkt, millest on jutt peatükis 3.4.

Joonisel 21 kujutatud 4. eksperimendi tulemus on saadud I+IV ja III+IV

veerandite üle asimuudi keskmistamisel. Nagu näha, on hajunud signaal I ja III veerandis veidi erinev. Analüütiline lähend on toodud allpool (valem 13).



Joonis 19. Valge ketta katseseade 23.03.2004. Optiline kera, ribidega toru ja radiomeeter.



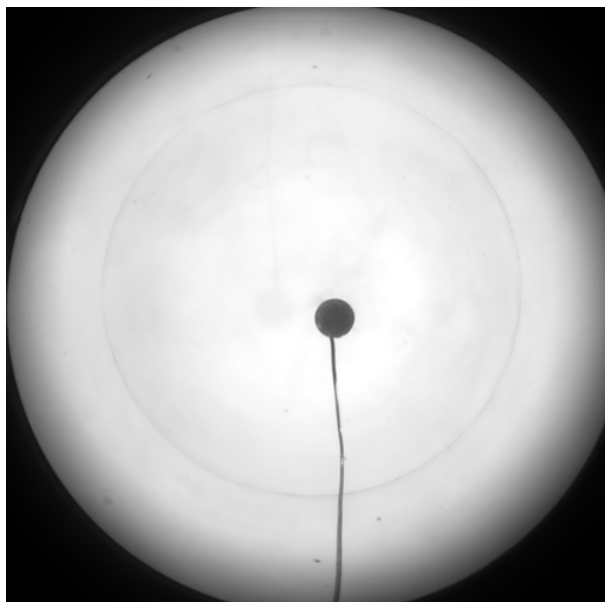
Joonis 20. Osa valge ketta pildist. Vasakul on eksperimendist nr 4 kolme pildi keskmine. Paremal eksperimendi nr 2 üksikmõõtmine. Mõlemal pildil on näha kuusnurkne peegeldus, parempoolsel ka kõige intensiivsem peegelpunkt

5.2.3 Must ketas valgel taustal

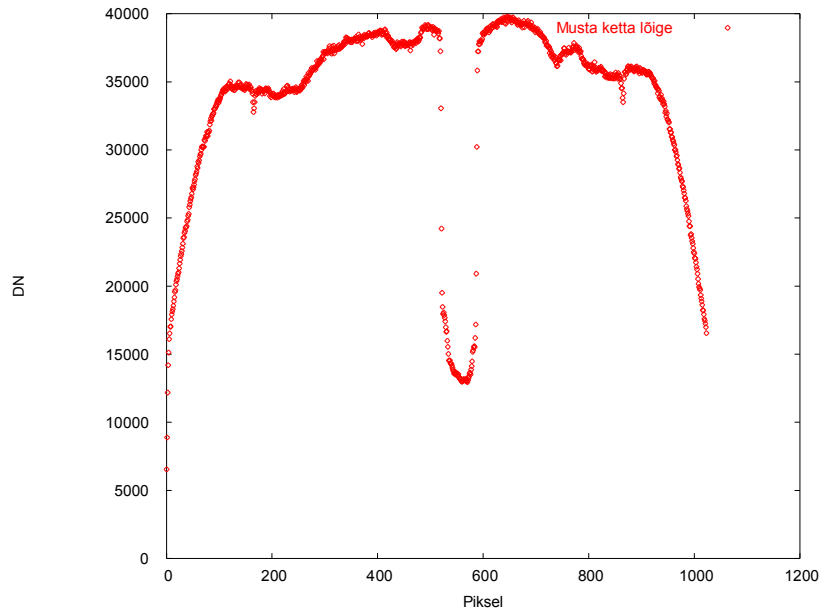
Hele taust tekitatakse 1 m diameetriga integreerivas sfääris. Musta ketta moodustab õõnes must keha, mis on seest kaetud sametiga. Õõnsus välistab ühekordsed peegeldumised ja seega on peegeldumiskoeffitsient kindlasti alla 1%. Joonisel 22 on mõõdetud pilt, joonisel 23 aga lõige läbi musta ketta keskpunkti. Näha on, et musta ketta kujutis on täidetud kiirgusega, mis pärineb ilmselt muudest vaatesuundadest. Pildidel on vinjeteerimine korrigeerimata, selle tõttu on suurte polaarnurkade juures heledus väiksem.



Joonis 21. CCD-radiomeeter koos "musta kettaga"



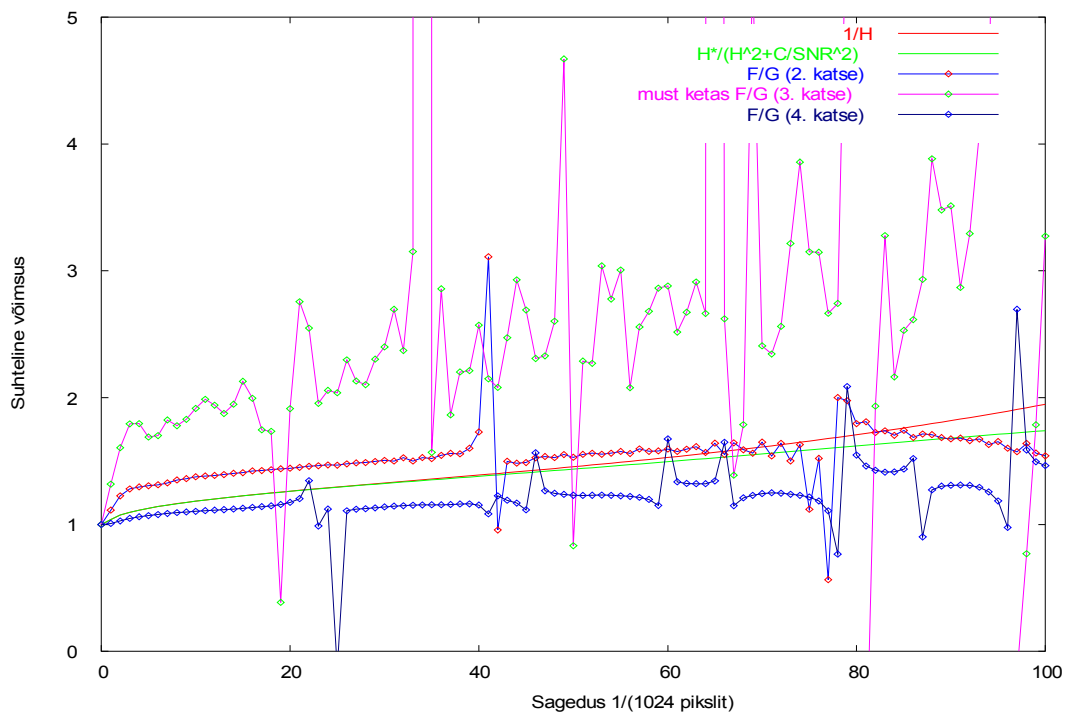
Joonis 22. Must ketas valgel taustal, vinjeteerimine korrigeerimata



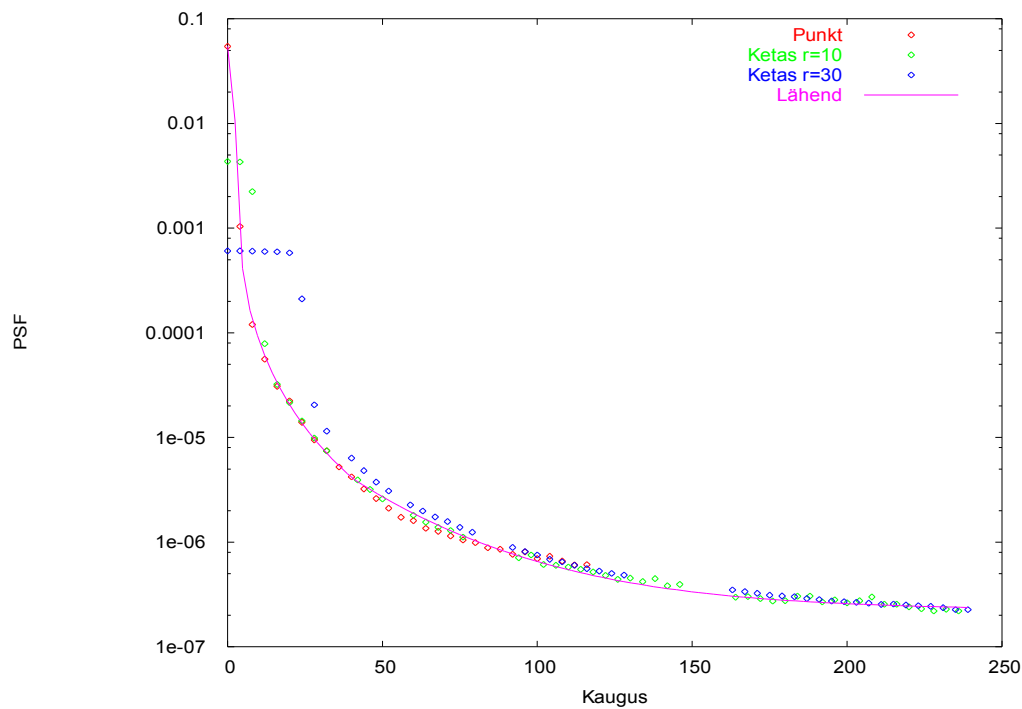
Joonis 23. Musta ketta pildi lõige, korrigeerimata

5.2.4 Impulsskoste kokkuvõte

Tuleb välja, et kaudsel meetodil, pildi ja mudelpildi spektrite jagatisena, ei saa PSF kuju väga täpselt määrata. Jooniselt 24 on näha, et spektrite suhe ei koonu erinevate eksperimentide korral ühiseks süsteemi iseloomustavaks funktsiooniks. Perioodilised piigid spektrite jagatistes tulenevad kastifunktsioonile Fourier' ruumis vastava $\text{sinc}(\omega)$ funktsiooni nullpunktides tekkivast null/null määramatusest. Mida laiem on faasiruumis kastifunktsioon, seda lühema perioodiga on selle Fourier' pööre: $r_2 < r_3 < r_4 \Rightarrow \omega_2 > \omega_3 > \omega_4$, kus alaindeks tähistab katse numbrit, r ketta raadiust ja ω sagedusruumis nullkohtade vahelist kaugust.



Joonis 24. Filtri tuletamine mudelpildi ja mõõdetud pildi spektrite jagamise abil. F – originaalpildi spekter, G – mõõdetud pildi spekter, H – sageduskoste, mis vastab faasiruumis lähendatud impulsskoste.



Joonis 25. PSF graafiline leidmine punkti ja kahe raadiusega ketaste piltide abil. Lähendamisel on kasutatud punktallika pilti, kui $r < 40$ ja ketaste pilte, kui $40 < r < 240$

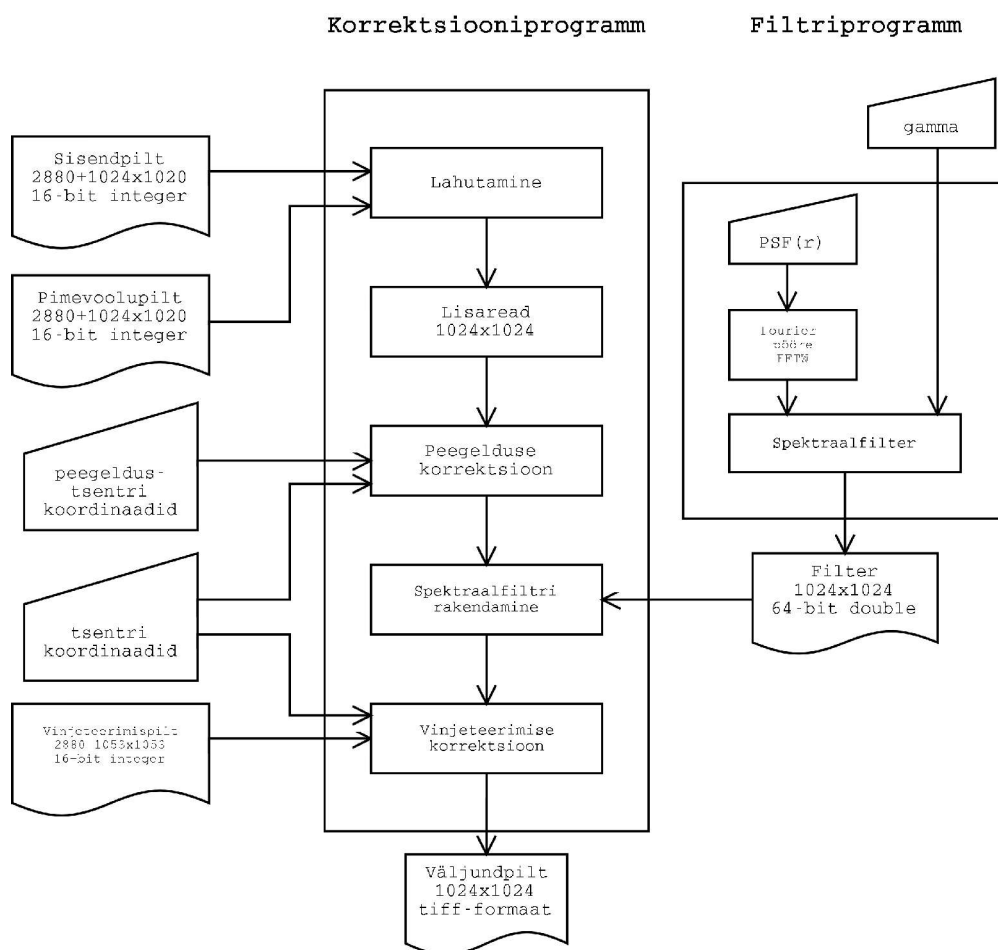
Parima antud tingimustel määratava PSF-i saame, kui kasutame väikeste raadiuste korral punktvalgusallika pilti ja suurema raadiuse korral erineva suurusega ketaste pilte. Jooniselt 18 näeme et punktallika hajumise pildilt ei saa me PSF- i hinnata kaugemal kui 30 ... 40 piksli raadiuses. Ketta pildi (joonis 25) juures on selline kaugus jällegi kriitiliselt lähedal — mõju hakkab avaldama ketta kuju. PSF käitumist suurte kauguste korral on selle meetodiga raske hinnata — nullnivoo määramise täpsus mõjutab väga väikese PSF väärtuse täpsust. Nagu allpool selgub (ptk 7.1), on PSF-i väärtustel suurte kauguste juures väga suur tähtsus heledal foonil olevate tumedate objektide korrigeerimisel. Joonisel 25 on toodud kombineeritult punktvalgusallika ja kahe raadiusega ketta üle asimuudi keskmistatud mõõtmistulemused, ning nende põhjal lähendatud PSF (valem 13). Mõõtetulemused on skaleeritud niiviisi, et lähend oleks normeeritud (valem 14).

$$\text{PSF}(r) = \begin{cases} 0 \leq r \leq 10 & : & 0.0516 \cdot \exp(-0.311 \cdot r^{1.9}) + \\ & + 0.00304 \cdot \exp(-0.892 \cdot r^{0.6}) \\ 10 < r \leq 40 & : & 0.0235 \cdot \exp(-1.67 \cdot r^{0.296}) / r \\ 40 < r & : & 2.22 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(-0.689 \cdot r^{0.477}) / r^{-0.6} \\ & & + 2.202 \cdot 10^{-7} \end{cases} \quad (13)$$

$$\sum_x \sum_y \text{PSF}(x, y) = 1 \quad (14)$$

6 KORREKTSIOONIALGORITM

Joonisel 26 on toodud korrektsioonialgoritmi põhimõtteline blokk skeem. Korrektsiooniprogramm kasutab sisendfaili, milles on igal real ühe töödeldava sisendpildi info: failinimi, tsentri koordinaadid, peegelduspunkti nihe tsentrist, pimevoolupildi faili nimi ja kasutatud interferentsfilter (korrektsiooniprogramm valib selle põhjal õige vinjeteerimispidi). Lisaks vajab programm eelnevalt valmistehtud spektraalfiltrit, mis tekitatakse eraldi filtri programmiga PSF-i ja gamma etteandmisel. PSF-i avaldis on kirjutatud filtri programmi lähtekoodi, seega tuleb PSF-i muutmisel filtri programm uuesti kompileerida. Kõik FFT operatsioonid spektraalfiltri loomisel ja rakendamisel tehakse FFTW teegi [9] vahendusel.



Joonis 26. Korrektsioonialgoritmi blokk skeem

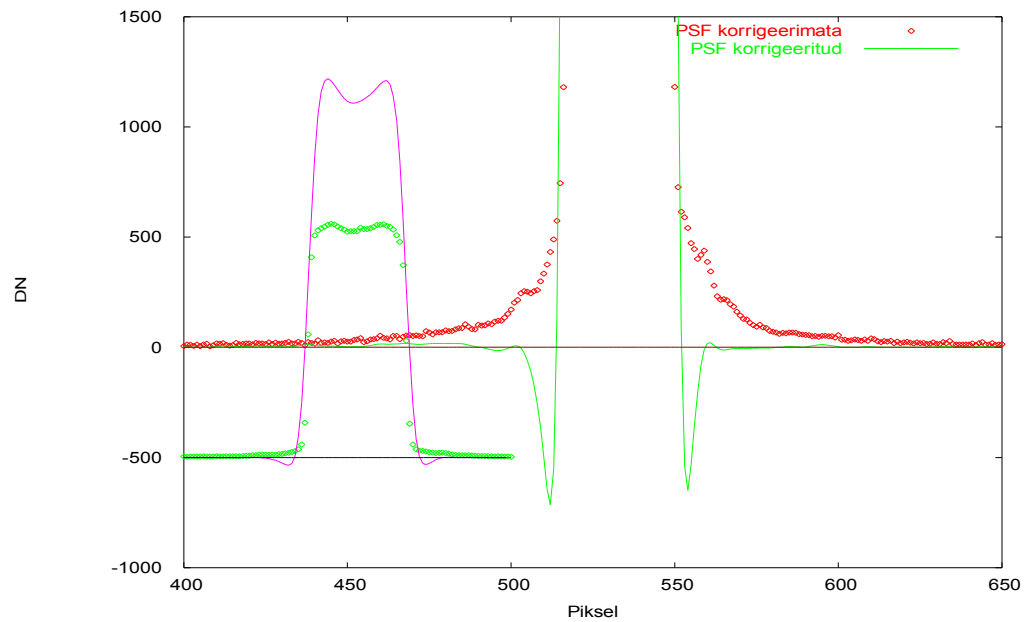
7 TULEMUSED

7.1 *Mudelpiltide korrigeerimine*

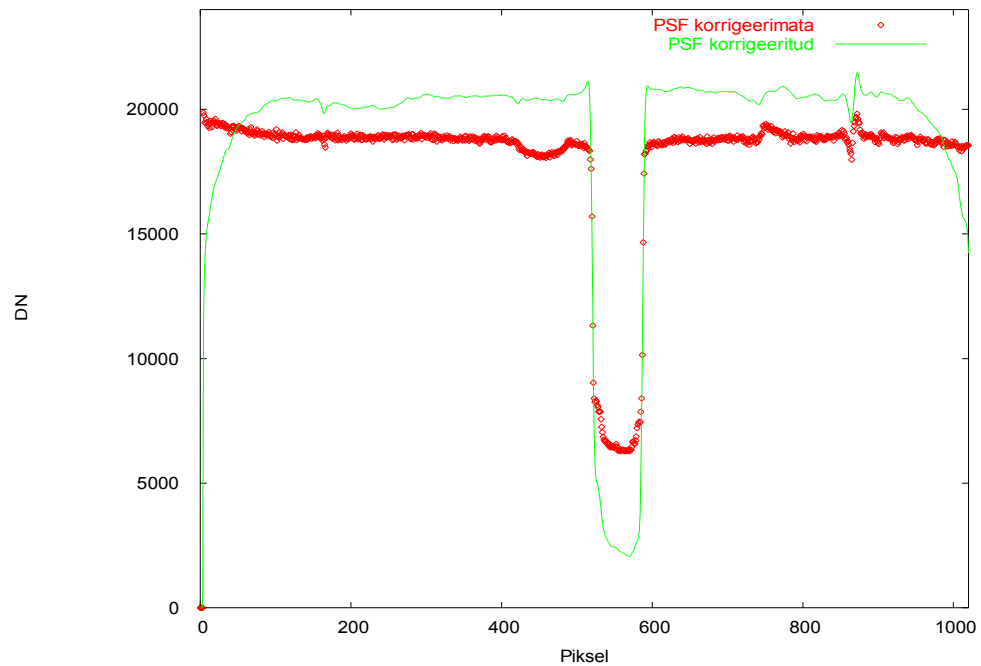
Esimene kontroll tuletatud impulsskoste korrektsioonile on proovida korrigeerida mudelpilte. Joonisel 27 oleval valge ketta lõikel enne ja pärast PSF-korrektsiooni on näha, et kontrastsete kontuuride lähedale tekivad filtreerimisel kuni 10 piksli laiused ja kuni 2% sügavused võnked. Filtri koostamisel on kasutatud mürakoeffitsienti $\gamma = 100$. Mida väiksem γ , seda kitsamad ja kõrgemad on võnked järskude üleminekute servadel. Näiteks mürakoeffitsiendi $\gamma = 10$ korral oleksid moonutused 5% sügavused ja 7 pikslit laiad. Kaugusel 10 ... 50 pikslit parandab korrektsioon aga oluliselt pilti. All vasakul väikesel graafikul on kujutatud sama lõige $20\times$ väiksemas skaalas. Korrigeeritud ketta heledus sõltub oluliselt valitud PSF-i väärtustest suurte kauguste juures — korrektsiooni käigus koondatakse eeldatavalt laiale pinnale hajunud foonkiirgus heledatele objektidele tagasi. Kui valgusallika ja tausta heledused oleksid kalibreeritavad (näiteks 100% peegelduskoeffitsiendiga valge ketas 50% peegelduskoeffitsiendiga hallil taustal), siis oleks võimalik korrigeeritud pildi järgi määrata PSF-i väärtust suurte kauguste korral.

Joonisel 28 oleval musta ketta korrektsiooni pildil on muu hulgas näha peatükis 3.4 esitatud meetodil peegelduse korrektsiooni efektiivsus (pikslid 420 ... 480). Musta augu tegelik intensiivsus ei saa madala peegeldumiskoeffitsiendi tõttu suur olla, otsene kiirgus musta augu põhja ei jõua, kuna see varjatakse radiomeetri poolt. Mitmekordsete peegelduste tõttu peaks musta augu peegeldustegur olema $<1\%$. Kahjuks ei taasta korrektsioon musta auku täielikult — algsest heledusest 30% platoo tasemest on pärast korrektsiooni endiselt alles ca 10% platoo tasemest. Kuusnurksel peegeldusefektil (5.2.1) on ilmselt oma osa musta augu täitmisel, kuid arvutuse järgi saab see olla vaid kuni 1.4% platoo signaalist. Platoo kasv korrektsiooni käigus on ilmselt tingitud PSF-i liiga aeglasest kahanemisest suurte kauguste korral, kaugetele ärahajunud kiirgus koondatakse tagasi heledatele objektidele, antud juhul platoole. Mingil määral on see ka õigustatud — objektiivis hajub osa valgust nii, et see ei jõuagi CCD-sensorile, vaid

ümbritsevatele seintele. PSF-i määramise täpsus (eriti suurte raadiuste korral) mängib seega väga tähtsat rolli pildi kontrastsuse taastamisel.



Joonis 27. Impulsskoste korrektsiooni mõju 2. eksperimendi valge ketta pildile



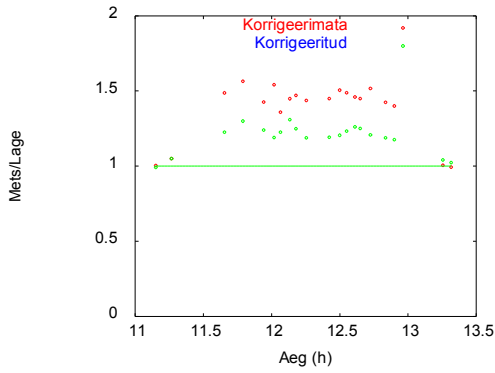
Joonis 28. Impulsskoste korrektsiooni mõju 3. eksperimendi musta ketta pildile

7.2 Mõõteseeriade korrigeerimine

Joonistel 29 ja 30 on toodud korrektsiooni mõju Järvelja 1999/141 mõõteseeria infrapunase filtriga tehtud piltidele. Selle seeria piltidel on männimetsale iseloomulik võrade jaotus, kus võradevahelised augud on suhteliselt ühtlase suurusega. Peaaegu igalt pildilt on võimalik leida auke diameetriga ca 40 pikslit ja ca 20 pikslit. Metsapildil seniidi lähedalt valitud võradevahelise taevaala keskkohast 11×11 piksli suurusest mõõteaknast loetud summaarset signaali võrreldakse sama vaatesuuna signaaliga lagedapildilt. Summaarne kiirgus muutub päeva jooksul, sõltudes päikese kõrgusest. Ennelõunase seeria lõpus tehtud lagedapildid on seega heledamad kui seeria alguse omad. Lagedapildi interpoleerimiseks suvalisele ajahetkele korrutatakse seeria alguse lagedapilti ajalise käigu parandiga, mis saadakse esimese ja viimase lagedapildi seniidi lähedalt võetud lugemite lineaarse interpoleerimise abil. Taeva heleduse ajaline käik loetakse lineaarseks ja vaatesuunast sõltumatuks. Metsapildil võradevahelise taeva vaatesuunalt leitud heleduse suhe interpoleeritud lagedapildi vastava vaatesuuna heledusse peaks ideaalse instrumendi korral olema võrdne ühega. Joonistelt 29 ja 30 nähtuvalt on korrigeerimata metsapiltidel tumeda taeva lugem ümbritsevate heledate võrade tõttu 40% ... 50% kõrgem kui lagedapildil vastavas suunas. Seejuures väikeste aukude korral (joonis 30) on viga veidi suurem. Korrektsioonimeetodi rakendamisel väheneb viga 20% ... 30%-ni. Punase filtriga mõõteseeria korral (joonis 31) on samuti näha ümbrusest tingitud heleduse muutumise efekt ja korrektsiooni mõju. Kui infrapunases lainealas jääb pilt alakorrigeerituks, siis punases lainealas on tegu ülekorrigeerimisega.

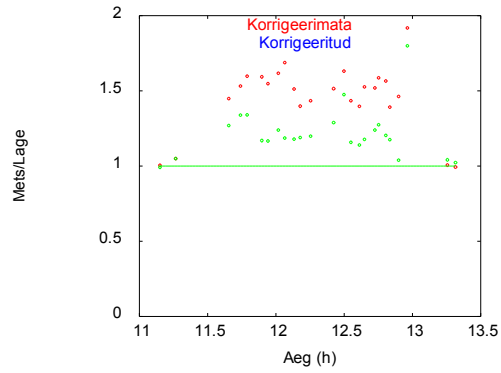
Joonistel 32 ja 33 on toodud Flakalideni 2000/161_1 mõõteseeria töötlemise tulemused. Flakalidenis oli tegu tiheda kuusikuga. Kuuse peaaegu maapinnani ulatuva tiheda võra tõttu jagunesid taeva nähtavust arvestades pildid kaheks: kui CCD-radiomeeter asetses võra sees (või all), siis oli kogu pilt täidetud okstega ja mõnest üksikust kohast paistis väike osa taevast; kui aga võrade vahel, siis jäi seniidi suunda suur (diameeter > 100 pikslit) taevaala. Joonistelt nähtuvalt ei sõltu korrektsiooni headus taevaala suurusest — kõik pildid infrapunases lainealas on rohkemal või vähemal määral õiges suunas korrigeeritud. Punases lainealas võib

tähdeldada mõnede piltide puhul ülekorrigeerimist.



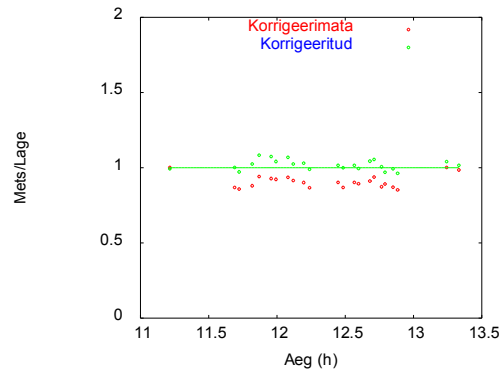
Joonis 29. Korrektsiooni mõju aukudele

($d \sim 40$), Järvselja 1999/141, infrapunane filter.



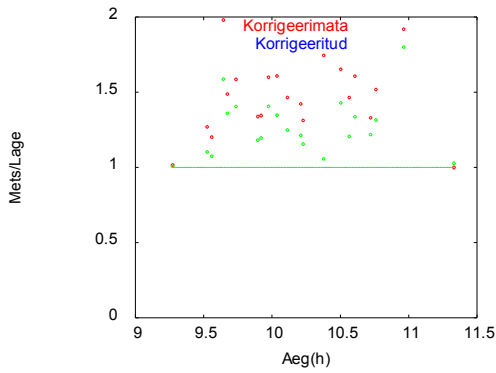
Joonis 30. Korrektsiooni mõju aukudele

($d \sim 20$), Järvselja 1999/141, infrapunane filter.



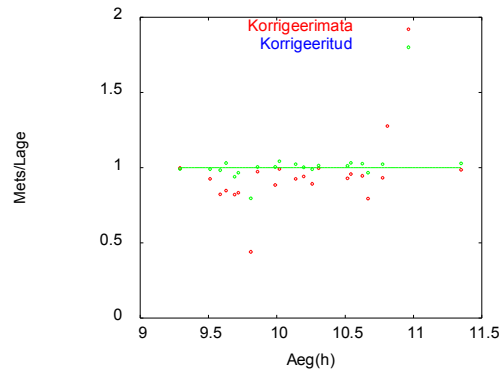
Joonis 31. Korrektsiooni mõju aukudele

($d \sim 20$), Järvselja 1999/141, punane filter.



Joonis 32. Korrektsiooni mõju aukudele,

Flakaliden 2000/161_1, infrapunane filter.



Joonis 33. Korrektsiooni mõju aukudele,

Flakaliden 2000/161_1, punane filter.

7.3 Etalonplaadi piltide korrektsioon

Tõraverse energiavõlas 29.07.2003 teostatud mõõtmiste piltidelt leitud difuusse ja summaarse kiirguse suhted enne ja pärast korrektsiooni on toodud tabelis 3. Sama päeva päikesefotomeetri andmeid kasutades annab atmosfäärikorrektsiooni pakett 6S difuusse ja summaarse kiirguse suhteks infrapunases lainelas 0,12 ja 0,19 vastavalt kontinentaalse ja merelise aerosooli jaoks. Tabelist on näha, et pilt on tugevasti ülekorrigeeritud — difuusse kiirguse mõõtmiseks varjuga kaetud ekraan on muutunud liiga tumedaks. Korrigeeritud piltidelt leitud suhe 0,03 ei mahu päikesefotomeetri abil hinnatud vahemikku. Kuna üle terve pildi (vt joonised 11 ja 12) on palju heledaid objekte, siis võib kahtlustada PSF väikest ebatäpsust suurte kauguste korral, sel juhul mõjutavad kontrastseid alasid ka kaugelasuvad objektid. Punases lainelas annab 6S suhteks 0,14 ja 0,185 vastavalt kontinentaalse ja merelise aerosooli jaoks. Korrigeeritud piltidelt leitud suhe 0,15 jääb sellesse vahemikku. Punases lainelas tehtud pilt ei ole nii tundlik korrektsioonile, sest puuvõrad on klorofüllü aktiivse neelamise tõttu suhteliselt tumedad ja seega ei teki nii suurt kontrasti varjusoleva etalonplaadi suhtes.

		Summaarne	Difuusne	Difuusene / Summaarne
enne	NIR	8161.82	3344.80	0.41
	RED	16700.59	3352.93	0.2
pärast	NIR	4012.08	134.57	0.03
	RED	13202.59	2038.93	0.15

Tabel 3. Difuusse ja summaarse kiirguse suhe enne ja pärast korrektsiooni

KOKKUVÕTE

Töös on käsitletud metsa kiirgusrežiimi uurimiseks kasutatava poolsfäärilise vaateväljaga kalasilm-objektiiviga varustatud CCD-radiomeetri mõõtetulemuste interpreteerimise probleeme. Kirjeldatud on digitaalpiltide töötlemise etapid alates elementaarsematest: pimevoolu lahutamisest, kaadri tsentri leidmisest ja vinjeteerimise korrigeerimisest; ning lõpetades peegelkujutiste kompenseerimise ja dekonvolueerimisega (impulsskoste korrigeerimisega). Dekonvolueerimise jaoks on kriitilise tähtsusega süsteemi impulsskoste täpne määramine — juba väike erinevus impulsskoste foonis põhjustab töödeldud pildil suurt kontrastsuse erinevust. Teostatud eksperimendid ei ole piisavad parima impulsskoste lähendi leidmiseks. Täiendavad eksperimendid peaksid lähtuma kalibreeritava kontrastsusega objektide mõõtmisest. Magistritöös kasutatud meetodid ja programmsed vahendid on vajalikud pilditöötamiseks nii CCD-radiomeetri praeguses konfiguratsioonis kui ka tulevikus teoks saava optika vahetuse korral.

KIRJANDUS

- 1: Kuusk, A., Nilson, T., Paas, M., Angular distribution of radiation beneath forest canopies using CCD-radiometer, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, **110**, 4, 259-273
- 2: Paas, M., Metsa kiirgusrežiimi uurimine CCD-radiomeetriga, mõõtmisandmete töötlus, Bakalaureusetöö, 2001
- 3: CCD Camera Operating Manual for the Model ST-7 and ST-8, Santa Barbata Instrument Group, 1994
- 4: KAF-1600 Performance Specification, Eastman Kodak Company, Microelectronic Technology Division, 1998
[www.astrosurf.com/audine/pdf/kaf1600.pdf]
- 5: Du, H., Voss, K. J., Effects of point-spread function on calibration and radiometric accuracy of ccd camera, *Applied Optics*, 2004, **43**, 3, 665-670
- 6: Gonzales R. C., Wintz P. A., *Digital image processing*, Addison Wesley, 1987, 229-231
- 7: Pratt W. K., *Digital image processing*, Wiley, 1991, 354-359
- 8: Pro-Lite Technology LLP, Uniform Light Sources for calibrating CCD imagers and general purpose uniform illumination, 2004, [http://www.pro-lite.uk.com/Light/Labsphere/uniform_sources.html]
- 9: Frigo M, Johnson G S, FFTW: An adaptive software architecture for the FFT, Proc. 1998 IEEE Intl. Conf. Acoustics Speech and Signal Processing, 1998, 1381-1384

ABSTRACT

This thesis discusses problems of interpreting measurement results of a CCD-radiometer equipped with fish-eye hemispheric lens. CCD-radiometer is mainly used for studying radiative transfer in forests. Detailed description of image processing is provided starting from the basic operations: subtracting dark current, locating image center, correction of vignetting; continuing more developed operations: compensating reflection and deconvolution (point spread function (PSF) correction). The critical factor for deconvolution is determining PSF of the system — even small changes in PSF background affect the contrast of restored image. Lead-through experiments for measuring PSF did not provide information about the distant background signal with satisfactory precision. Additional experiments for PSF measuring should be based on light sources with calibrated luminosity. Methods and computer programs used in the thesis will be helpful for processing images recorded using current CCD-radiometer configuration as well as future configurations (lens changes) and similar instruments.