

TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Füüsika instituut

Hans Hubert Sams

**HAJUSVALGUSE KARAKTERISEERIMINE JA OPTILISE
VARJUKI DISAIN MINIATUURSE MAAVAATLUSKAAMERA
JAOKS**

Bakalaureusetöö (6 EAP)
Füüsia, keemia ja materjaliteadus

Juhendaja:
Tõnis Eenmäe, Msc

Tartu 2020

Hajusvalguse karakteriseerimine ja optilise varjuki disain miniatuurse maavaatluskaamera jaoks

Käesolev töö on osa suuremast projektist, mille eesmärk on kavandada ja valmistada miniatuurne radiomeetriliselt kalibreeritav maavaatluskaamera, millega oleks võimalik sooritada teaduslikult kasulikke mõõtmisi. Selle eesmärgi saavutamiseks on vaja maavaatluskaameraga saada võimalikult kõrge signaal-müra suhe. Töös uuriti hajusvalguse panust signaal-müra suhtele ja töötati välja optiliste varjukite ja pinnakatete süsteem, millega oleks võimalik hajusvalgust vähendada. Uurimismeetod põhineb valguse leviku simuleerimisel maavaatluskaamera 3D-mudelil. Simulatsioonides uuriti eraldi erinevaid hajusvalguse allikaid kaameras, milleks on peeglitelt ja mitteoptilistelt pindadelt hajumine, klaaselementidelt peegeldumine ja pilvede ning Päikese mõju mõõtmistulemustele. Analüüsist selgus, et maavaatluskaamera kõige realistlikumate parameetritega on võimalik saavutada nõuetekohane signaal-müra suhe.

Märksõnad: hajusvalgus, hajuvalgus, maavaatluskaamera, kaugseire
CERCS: T320 — Kosmosetehnoloogia

Stray light characterization and optical baffle design for a miniature Earth observation imager

This thesis is part of a project which aims to design and manufacture a radiometrically calibrated scientific grade miniature Earth observation imager. Stray light can be a major contributor to the signal-to-noise ratio and this thesis aims to characterise stray light in the imager. In addition a system of optical baffles is designed to limit the amount of stray light. Since the imager is still in development phase all of the analysis is done via computer simulations which simulate the interaction of light rays with a 3D model of the imager. The main interests in the simulations were the scattering of light from mirrors and non-optical surfaces, ghosting from glass optical elements and how clouds and the Sun affect the measurements. The results show that with the most realistic parameters it is possible to achieve the required signal-to-noise ratio.

Keywords: stray light, scattering, earth observation, remote sensing
CERCS: T320 — Space technology

Sisukord

Sissejuhatus	4
1 Hajusvalguse olemus	6
1.1 Hajuvalguse tekke matemaatiline kirjeldamine	6
1.1.1 Pinnakaredusest tingitud hajumine	7
1.1.2 Pinna saastatusest tingitud hajumine	10
1.2 Hajusvalguse vähendamise põhimõtted	11
1.3 Hajusvalguse analüüsimine	13
2 Metoodika	15
2.1 Maavaatluskaamera nõuded ja optiline disain	15
2.2 Peegli pindade hajumisfunktsiooni tuletamine	16
2.3 Optiliste varjukite süsteem	18
2.4 Valguse leviku simuleerimine	20
3 Hajusvalguse simulatsioonide tulemused ja järeldused	22
3.1 Vaatevälja väline hajusvalgus	22
3.2 Vaateväljasisene hajusvalgus	24
3.3 Signaal-müra suhte hinnang	27
Kokkuvõte	29
Tänuavaldused	30
Kirjandus	31
Lihtlitsents	35

Sissejuhatus

Iga aastaga muutub kosmos üha enam kättesaadavamaks inimkonnale. Prominentseks on kujunenud kuup- ja nanosatelliitide arendamine, millega tegelevad peamiselt tudengite töörühmad erinevates ülikoolides üle maailma (ESTCube [1], AAU CubeSat [2], QuakeSat [3] jt).[4] Põhiliselt on kuup- ja nanosatelliitide arendamisel hariduslik või tehnoloogia demonstreerimise eesmärk nende kompaktsuse ja odavuse tõttu [5].

Maa kaugseireks kasutatakse enamasti massiivseid mitmeinstrumentilisi satelliite, mis suudavad täita mitmeid ülesandeid iseseisvalt (Sentinel-2 [6], EnviSat [7], UARS [8] jt) ja toota kvantitatiivseteks kaugseire uuringuteks kasulikke mõõtmistulemusi. Selliste kaugseire satelliitide miinuseks on kõrged arendamis- ja tootmiskulud. Kuigi kuupsatellidid jäävad eelnimetatud satelliitidele alla funktsionaalsuses ja mõõtmiste kvaliteedis, on sellegipoolest neil potentsiaali pakkuda teaduslikult kasulikke mõõtmistulemusi. Kasutades mitmetest kuupsatelliitidest koosnevaid parvesid, on võimalik jagada ülesandeid erinevatele satelliitidele, saavutades seda palju väiksemate kuludega kui massiivsed mitmeinstrumentilised satelliidid. [5]

Käesolev töö on valminud Euroopa Kosmoseagentuuri ja Tartu Observatooriumi koostööprojekti raames, mille eesmärgiks on kavandada ja valmistada miniatuurne multispektraalne kaamera Maa kaugseireks. Maavaatluskaamera peab olema suuteline tootma teaduslikult kasulikke mõõtmisi ja mahtuma ühe kuupsatelliidi ühiku sisse (10 cm × 10 cm × 10 cm) [9]. Maavaatluskaamerale lisatakse juurde ka kalibratsioonimoodul, millega on orbiidil võimalik pildisensoreid regulaarselt kalibreerida. Mõõtmisi hakkab maavaatluskaamera tegema kahes spektraalkanal, mis vastavad Euroopa Kosmoseagentuuri kaugseiresatelliidi Sentinel 2 kanalitele 4 (punane) ja 8a (lähisinfrapunane) [10]. Projektis on maavaatluskaamera seatud 5 %-line radiomeetrilise täpsuse nõue, mille saavutamiseks peaks signaal-müra suhe olema vähemalt 50 [11]. Üks faktor, mis mõjutab radiomeetrilise mõõteseadme signaal-müra suhet, on hajusvalgus. Hajusvalguseks nimetatakse igasugust ebavajalikku valgus optilise süsteemi fokaaltasandil. Veendumaks, et maavaatluskaameraga on üldse võimalik saavutada nõuetekohast signaal-müra suhet, tuleb seda juba varakult arendamisejärgus karakteriseerida ja analüüsida. Sellest tulenevalt seati käesolevale tööle järgmised eesmärgid:

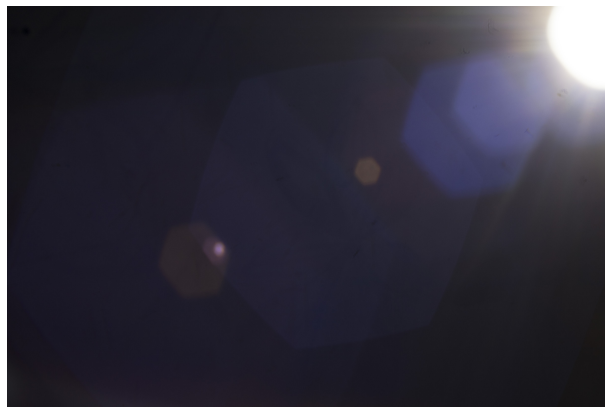
- 1) tuvastada ja karakteriseerida hajusvalguse allikad maavaatluskaameras,

- 2) kavandada maavaatluskaamerale optiliste varjukite süsteem hajusvalguse vähendamiseks,
- 3) hinnata maavaatluskaamera signaal-müra suhet võttes arvesse kogu hajusvalgust.

Töö eesmärkide saavutamiseks kasutatakse raalprojekteerimist ja valguse leviku simuleermist maavaatluskaamera 3D-mudelil.

1. Hajusvalguse olemus

Hajusvalguseks (ingl *stray light*) nimetatakse ebavajalikku valgust optilise süsteemi fokaal-
tasandil (vt joonis 1.1). Üldiselt on hajusvalguse tekke põhjusteks optilise süsteemi korpuse
sisepindadelt hajumine, optiliste elementide ebatäpsused (pinnakaredus, saastatus) ning peegel-
dused klaasist elementidelt (ingl *ghosting*). Kõigis mõõtmistes vähendab igasugune valgusreostus
signaal-müra suhet ning seetõttu on tarvis hajusvalgust vähendada ja analüüsida optilise süsteemi
kvaliteedi hindamiseks.[12, lk 1]



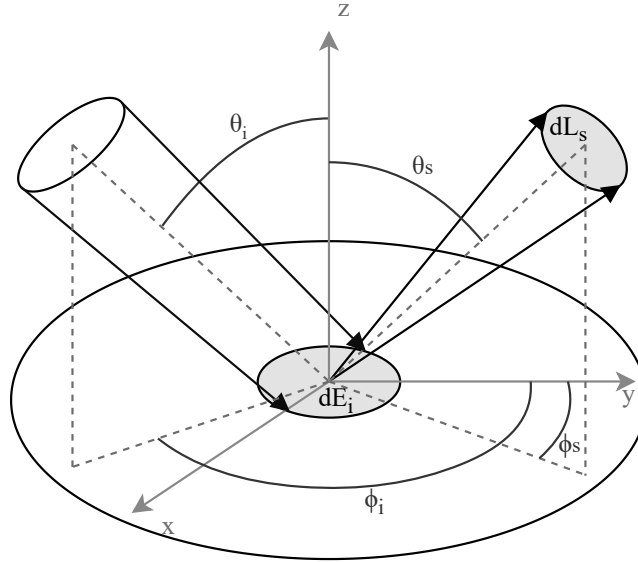
Joonis 1.1. Vaatevälja ääres oleva tugeva valgusallika poolt põhjustatud hajusvalgus fotokaame-
ra pildisensoril. Fotoobjektiivi ava kuusnurkseid kujutisi tekitab läätsedelt peegeldunud valgus
ja kuma tekitab pindadelt hajunud valgus.

1.1 Hajusvalguse tekke matemaatiline kirjeldamine

Valguse interaktsioon igasuguse reaalse pinnaga põhjustab mingisuguse hajumise [13, lk 2].
Pindadelt hajumise kirjeldamiseks kasutatakse kahesuunalist hajupeegelduste jaotusfunktsiooni
(BRDF - ingl *bidirectional reflectance distribution function*). BRDF on fundamentaalne suu-
rus, millega saab geomeetriliselt kirjeldada kiirguse hajumist mingisuguselt diferentsiaalselt
pinnaelemendilt (vt joonis 1.2). Matemaatiliselt on see defineeritud kujul [14]

$$BRDF(\theta_i, \phi_i; \theta_s, \phi_s) = \frac{dL_s(\theta_s, \phi_s)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)}, \quad (1.1)$$

kus $dL_s(\theta_s, \phi_s)$ on diferentsiaalne peegeldunud kirkus, $dE_i(\theta_i, \phi_i)$ on diferentsiaalne pinnale langev kiirgustihedus, θ on polaarnurk, ϕ on asimuut ja alaindeksid i ning s tähistavad vastavalt pealelangevat ja hajunud kiirgust. BRDF kirjeldab, kui suur osa valguse intensiivsusest peegeldub mingisse ruuminurka ehk ühikuks on sr^{-1} .



Joonis 1.2. Illustratsioon BRDF-st, kus langemisnurka θ_i ja asimuudiga ϕ_i langeb pinnale kiirtekimp kiirgustihedusega dE_i . Seejärel toimub pinnalt hajumine nurga θ_s ja asimuudi ϕ_s suunas, mille kirkus on dL_s .

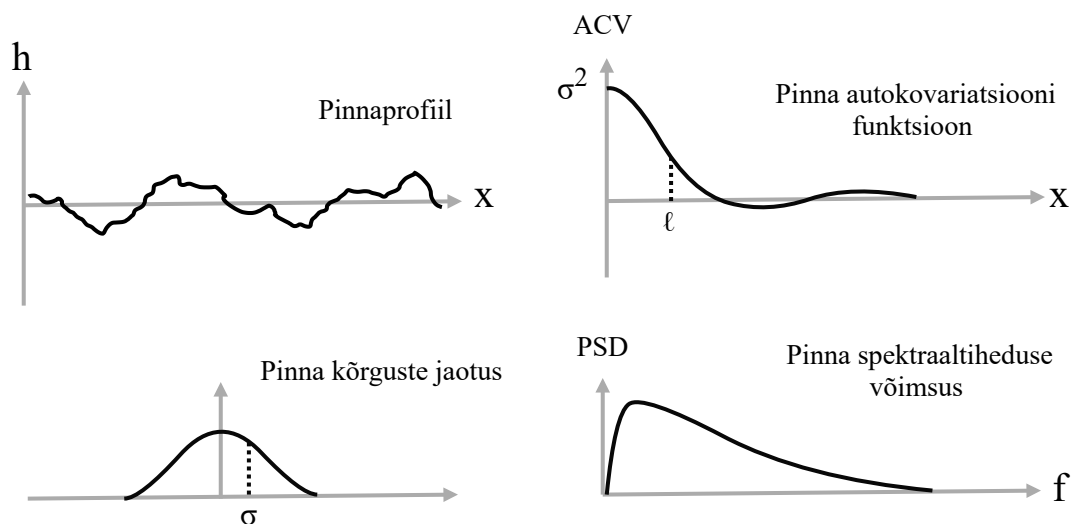
1.1.1 Pinnakaredusest tingitud hajumine

Pinnakaredus on omane kõikidele pindadele. Ka kõige kõrgema kvaliteediga optiliste elementide pinnad ei ole ideaalselt siledad ja põhjustavad pealelangeva kiirguse hajumist. [15, lk 9] Hajumise käitumist dikteerivad pinda kirjeldavad statistilised parameetrid (vt joonis 1.3). Optiliselt pinnalt hajumine vähendab kujutise kontrastsust, fokaaltasandile jõudvat kiirgusvoogu ja põhjustab kujutise hägusust [15, lk 15]. Seesugune hajumine on sisuliselt difraktsioonist tingitud nähtus, mille korral omandab peegelduv laine front suvalised faasi erinevused [15, lk 49]. Pinnalt peegelduv kiirgus koosneb peegel- ja hajupeegelduse komponentidest. Siledade pindade jaoks saab hajupeegelduse komponendi (R_s) leida seosega [16]

$$R_s = \frac{R_i - R_0}{R_i} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{4\pi\sigma \cos \theta_i}{\lambda} \right)^2 \right], \quad (1.2)$$

kus R_s on hajupeegelduvus, R_0 on peegelpeegelduvus, R_i on kogupeegelduvus, θ_i on langemisnurk, σ on pinnakareduse ruutkeskmine hälve (vt joonis 1.3) ja λ on pealelangeva valguse

lainepikkus. Sileda pinna kriteerium tähendab, et $\sigma \ll \lambda$. Seejuures tuleb aga arvestada sellega, et hajumisele ei panusta pinna ruumilised sagedused, mis on kõrgemad kui $1/\lambda$, mis tähendab, et σ leidmisel peab arvestama ainult hajumisele relevantse pinnakaredusega [17]. Suuruse R_s abil saab hinnata, kui suur hulk kiirgust hajub ja seda kasutatakse näiteks pinnakareduse ruutkeskmise hälbe mõõtmiseks [16]. Täpseks hajuvõime ennustuseks oleks vaja teada ka hajumise ruumilist jaotust ehk BRDF-i.



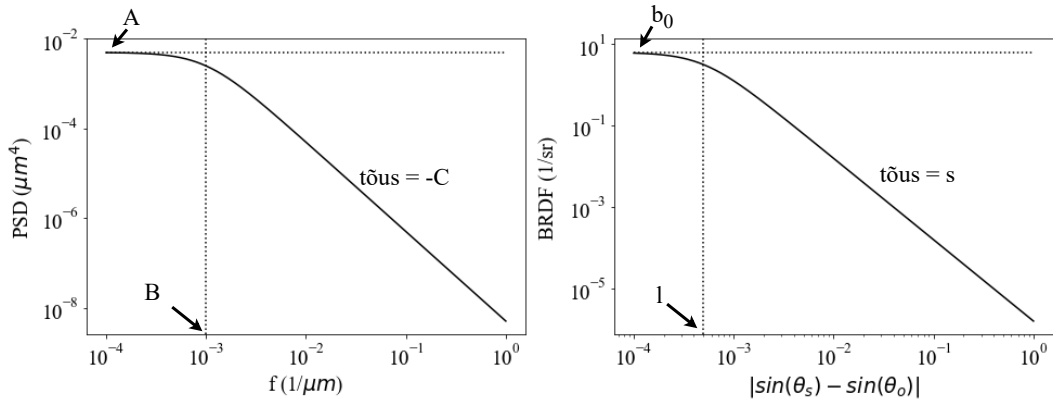
Joonis 1.3. Illustratsioon pinda kirjeldavatest statistilistes parameetritest ja funktsioonidest. Joonis on adapteeritud viitest [15, lk 11]

Tänapäeval kasutatakse pinnakareduselt hajumise ruumiliseks kirjeldamiseks põhiliselt Harvey-Shack'i [18] teooriat, mis põhineb Rayleigh-Rice [19] ja Beckmann-Kirchhoff'i [20] teooriatel. Üldiselt tuleb hajumise täpseks ennustamiseks mõõta pinna spektraaltiheduse võimsus (PSD - ingl *power spectral density*), mis on pinnaprofiili Fourier' teisenduse mooduli ruut. Pinna PSD funktsiooniga saab leida lainepikkusest sõltuva σ väärtuse ja PSD-d ennast saab otseselt kasutada BRDF-i tuletamiseks. Nimelt siledate pindade puhul saab pinna PSD-d hästi lähendada K-korrelatsiooni mudeliga, mis on defineeritud kujul [21]

$$PSD(f) = A [1 + (Bf)^2]^{-C/2}. \quad (1.3)$$

Selle mudeliga saab ainult kolme parameetriga - A, B ja C (vt joonis 1.4) täielikult kirjeldada pinnakaredust, mis teeb selle arvutuslikult väga lihtsaks.

Olles K-korrelatsiooni mudelit lähendanud pinna PSD-ga, saab selle kolm parameetrit seada vastavusse Harvey-Shack'i mudeliga ja leida pinna BRDF (vt joonis 1.4). Harvey-Shack'i mudel



Joonis 1.4. Illustratsioon K -korrelatsiooni mudeli parameetritest pinna PSD kirjeldamiseks (vasakul) ja sellele vastav BRDF koos Harvey-Shack'i mudeli parameetritega (paremal). Joonisel on kasutatud parameetrite väärtusi: $A = 5 \cdot 10^{-3}$, $B = 1/1 \cdot 10^{-3}$ ja $C = 2$ ning lainepikkus on $0,5 \mu\text{m}$.

on defineeritud kujul [12, lk 65]

$$BRDF(|\sin\theta_s - \sin\theta_i|) = b_0 \left[1 + \left(\frac{|\sin\theta_s - \sin\theta_i|}{l} \right)^2 \right]^{s/2}, \quad (1.4)$$

kus

$$b_0 = \frac{4\pi^2 \Delta n^2 Q A}{\lambda^4}, \quad l = \frac{\lambda}{B}, \quad s = -C.$$

Suurus Δn on murdumisnäitaja erinevus pinna piiril (peegli korral $\Delta n = 2$) ja Q on polarisatsioonist sõltuv pinna peegelduvus. Kõrge peegelduvusega pindade puhul $Q \approx 1$ [15, lk 55].

Tihti peale ei ole võimalik mõõta pinna PSD-d ehk BRDF-i on vaja ennustada. Optilised pinnad on hajumise geomeetria poolest üldiselt väga sarnased. Näiteks on leitud, et C väärtus on üldiselt $1,5 \dots 2,5$ ja B väärtus varieerub vahemikus $100 \dots 500 \mu\text{m}$. A saab leida, kasutades mingisugust ootuspärast σ väärtust. [12, lk 69] Sellest tulenevalt on BRDF-i määramatus umbes 2 suurusjärku. Wein [22], tuginedes Harvey-Shack'i teooriale ja eksperimentaalsetele mõõtmistele leidis, et siledade peeglite BRDF-i saab ennustada empiirilise seosega

$$BRDF = \frac{2}{\pi} \frac{k^4 \sigma^2 l^2}{1 + [kl(\sin(\theta_s) - \sin(\theta_i))]^2}, \quad (1.5)$$

kus k on lainearv ja l on pinna autokorrelatsiooni funktsiooni laius $1/e$ kõrgusel. Tüüpiline l väärtus kvaliteetsete peeglite puhul on $10 \mu\text{m}$.

1.1.2 Pinna saastatusest tingitud hajumine

Pinna saastatus erineb pinnakaredusest selle poolest, et pinnal olevad osakesed on palju suuremad pinnakareduse ruutkeskmisest hällbest. Lisaks saab toimuda kaks peegeldust: osakese pinnalt ning osakest läbides peegli pinnalt. Pinnal olevatelt osakestelt hajumise matemaatiliselt kirjeldamiseks eeldatakse, et osakesed hajutavad valgust Mie hajumisteooria kohaselt, need on kerakujulised ning iga osake on järgmisest osakesest rohkem kui kolme raadiuse kaugusel. Osakest läbinud valgus ei läbi uuesti osakest peegli pinnalt peegeldudes ja nende kahe peegelduse valguse intensiivsused liituvad. Mittepolariseeritud valguse jaoks avaldub see kujul

$$BRDF^{uu}(\theta_s) = \sum_D \frac{f(D)}{k^2 \cos(\theta_s)} \left[\frac{i^s(D, \theta_f) + i^p(D, \theta_f) + i^s(D, \theta_b) + i^s(D, \theta_b)}{2} \right], \quad (1.6)$$

kus θ_s on hajumisnurk, $\theta_f = \theta_s - \theta_i$ (osakest hajuvalt läbinud ja pinnalt peegeldunud valguse nurk), $\theta_b = 180^\circ - \theta_s - \theta_i$ (osakeselt hajunud valguskiire nurk), $f(D)$ on diameetriga D olevate osakeste jaotus, k on lainearv ja i on hajunud valguse intensiivsus, mille ülaindeksid p ja s on vastavalt paralleelselt ja risti polariseeritud valgus langemistasandis.[23] Siinkohal tuleks mainida, et eksperimentaalselt on leitud, et osakeste BRDF on nihkeinvariantne langemisnurga suhtes ehk lihtsuse mõttes saab teha eelduse, et $\theta_i = 0^\circ$ [24].

Osakeste tihedusfunktsiooni leidmiseks on töötatud välja IEST-STD-CC1246 (edasiarendus MIL-STD-1246-st) [25], mis kirjeldab pinna puhtustaset osakeste suuruse ja hulga jaotuse põhjal. Matemaatiliselt avaldub see kujul

$$N(S, CL, D) = 10^{|S|[(\log^2 CL)^2 - (\log D)^2]}, \quad (1.7)$$

kus D on osakese suurus mikromeetrites, CL (ingl *Cleanliness Level*) on pinna puhtustase, N on osakeste hulk $0,1 m^2$ peal, mis on $\geq D$ ja S on jaotuse tõus. [23] Tõusu väärtuseks on eksperimentaalselt leitud puhastatud pinna jaoks -0,926 ja puhastamata pinna jaoks -0.383 [26]. Et osakeste tihedusfunktsiooni rakendada valemis 1.6, tuleb arvestada ainult osakestega, mis on täpselt läbimõõduga D . Täpseks osakeste arvu leidmiseks saab võtta valemist 1.7 tuletise osakeste suuruse järgi [12, lk 82]:

$$\frac{d}{dD} N(S, CL, D) = \left[\frac{2|S|}{D} \log D \right] 10^{|S|[(\log CL)^2 - (\log D)^2]}. \quad (1.8)$$

Pinna puhtustaseme saab tuletada puhasruumi klassi järgi. Puhasruumi klass määrab ära, kui palju on mingi suurusega osakesi ühes kuupmeetrise puhasruumi õhus [27]. Puhtustase avaldub

kujul

$$\log CL = \sqrt{[1,080(\log \rho + \log t + 0,773 \log C - 1,248)]}, \quad (1.9)$$

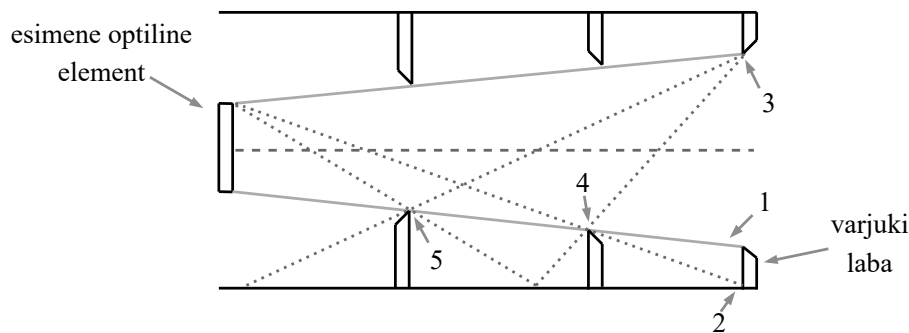
kus $\rho = 2851$ tavapärase puhasruumi jaoks, t on aeg päevades ja C on puhasruumi klass FED STD 209E standardi järgi [24].

1.2 Hajusvalguse vähendamise põhimõtted

Hajusvalguse eemaldamise või kontrollimise puhul on levinud inglisekeelne ütlus: „*Move It or Block It or Paint/Coat It or Clean It*“ [12, lk 9] ehk „Liiguta või blokeeri, värvi/kata või puhasta“, mis võtab väga hästi kokku, kuidas peaks hajusvalguse vähendamisele lähenema.

Hajusvalguse kontekstis liigitakse hajumised järkudesse, kus järgu number näitab, mitu korda valguskiir on pindadelt hajunud. „Liiguta või blokeeri“ eesmärk on viia hajumiste järgrid võimalikult suureks. Iga hajumisega neeldub osa valguse intensiivsusest ning mitme hajumise korral võib muutuda valguse intensiivsus tühiselt väikeseks. Praktikas tähendab see seda, et elimineerida tuleks valguskiired, mis paistavad otse detektorile või nõ „jätavad vahele“ optilisi elemente (0. järku). Samuti tuleks vähendada ka mitteoptiliste pindade arvu, mis on valgustatud ja detektori poolt nähtavad (1. järku) [28]. Selle saavutamiseks kasutatakse optilisi varjukeid. Optiline varjuk on tavaliselt silindriline või koonusekujuline toru, mis asetseb optiliste elementide ümber või ees. Varjukit, mis asetseb esimese optilise elemendi ees, nimetatakse ka peavarjukiks. [12, lk 163-164] Peavarjuki sisepinnad põhjustavad aga suhteliselt palju 1. järku hajumist. Selle vähendamiseks saab tekitada sisepindadele ebäühtlase profiili, mida kasutatakse näiteks fotoobjektiivide päiksevarjukite juures. 1. järku hajumiste täielikuks eemaldamiseks, paigutatakse peavarjuki sisepindadele labad. Labade asukohtade määramiseks on olemas lihtne graafiline lähenemine (vt joonis 1.5). Lähteandmeteks on optilise süsteemi vaateväli ja esimese optilise elemendi läbimõõt ning varjuki pikkus ja läbimõõt. Joonisel 1.5 olevad numbrid viitavad järgmistele sammudele varjuki koostamisel:

1. Esimese optilise elemendi äärtest tõmmatakse optilise süsteemi vaatevälja piirjooned. Need määravad ära labade maksimaalse pikkuse, et labad ei põhjustaks vinjeteerimist.
2. Peavarjuki otsa paigutatakse esimene peavarjuki laba. Laba sisemise külje ja varjuki siseseina vahele tekkinud nurgast, tõmmatakse sirgjoon esimese optilise elemendi ülemisse nurka.
3. Peavarjuki siseseina vastasküljele joonistatakse samasugune laba nagu eelmisel sammul.



Joonis 1.5. Labade paigutus 1. järku hajumiste eemaldamiseks. Joonis on kohandatud viitest [12, lk 169]

Seejärel tõmmatakse selle laba terava serva otsast sirgjoon, mis lõikub samas punktis, kus lõikuvad vaatevälja piirjoon ja 2. sammul tõmmatud sirgjoon. Peale lõikumist pikendatakse sirgjoont kuni peavarjuki siseseinani, kust edasi tõmmatakse sirgjoon esimese optilise elemendi ülemisse serva.

4. Punkti, kus omavahel lõikuvad vaatevälja piirjoon, 2. sammul tõmmatud sirgjoon ja 3. sammul tõmmatud sirgjoon laba teravast servast, paigutatakse järgmine laba.
5. Järgmise laba asukoha määramiseks, tõmmatakse uuesti sirgjoon kõige välimise laba teravast servast. Seekord peab sirgjoon lõikuma punktis, kus lõikuvad omavahel vaatevälja piirjoon ja 3. sammul tõmmatud peavarjuki siseseina ja esimese optilise elemendi vaheline sirgjoon. Lõike punkti paigutatakse laba.

See sama protseduur jätkub, kuni ruumi lõppemiseni peavarjukis. Joonisel 1.5 toodud näites saab olla maksimaalselt kolm laba. Siin kohal tuleb aga märkida, labad ise ei tohiks saada domineerivaks hajusvalguse allikaks. Seetõttu on labade servad lüügis ja võimalikult teravad, et need ei tekitaks 1. järku hajumisi. Samuti ei tohiks labasid olla liigselt palju, et hajumine ja difraktsioon tipunurgalt hakkaksid domineerima.

Tihti peale tuleb ka optilise süsteemi sisemusse paigutada mitmeid varjukeid, et hajusvalgust efektiivselt blokeerida. Varjukiteks võivad olla erinevad diafragmad, mille eesmärk on blokeerida valguskiiri, mis on kõrvale kaldunud ette nähtud trajektoorilt (olgu see põhjustatud hajumisest, klaaselementidel peegeldumisest või difraktsioonist). Levinumad nendest on apertuurdiafragma, mis määrab efektiivse apertuuri, Lyot' diafragma, mille eesmärk on blokeerida difrakteerunud valguskiiri ning vaatevälja diafragma, mis blokeerib kõik vaatevälja välised valguskiired [12, lk 145-150]. Peale diafragmade paigutatakse optilistesse

süsteemidesse veel erinevaid varjukohti, mille eesmärk on elimineerida igasugused võimalikud hajusvalguse allikad. Näiteks satelliidi PROBA-V varjukite süsteem koosneb seitsmest erinevast komponendist, mis kõik on mõeldud mingi kindla hajusvalguse allika blokeerimiseks [29].

Hajusvalguse vähendamiseks kasutatakse ka erinevaid pinnakatteid. Klaaselementide puhul kaetakse need tavaliselt peegeldumistvastaste kihtidega, mis vähendavad pindadelt peegeldusi, kuid ei eemalda neid täielikult. Rohkem levinud on interferentsil põhinevad peegeldumistvastased katted, kuid kasutatakse ka muutuva murdumisnäitajaga materjale [30]. Mitteoptilised pinnad kaetakse tumedate ja tugevalt hajutavate pinnakatetega. See võimaldab hajusvalguse intensiivsust tõhusamalt vähendada. Sobiliku pinnakatte valimine sõltub suuresti kasutatavast lainepikkusest, sest näiteks mitmed nähtavas spektris neelavad pinnakatted võivad lähis- ja kauginfrapunavalguses olla peegelduvad või isegi läbipaistvad [31, lk 1383]. Samuti on oluline ka pinnakatte materjali vastupidavus keskkonnale.

1.3 Hajusvalguse analüüsimine

Hajusvalguse efektiivseks vähendamiseks, tuleks alustada selle analüüsimisega juba väga varakult optilise süsteemi arendamise protsessis. Selleks on loodud mitmeid tarkvarasid (FRED [32], TracePro [33], LightTools [34] jt), mis võimaldavad simuleerida valguse levikut optilise süsteemi raalprojekteeritud mudelis. Simulatsioonide aluseks on määramispiirkonnas suvaliste diskreetsete valguskiirte tekitamine suures koguses (ingl *ray tracing*) ning nende interaktsioonide optilise süsteemiga [12, lk 44]. Valguskiire interaktsiooni tulemust mingi pinnaga kirjeldab tõenäosuste jaotus, kus valguskiir vastavalt protsessi tõenäosusele neeldub, peegeldub, läbib või hajub. Sellist lähenemist nimetatakse üldisemalt Monte Carlo eksperimendiks [35, lk 95]. Üldiselt saab sellistes programmides kasutada ka kiirejagamise (ingl *beam splitting*) meetodit, kus pealelangev valguskiir paljundatakse ning uued tekkinud kiired saavad uue suuna ja intensiivsuse vastavalt tulemuste tõenäosustele. Seejuures on olulised parameetrid kiirte kogus ja kiirgusvoo lävi ehk kui palju võib valguskiir kaotada oma esialgsest võimsusest, et see jäetaks edaspidi simulatsioonist välja. Nendest parameetritest sõltub simulatsiooni kestvus ja täpsus. Programmis saab uuritavale süsteemile määrata kõik vajalikud pinna ja materjali omadused ning seejärel analüüsida kiirtekäiku süsteemis. [36]

Üks levinud moodus hajusvalguse kirjeldamiseks optilises süsteemis on punktallika läbilaskvus

(PST - ingl *Point Source Transmittance*) [12, lk 31]. See on matemaatiliselt defineeritud kujul

$$PST(\theta_i) = \frac{\Phi}{\Phi_0(\theta_i)}, \quad (1.10)$$

kus θ_i on valguskiire langemisnurk, Φ on kiirgusvoog detektoril ja Φ_0 on optilise süsteemi sisendavale langeva valguse kiirgusvoog. Valgusallikana kasutatakse PST juures lõpmata kaugel asuvat punktallikat ehk sellelt pärinevad paralleelsed valguskiired. PST-d saab kasutada optilise süsteemi varjukite hindamiseks erinevatel vaatevälja välistel langemisnurkadel, mis võib tuua esile puudujääke varjukite disainis.

2. Metoodika

Käesolevas peatükis kirjeldatakse töö eksperimentaalset osa ehk varjukite süsteemi loomisprotsessi ja valguse leviku simuleerimist. Peatükis antakse ülevaade ka maavaatluskaamera nõuetest, millest lähtuti varjuki koostamisel ja optiliste elementide hajumisfunktsioonide tuletamisel.

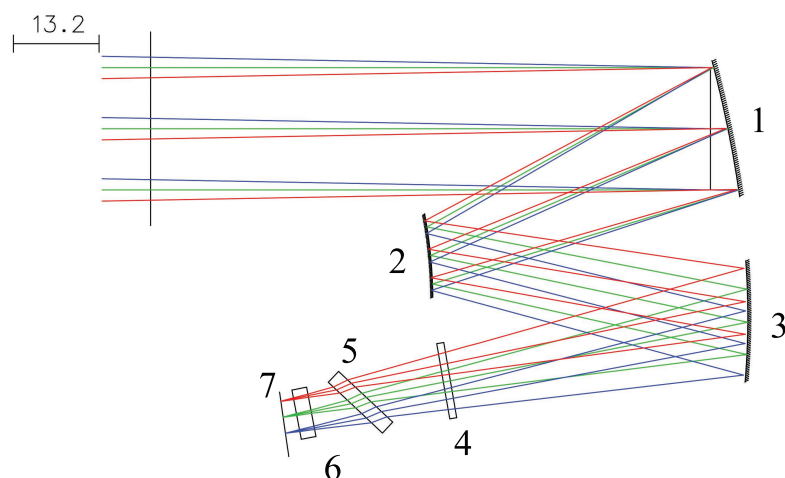
2.1 Maavaatluskaamera nõuded ja optiline disain

Käesolev töö on osa Euroopa Kosmoseagentuuri ja Tartu Observatooriumi koostööprojektist, mille eesmärk on välja töötada teaduslikeks mõõtmisteks sobiv miniatuurne maavaatluskaamera. Projektist tulenevalt peab maavaatluskaamera vastama teadud nõuetele (vt tabel 2.1), millest lähtutakse optilise varjuki disainimisel ja hajusvalguse analüüsimisel.

Tabel 2.1. Töö kontekstis relevantset maavaatluskaamera tehnilised nõuded. [11]

Maksimaalsed mõõtmed	96 mm × 96 mm × 96 mm
Minimaalne SNR	50
Spektraalkanaliid	650...680 nm (punane) ja 853...875 nm (lähisinfra-puna)
Peeglite pinnakareduse ruutkeskmise hälve	2 nm
Peeglite pinna saastatuse tase	0,1 %

Maavaatluskaamera optiline disain põhineb kolmel ristkülikukujulisel peeglil (vt joonis 2.1). Valguse jagab kahte spektraalkanalisse dikroiline peegel. Lisaks kõrgele optilisele kvaliteedile annab selline paigutus eelised ka hajusvalguse minimeerimisega, sest pildisensorid on optilise süsteemi sisendava eest hästi varjutatud. [37]



Joonis 2.1. Maavaatluskaamera optiline disain lähisinfra punase kanali jaoks, kus 1 - peapeegel, 2 - sekundaarpeegel, 3 - kolmas peegel, 4 - dikroiline peegel, 5 - optiline kompensator, 6 - ribapääsfilter ja 7 - pildisensor. Sinine ja punane kiir kirjeldavad vaatevälja, milleks on $2.1^\circ \times 2.7^\circ$.

2.2 Peegli pindade hajumisfunktsiooni tuletamine

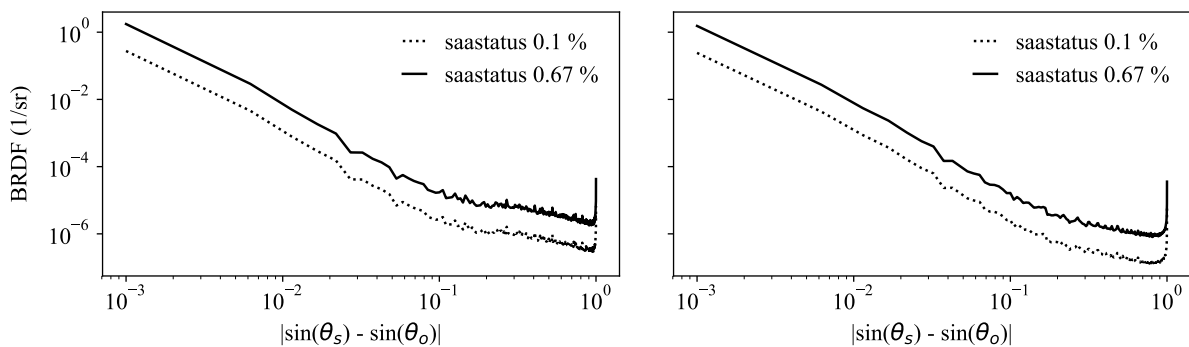
Peeglite BRDF-i arvutamisel lähtuti maavaatluskaamera nõuetest, mis eeldasid, et peeglite pinnakareduse ruutkeskmise hälve oleks alla 2 nm ja pinna saastatuse tase alla 0,1 % kogu peegli pinnast. Küll aga tuleb mainida, et need eeldused tehti vastavalt Euroopa Kosmoseagentuuri poolsetele soovitudele ning jäeti juurde klausel, et täpsed parameetrid selguvad peale hajusvalguse analüüsi. [11]

Pinna saastatuse osas tuli kõigepealt leida pinna puhtustase kasutades valemit 1.9. Maavaatluskaamera kokku panemine toimub Tartu Observatooriumi puhasruumides ehk puhtustaseme leidmisel lähtuti selle puhtusklassist (mitteametlikult ISO 8 või FED 100 000 [27]). Ajalise parameetri leidmine on keerulisem. Definitsiooni järgi on see aeg päevades, millal pind on avatud puhasruumi keskkonnale. Esialgse plaani kohaselt peegli pindu puhastama ei hakata, et neid mitte kahjustada. Seega eeldati, et kogu kokkupanek ja testimine võiks kesta kokku kuni 10 päeva. Selgus, et esialgse soovitud 0,1 % (pinna puhtustase CL 400) saastatuse saavutamiseks tohiks kaamera peeglid olla avatud puhasruumi õhule kuni 1,6 päeva. 10 päevaga tõuseks saastatustase 0,67 % (CL 580) peale. Nende andmete põhjal saab leida erinevas suuruses osakeste hulga, mis on toodud mõlema puhtustaseme jaoks tabelis 2.2.

Tabel 2.2. Osakeste jaotuse väljavõtte pinna saastatusest tingitud BRDF-i arvutamiseks.

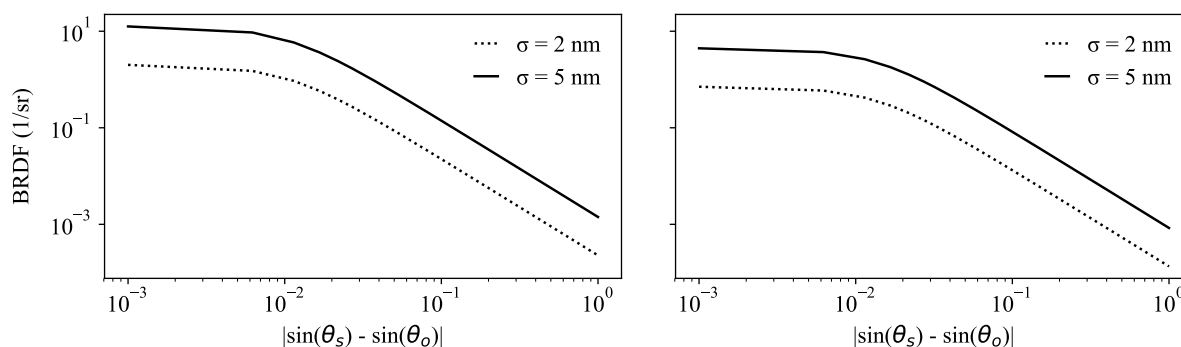
Osakese läbimõõt (μm)	Osakeste hulk (CL 400) (n/cm^2)	Osakeste hulk (CL 580) (n/cm^2)
2	5,4	34,4
4	4,3	27,1
6	3,0	18,8
8	2,2	13,6
10	0,9	10,3
15	0,6	5,7
20	0,4	3,6
25	0,1	2,5
50	> 0,1	0,7

Järgmisena leiti puhtustasemetele vastav BRDF (vt joonis 2.2) mõlema spektraalkanali keskmise lainepikkuse järgi kasutades valemit 1.7. Hajunud valguse intensiivsuse arvutamiseks kasutati Pythoni teeki PyMieScatt [38].



Joonis 2.2. BRDF mõlema spektraalkanali keskmise lainepikkuse järgi (vasakul 665 nm ja paremal 864 nm) kahel puhtustasemel, mille osakeste hulk on võetud tabelist 2.2.

Peeqlite pinnakareduse BRDF-i (vt joonis 2.3) leidmiseks lähtuti valemist 1.5. Maavaatluskaamera nõuete kohaselt valiti pinnakareduse σ väärtuseks 2 nm ja võrdluse huvides ka veidi suurem pinnakaredus - 5 nm. Autokovariatsiooni pikkuseks (l) valiti 10 μm .



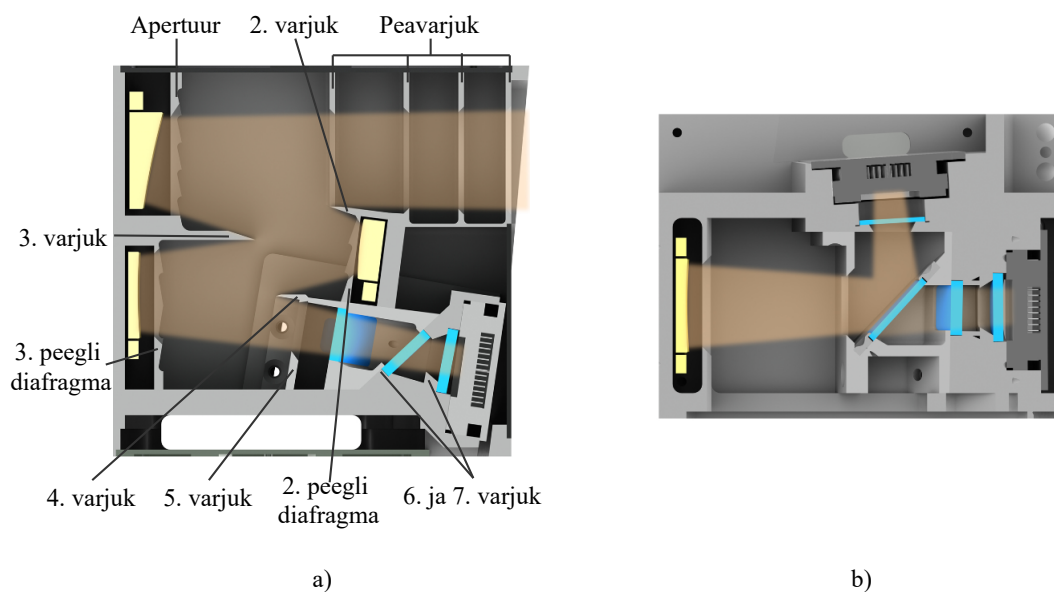
Joonis 2.3. BRDF mõlema spektraalkanali keskmise lainepikkuse järgi (vasakul 665 nm ja paremal 864 nm) kahel pinnakareduse ruutkeskmisel hälbel.

Pinnakareduse ja saastatuse poolt põhjustatud hajumised on üksteisest sõltumatud ehk nende hajumisfunktsioonid võib summeerida. Saadud funktsioonidega koostati simuleerimiseks peeglite pinnaomadused.

2.3 Optiliste varjukite süsteem

Hajusvalguse kontrollimiseks ja minimeerimiseks paigutati kaamerasse varjukite süsteem, mis koosneb seitsmest erinevast komponendist (vt joonis 2.4). Esimene nendest on peavarjuk, mis omakorda määrab ka kaamera sisendava. Selle koostamisel lähtuti 1. järku hajuvalguse eemaldamise praktikast (vt 1.5) ning mehaaniliste komponentide tootmisvõimekusest. Kaamera ülesehitusest ja nõuetest tulenevalt ei olnud võimalik peavarjukit teha sümmeetriliseks. Seega peab 1. järku hajuvalguse eemaldamiseks lähtuma sellest küljest, mille labad on kõige lühemad ehk käesoleval juhul alumisest küljest. Peavarjukil on kokku 4 laba. Terava serva tipunurk on kõikidel labadel ühtne ning esialgselt valiti selle väärtuseks 45° , aga täpsemalt selgub see tootmise käigus. Sellest tulenevalt võib ka muutuda längus külgede suund, kuid see ei oma märkimisväärset mõju hajusvalguse kogusele kaameras. Erilisem on kõige sisemine laba, mis oleks eeltoodud meetodi kohaselt pidanud asetsema täpselt teise peegli kohal. Probleemi lahendamiseks ühendati neljas laba 2. varjukiga.

Järgnevalt paigutati kaamera optilisse kanalisse mitmeid lisavarjukoide, et valgus saaks võimalikult vähe liikuda kaameras väljaspool vaatevälja kiirtekimpu. Käesoleva varjukite süsteemi kõige kriitilisemad osad on 2. ja 3. varjuk, mis hoiavad ära maavaatluskaamerasse siseneva valguse langemise otse kolmandale peeglile ning sealt peegeldumise järgmiste optiliste elementide suunas. Ruumipuuduse tõttu ei olnud võimalik optilist disaini lahendada nii, et saaks kolmandat peeglit täielikult varjutada ehk $\approx 25^\circ$ langemisnurga juures paistab valgus otse kolmandale peeglile. 4. varjuki eesmärk on varjutada dikroilist peeglit erinevate



Joonis 2.4. Maavaatluskaamera ristlõige külgsuunas a) ja pealtvaates b). Joonisel on hallides toonides kujutatud korpuse osi, kollaselt peegleid ja siniselt teisi optilisi elemente. Lisaks on poolläbipaistva oranži värviga kujutatud maavaatluskaamera vaateväljale vastavat kiirtekimpu. Paneelil a) on esitatud maavaatluskaamera kogu varjукite süsteem ja kiirtekäik lähisinfrapunase kanali jaoks ning joonisel b) on esitatud kiirte jagunemine ja kiirtekäik punase kanali jaoks.

hajupeegelduste eest maavaatluskaamera siseseintelt ja ka esimeselt peeglit. Eelnevalt mainitud kolmanda peegli otsevalgustatuse probleemi lahendamiseks paigutati 5. varjук enne dikroilist peeglit, mis on sisuliselt vaatevälja diafragma ehk see ümbritseb vaatevälja kiirtekimpu. 5. varjuki alumine sein blokeerib sisendavast kolmandale peeglile otse paistva ja edasi peegelduva valguse. Diafragmal on sarnane längus külg nagu peavarjuki labadel, et minimeerida valgustatud pindu. Üheks oluliseks hajusvalguse allikaks kujunes simulatsioonide käigus dikroilise peegli, kompensatori ja ribapääsufiltri vaheline kanal. Põhjuseks oli see, et igasugune hajumine kanali seintelt toimub väga kõrgete langemisnurkade all ehk sellest tulenevalt on pindade peegelduvus palju suurem ja hajumine toimub rohkem pildisensori poole. Probleemi lahendamiseks tehti klaaselemendid suuremaks, kui optiline disain ette näeb. Sellise lähene-misega moodustati 6. ja 7. varjук, mis võimaldavad blokeerida kanali seintelt hajunud valguskiiri.

Viimaks asetati iga peegli ette diafragma, mis võimaldab varjutada peegli raami ja ka ääri. Põhjus on selles, et tootmisprotsessist tulenevalt peab peeglid tegema natuke suuremaks, kui optiline disain seda ette näeb, et saaks veenduda peeglite pinna ühtluses. Suure tõenäosusega ei ole võimalik ka peegli raami katta tumeda pinnakattega, mis tähendab, et see omaks kõrget peegeldumistegurit ja seega tekitab palju hajusvalgust. Kuna diafragmade seinad on valgustatud ja sensori poolt nähtavad, siis otsustati tekitada nendele laineline pinnaprofiil, mille eesmärk on

soodustada hajumist järgmistest optilistest elementidest eemale.

Hajusvalguse minimeerimiseks kaetakse kõik maavaatluskaamera korpuse sisepinnad ja varjukite pinnad tumeda hajutava pinnakattega. Pinnakatete valimisel lähtuti eelkõige sellest, et seda oleks võimalik kasutada kosmosekeskkonnas ja kuluefektiivselt. Sellest tulenevalt võrreldakse käesolevas töös omavahel pinnakatet Acktar Magic Black [39] ja musta anodeeringuga alumiiniumi [40].

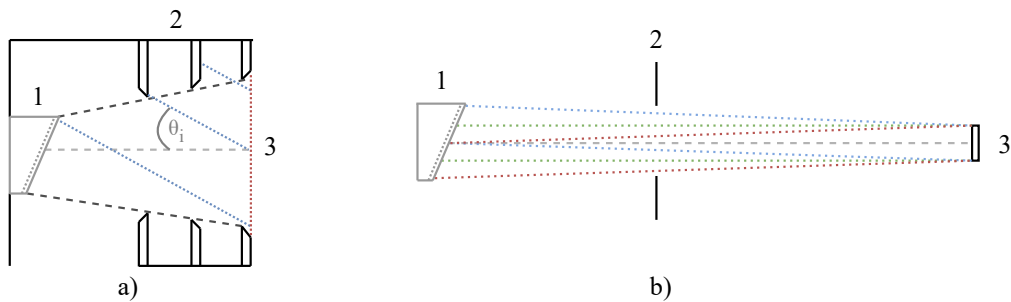
2.4 Valguse leviku simuleerimine

Käesolevas töös kasutati valguse leviku simuleerimiseks tarkvara TracePro [33]. Hajusvalguse karakteriseerimiseks tehti eraldi simulatsioonid vaatevälja siseste ja väliste hajusvalguse allikate jaoks. Vaatevälja välise hajusvalguse karakteriseerimiseks mõõdeti lõpmatuses asuva punktallika läbilaskvust. Selleks paigutati kaamera sisendava ette tasapinnaline valgusallikas, mis katab ära kogu sisendava. Sellelt tekitati paralleelne kiirtekimp, mille langemisnurka võrreldes optilise teljega muutes, saab simuleerida erinevate nurkade all olevaid kaugaid punktallikaid (vt joonis 2.5 a). Kaamera ebasümmeetrilise disaini tõttu otsustati simuleerida erinevaid langemisnurki mööda kahte ristuvat telge. Simulatsioonidega mõõdeti kiirgusvoogu pildisensorite pinnal (Φ) ja maavaatluskaamera sisendavas (Φ_0). Et tulemusi saaks võrrelda, kasutati iga langemisnurga juures sama palju valguskiiri ja sama kiirgusvoo läve. Selle simulatsiooniga saab mõõta suhtelist kiirgusvoogu erinevatel langemisnurkadel. Arusaamaks, millisel kiirgusvoo tasemel muutub pildisensoris tekkiv signaal tühiselt väikeseks, tuli kiirgusvoog siduda mingisuguse konkreetse valgusallikaga. Selleks valgusallikaks valiti Päike, mida saab antud analüüsi kontekstis lugeda ligikaudu punktallikaks. Punktallika läbilaskvuse analüüsi jaoks arvestatakse signaal tühiseks, kui see jääb alla ühe fotoelektroni tekke pildisensori pikslis. Fotoelektronide arvu leidmiseks koostati mudel

$$N_e(\theta_i) = \frac{E_a(\lambda) S \cos(\theta_i) PST(\theta_i) t \cdot \eta_s(\lambda)}{E_f N_{px}}, \quad (2.1)$$

kus $E_a(\lambda)$ on valgusallika kiirgustihedus, S on sisendava pindala, $PST(\theta_i)$ on punktallika läbilaskvus funktsioon (vt valem 1.10), t on säriaeg, E_f on footoni energia spektraalkanali keskmise lainepikkuse järgi, $\eta_s(\lambda)$ on pildisensori kvantsaagis ja N_{px} on vaateväljas olevate pikslite arv. Päikese kiirgustiheduse leidmiseks maavaatluskaamera spektraalkanalites lähtuti SOLSPEC [41] mõõtmistulemustest. Kogu vaatevälja välise hajusvalguse panuse hindamiseks kasutati sama simulatsiooni ülesehitust, aga paralleelse kiirtekimbu asemel tekitati koonusekujuline kiirtekimp, millega simuleeriti kõiki võimalikke langemisnurki üheaegselt. Jättes välja vaatevälja sisesed langemisnurgad, saab kätte kogu vaatevälja välise hajusvalguse panuse kaameras.

Vaatevälja sisese hajusvalguse karakteriseerimiseks paigutati kaamera optilisele teljele väike ruudukujuline allikas, mis asetseb kaugel peapeeglist (vt joonis 2.5 b). Allikalt kiirati koonusekujuline kiirtekimp, mille poolnurk on natuke suurem kui kaamera diagonaalne vaateväli ehk 2° . Allika kaugus valiti selline, et kaamera vaateväljas olevad kiired jõuaksid kõik esimesele peeglile ja vaateväli oleks ühtlaselt valgustatud. Simulatsiooniga mõõdeti, kui palju hajusvalgust tekib peeglite pindade ebatäpsuste tõttu ja peegelduste tõttu klaaselementidelt.



Joonis 2.5. Punktallika läbilaskvuse ja vaatevälja sisese hajusvalguse karakteriseerimise simulatsioonide ülesehitused. Paneelil a) on punktallika läbilaskvuse mõõtmise katseskeem, kus 1 - peapeegel, 2 - varjuk ja 3 - tasapinnaline valgusallikas. θ_i on paralleelse kiirtekimbu langemisnurk. Paneelil b) on vaatevälja sisese hajusvalguse mõõtmise katseskeem, kus 1 - peapeegel, 2 - kaamera sisendava ja 3 - valgusallikas. Sinised ja punased punktiirjooned märgivad vaatevälja äärseid kiiri.

Maa kaugseire puhul on väga tavaline olukord, kus vaadeldav maapind on osaliselt varjatud pilvtega. Pilvede albedo on mitmeid kordi kõrgem maapinna albeedost ehk sellelt tulenev valgus hajub pilve kujutise ümber olevatele pikslitele. Osaliselt pilvtega blokeeritud vaatevälja simuleerimiseks koostati stseen, kus poole vaateväljast katab pilv ja teise poole katab varjutamata maapind. Selleks asetati maavaatluskaamera apertuuri kaks valgusallikat, mis on mõlemad apertuuri suurused. Mõlemalt valgusallikalt kiirati poole vaatevälja suurune kiirtekimp, millele määrati vastavalt maapinna ja pilve kirkused. Maapinna kirkuse väärtus võeti vastavalt maavaatluskaamera nõuetes välja toodud referentskirkusele ehk punases kanalis $L_{ref} = 20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ja lähisinfrapunases kanalis $L_{ref} = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$. Pilve kirkuse puhul eeldatakse, et tegu on ühtlaselt peegelduva pinnaga, mille peegeldumistegur on 1. Seega pilve kirkuse saab arvutada otse Päikese spektraalse kiirgustiheduse järgi atmosfääri ülal ehk $L_{pilv} = E(\lambda)/\pi$. Simulatsioonides seati pilve osa kiirgusvooks 1 W ja maapinna osa kiirgusvooks L_{ref} ja L_{pilv} suhe, mis lähisinfrapunase kanali puhul on 0,33 W ja punase kanali puhul 0,04 W. Sarnane analüüs tehti ka Sentinel-2C ja -2D maavaatluskaameral, millest lähtuti käesoleva simulatsioon ülesehitamisel [10]. Simulatsioonis mõõdetakse, kui suure osa kiirgusvoost maapinnapoolsel kujutisel moodustab pilvelt pärinev hajusvalgus.

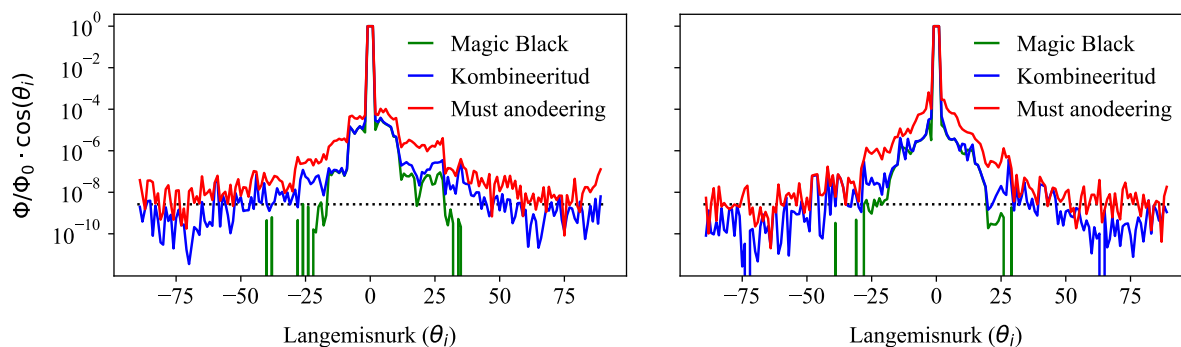
3. Hajusvalguse simulatsioonide tulemused ja järeldused

Käesolevas peatükis esitletakse simulatsioonidega saadud tulemusi. Eraldi analüüsitakse vaatevälja sisest ja välist hajusvalgust. Vaatevälja sisese hajusvalguse juures uuritakse, kuidas optilised elemendid põhjustavad hajusvalgust ja kuidas see varieerub erinevate elementide parameetritega. Lisaks uuritakse ka olukorda, kus maavaatluskaamera vaateväli on osaliselt kaetud pilvega. Vaatevälja välise hajusvalguse juures analüüsitakse, kuidas töötab optiliste varjukite süsteem erinevate valguskiirte langemisnurkade puhul ja millist mõju avaldavad sellele erinevad pinnakatted. Viimaks hinnatakse kogu maavaatluskaamera signaal-müra suhet.

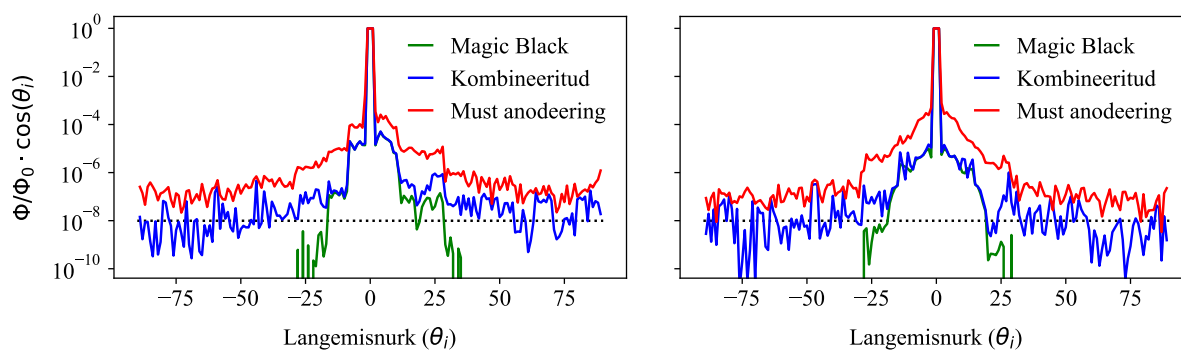
3.1 Vaatevälja väline hajusvalgus

Vaatevälja välise hajusvalguse karakteriseerimiseks tehti simulatsioonid, mida kirjeldati alapeatükis 2.4. Esimesena viidi läbi punktallika läbilaskvuse analüüs. Selleks kasutati valgusallikana sisendava suurust tasapinnalist valgusallikat, millelt kiirati 500 000 valguskiirt kogukiirgusvooga 1 W. Kiirgusvoo läveks seati $P_0 \cdot 10^{-6}$, kus P_0 on ühe kiire võimsus. Kaamera asümmeetrilise tõttu tehti simulatsioonid kahes ristivas teljes langemisnurkadel $-90^\circ \dots 90^\circ$. Tulemuste põhjal koostati kaamerale punktallika läbilaskvuse graafikud (vt joonised 3.1 ja 3.2).

Graafikute põhjal saab visuaalselt hinnata kuidas töötab kaamera varjukite süsteem erinevate langemisnurkade juures. Vaatevälja lähedastel langemisnurkadel on näha mitmeid lokaalseid maksimume või platoosid, mida põhjustavad kaameras väga konkreetsed pinnad. Seetõttu on näha ka järske langusi ja tõuse, mis viitavad sellele, et mingisugune pildisensori poolt nähtav pind ei ole enam valgustatud või just vastupidiselt, on konkreetse langemisnurga all valgustatud. Põhiliselt on sellisteks pindadeks 3. varjuki lüüskülge, 2. varjuki alumine külge, 4. varjuki lüüskülge ja peeglite diafragmad (vt joonis 2.4). Üks karakteristlik lokaalne maksimum asub vertikaalsel teljel $24^\circ \dots 26^\circ$ vahemikus, mille korral on kolmas peegel sisendava poolt otse valgustatud. Alates $\approx 30^\circ$ langemisnurkadest ei ole enam ükski pildisensorite poolt nähtav pind valgustatud ehk 1. järku hajusvalgust enam pildisensoritel ei esine. Pinnakatetena kasutati simulatsioonides musta anodeeringut, Acktar Magic Black'i ja nende kombinatsiooni. Kahe



Joonis 3.1. Punktallika läbilaskvuse graafik punase kanali jaoks kolme erineva mitteoptiliste pindade katetega. Vasakul graafikul on mõõtmised piki horisontaalset telge ja paremal piki vertikaalset telge. Horisontaalne must joon markeerib ühe fotoelektroni tekke taset pildisensoris, kui valgusallikaks oleks Päike.



Joonis 3.2. Punktallika läbilaskvuse graafik lähisinfra punase kanali jaoks kolme erineva mitteoptiliste pindade katetega. Vasakul graafikul on mõõtmised piki horisontaalset telge ja paremal piki vertikaalset telge. Horisontaalne must joon markeerib ühe fotoelektroni tekke taset, kui valgusallikaks oleks Päike.

esimese valiku puhul olid kõik kaamera korpuse sisepinnad ja varjukid kaetud ühe pinnakattega ja kombinatsiooni puhul kaeti kõik 1. järku haj valgust tekitavad pinnad Acktar Magic Black'iga ning ülejäänud pinnad kaeti anodeeringuga. Valikuliselt pindu kattes on võimalik saavutada kõrgem kuluefektiivsus, sest kõik pinnad ei pruugi olla hajusvalguse allikad ja seetõttu ei ole neid vaja katta parema pinnakattega. Graafikute järgi võib öelda, et välja arvatud ainult Acktar Magic Black-iga, jõuab iga langemisnurga puhul mõlemale pildisensorile mingisugune hulk valgust. Graafikutele on musta punktiirjoonega märgitud ühe fotoelektroni tekke läve, kui valgusallikaks oleks Päike. Seega punases kanalis jääb Päikse poolt tekitatud signaal kõrgematel langemisnurkadel kui $\pm 50^\circ$ kombineeritud pinnakattega ja üldiselt ka ainult musta anodeeringuga alla ühe fotoelektroni piiri. Lähisinfra punases kanalis on olukord kehvem, kus ainult musta anodeeringuga tekib pea igal langemisnurgal rohkem kui üks fotoelektron signaali, kuid kombineeritud pinnakattega on signaal üldiselt alla ühe elektroni. Kasutades ainult Acktar

Magic Black pinnakatet on mõlemas spektraalkanalisis alates 25° langemisnurgast signaal tühine.

Teiseks simuleeriti üldist vaatevälja välise hajusvalguse panust mõlemas maavaatluskaamera spektraalkanalisis. Selleks tekitati valgusallikast koonusekujuline kiirtekimp, mille tipunurgaks valiti 130° . Sellele vastab Maa nurksuurus 600 km kõrgusel orbiidil. Kuna tegu on väga suure kiirtekimbu nurgaga, siis tekitati valgusallikast 200 miljonit kiirt mõlemas spektraalkanalisis ja kiirgusvoo läveks seati $P_0 \cdot 10^{-6}$. Simulatsioonide tulemustes eraldati omavahel vaatevälja sisesed ja välised kiired ning leiti vaatevälja väliste kiirte osakaal mõlemas spektraalkanalisis (vt tabel 3.1). Tulemustest selgub, et erinevus musta anodeeringu ja Acktar Magic Black'i pinnakatete vahel on üle ühe suurusjärgu. Kombineerides pinnakatteid on aga võimalik tuua hajusvalguse tase lähedale Acktar Magic Black'i tasemele, mis kinnitab seda, et efektiivselt hajusvalguse vähendamiseks, ei ole vaja kõiki maavaatluskaamera sisepindu katta kalli pinnakattega.

Tabel 3.1. Kogu vaatevälja välise hajusvalguse osakaal spektraalkanalites.

Pinna kirjeldus	Lähisinfra punane kanal (%)	Punane kanal (%)
Acktar Magic Black	0,06	0,05
Must anodeering	1,58	0,80
Kombineeritud	0,15	0,11

3.2 Vaateväljasisene hajusvalgus

Vaatevälja sisese hajusvalguse üldiseks karakteriseerimiseks tehti simulatsioonid mille ülesehitus on toodud joonisel 2.5 b. Simulatsiooni valgusallikast tekitati 2° poolnurgaga koonusekujuline kiirtekimp ja veenduti, et kõik vaatevälja sisesed kiired jõuavad peapeeglile. Valgusallikast kiirati 5 miljonit kiirt ja kiirgusvoo läveks seati $P_0 \cdot 10^{-6}$ W. Esiteks leiti üldine peegli pindadelt hajumisest ja klaaselementide peegeldustest tingitud hajusvalguse panus pildisensoritel, mille tulemused on toodud välja vastavalt tabelites 3.2 ja 3.3. Simulatsioone tehti nelja erineva peeglite pinnaomadusega, mis põhinevad peatükis 2.2 leitud hajumisfunktsioonidele. Pinnakaredusest põhjustatud hajusvalguse puhul on selgelt näha, et lühemal lainepikkusel toimub suurem hajumine, mida kinnitab ka valem 1.5. Seega punases kanalis on hajusvalguse osakaal suurem võrreldes lähisinfra punase kanaliga. Eriti tuleb see esile 5 nm pinnakaredusega peeglite juures, kus punases kanalis ulatub hajunud valguse osakaal juba üle 5 %. Võrreldes pinnakaredusega on pinna saastatusest tingitud hajumine väiksem.

Tabel 3.2. *Peeglite pindadelt hajumisest põhjustatud hajusvalguse osakaal spektraalkanalites.*

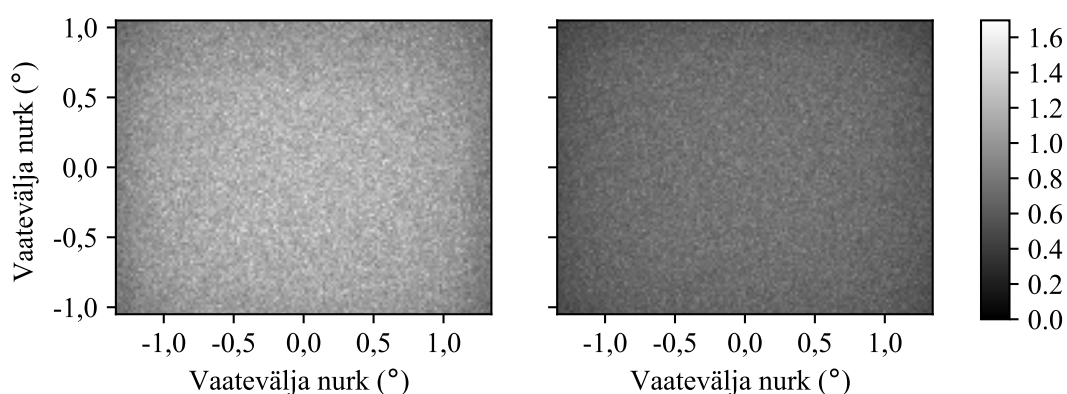
Pinna kirjeldus	Lähisinfra-punane kanal (%)	Punane kanal (%)
Pinnakaredus 2 nm; 0,1 % saastatus	0,51	0,84
Pinnakaredus 2 nm; 0,67 % saastatus	0,65	1,02
Pinnakaredus 5 nm; 0,1 % saastatus	3,00	5,05
Pinnakaredus 5 nm; 0,67 % saastatus	3,18	5,26

Tabel 3.3. *Klaaselementide pindadelt peegeldunud valguse osakaal spektraalkanalites.*

Pinna kirjeldus	Lähisinfra-punane kanal (%)	Punane kanal (%)
Peegeldumisvastase katte- ta	0,76	0,57
Peegeldumisvastase katte- ga	0,04	0,04

Peegeldused klaaselementidelt põhjustavad samuti märkimisväärses koguses hajusvalgust. Kompensaatori tõttu on lähisinfra-punases kanalis hajusvalguse osakaal suurem. Analüüsis selgub, et kattes filtrite ja kompensaatori pinnad peegeldumisvastase kattega, on võimalik nendelt komponentidelt tekkinud hajusvalguse hulk viia väiksemaks kui 0,05 %.

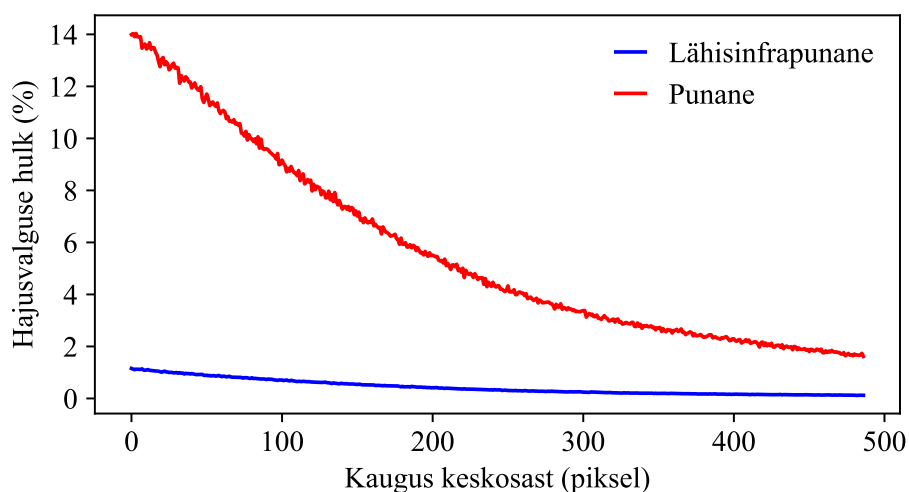
Eelnevas analüüsis leiti keskmine hajusvalguse osakaal pildisensoritel, kuid oluline on siinjuures arvestada ka hajusvalguse jaotumist pildisensorite pindadel (vt joonis 3.3). Selgus, et mõlemal pildisensoril on peegli pindadelt hajunud valgus rohkem kontsentreeritud vaatevälja keskele kui äärtesse. Põhjus seisneb selles, et kui oletada, et vaatevälja kujutis koosneb lõpmata suurest hulgast punktallikatest, siis hajumisfunktsioonist tulenevalt tekib peegeldumisel peegelpeegelduse ümber koonusekujuline kiirtekimp, mille intensiivsus väheneb koonuse nurga suurenedes vastavalt hajumisfunktsioonile (joonis 2.3). Seega pildisensori pinnale tekib punktallika kujutise ümber kuma. Kui nüüd arvestada välja vaatevälja siseste punktallikate peegelpeegeldused ja summeerida omavahel kokku kõik hajupeegeldused, siis sensori keskosas on hajunud kiirtekimpude kattuvus palju suurem kui sensori äärtes. Selle kattuvuse tõttu ongi sensori keskosas hajusvalgust rohkem. Kui võrrelda näiteks mõlema sensori keskosa ja



Joonis 3.3. Peegli pindadelt hajunud valguse ja klaasementidelt peegeldunud valguse jaotumine pildisensorite pindadele. Vasakul on punase kanali jaoks ja paremal on lähisinfrapunase kanali jaoks. Paremal asuv skaala on hajusvalguse hulk protsentides.

nurka, siis erinevus on ligikaudu 0.4%. Klaaselementide peegelduste puhul sõltub hajusvalguse paiknemine klaaselementide kaldenurgast ja kaugusest võrreldes pildisensoriga. Joonisel 3.3 ei tule need kujutised väga esile, sest nende osakaal võrreldes peegli pindadelt hajumisega jääb väga madalaks (vt tabel 3.3).

Maa kaugseires on üheks kõige suuremaks takistuseks pilved. Lisaks sellele, et vaatevälja sees olev pilv blokeerib osa maapinnast, mõjutab pilv ka ülejäänud kaadrit eelnevalt kirjeldatud hajusvalguse allikate tõttu. Selle simuleerimiseks koostati kahest osast koosnev kaader, kus üks osa on pilv ja teine on maapind (vt peatükk 2.4). Simuleerimisel tekitati mõlemast allikas 20 miljonit kiirt kiirgusvoo lävega $P_0 \cdot 10^{-5}$. Tulemused on toodud joonisel 3.4. Erinevus on väga



Joonis 3.4. Osaliselt pilvega kaetud kaadris pilve mõju maapinna osale mõlema spektraalkanali puhul.

suur mõlema spektraalkanali vahel. Põhiline erinevus tuleb sellest, et punases kanalis on L_{ref} 25 korda madalam kui L_{pilv} , võrreldes lähisinfra punase kanaliga, kus erinevus on vaid 3 korda. Lisaks on punases kanalis peeglitelt hajumine kõrgem. Tulemustest saab järeldada, et pilve esinemine kaadris mõjutab tugevalt ülejäänud kaadrit ja vähendab märgatavalt kaadri signaal-müra suhet. Nendele tulemustele lisanduvad juurde varasemalt peatükis käsitletud vaatevälja sisesed ja välised hajusvalguse allikad. Seega võib kindlusega öelda, et punases kanalis ei ole võimalik osaliselt pilvega kaetud kaadriga saavutada nõuetekohast signaal-müra suhet. Lähisinfra punases kanalis on olukord parem, aga endiselt on pilveläheduses hajusvalguse osakaal üle 1 %, mis tähendab, et ka lähisinfra punases kanalis ei saa suuretoenäosusega osaliselt pilvega kaetud kaadrid kasutada.

3.3 Signaal-müra suhte hinnang

Signaal-müra suhte (SNR) hindamiseks tuleb arvestada ka pildisensori karakteristikast tulenevate müradega. Kuna hajusvalgus ja pildisensori mürad on üksteisest sõltumatud, siis avaldub kogu SNR valemiga

$$SNR = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{SNR_h}\right)^2 + \left(\frac{1}{SNR_s}\right)^2}}, \quad (3.1)$$

kus SNR_h on hajusvalguse signaal-müra suhe ja SNR_s on pildisensori signaal-müra suhe. Maa-vaatluskaamera radiomeetrilise eelarve arvutuste kohaselt on SNR_s väärtused punases kanalis 75 ja lähisinfra punases kanalis 115. SNR_h leidmiseks tuleb leida kogu hajusvalguse hulk maavaatluskaameras. Tehes eelduse, et kõik hajusvalguse allikad on üksteisest sõltumatud, saab liita kokku nende osakaalud ja saadud tulemuse pöördväärtus ongi SNR_h . Kuna erinevaid võimalusi kombineerida on mitmeid, siis on mõttekas leida hajusvalguse hulga ülemine piir, millega kogu SNR langeb alla 50. Kasutades valemit 3.1, selgub, et punases kanalis on maksimaalseks hajusvalguse hulgaks 1,5 % ja lähisinfra punases kanalis 1,8 %. Selle põhjal saab järeldada, et antud nõuet ei oleks kindlasti võimalik täita ilma peegeldumisvastaste kateteta klaaselementidel ja kasutades ainult musta anodeeringut mitteoptiliste pindade katmiseks. Paar võimalikku kombinatsiooni on toodud tabelis 3.4 koos vastavate signaal-müra suhetega.

Tabel 3.4. *Maavaatluskaamera SNR erinevate hajusvalgust mõjutavate parameetritega.*

Peeglid	Peegeldumisvastane kate	Mitteoptiliste pindade pinnakate	SNR (punases / lähisinfrapunases)
Pinnakaredus 2 nm + 0,1% saastatus	Jah	Acktar Magic Black	62 / 94
Pinnakaredus 2 nm + 0,67% saastatus	Jah	Kombineeritud	56 / 83

Kokkuvõte

Käesoleva töö eesmärgiks oli karakteriseerida hajusvalguse allikad kavandatavas miniatuurses maavaatluskaameras ning hinnata nende mõju signaal-müra suhtele. Sellele lisaks taheti kavandada maavaatluskaamerale optiliste varjukite süsteem hajusvalguse vähendamiseks.

Töö teooria osas tutvustati levinud hajusvalguse allikad ja erinevaid mudeleid, mis on loodud nende matemaatiliseks kirjeldamiseks. Allikad jaotati kahte rühma vastavalt sellele, kas need asuvad kaamera vaatevälja sees või väljas. Esimesse rühma kuuluvad optiliste elementide pindadelt hajumine pinnakareduse ja osakeste saaste tõttu ning klaaselementide pindadelt peegeldumised. Teise rühma kuuluvad erinevad mitteoptilised pinnad, millelt hajunud valgus jõuab kaamera fokaaltasandile. Teooria ülevaates kirjeldati ka hajusvalguse vähendamise põhitõdesid. Töö metoodika osas tutvustati valminud optiliste varjukite süsteemi ja hajusvalguse simulatsioonide ülesehitust. Samuti räägiti põgusalt kavandatava maavaatluskaamera olemusest ja töö kontekstis relevantsetest nõuetest ning tuletati simulatsioonide jaoks vajalikud pinnaomadused. Töö viimases osas esitleti hajusvalguse simulatsioonide tulemusi ja analüüsi.

Töö tulemusena kavandati maavaatluskaamerale optiliste varjukite süsteem ja viidi läbi mitmeid simulatsioone erinevate hajusvalguse allikatega. Omavahel võrreldi erineva kvaliteediga peeglite pindu, peegeldumisvastase katte mõju klaaselementidel ja tumedaid pinnakatteid maavaatluskaamera mitteoptilistel pindadel. Vaatevälja välise hajusvalguse hindamiseks simuleeriti kaugel asuvaid punktallikaid erinevate langemisnurkade all maapinda tervikuna. Analüüsist selgus, et kombineerides omavahel musta anodeeringut ja Acktar Magic Black pinnakatteid, on võimalik saavutada kuluefektiivne lahendus hajusvalguse vähendamiseks. Vaatevälja siseste hajusvalguse allikatena simuleeriti peeglite pindade pinnakaredusest ja saastatusest tulenevat hajumist ning klaaselementide pindadelt peegeldumisi. Väheste klaaselementide tõttu on koos peegeldumisvastase kattega domineerivaks hajusvalguse allikaks peeglite pindadelt hajumine. Selgus ka, et hajusvalgus ei ole jaotunud pildisensoritele ühtlaselt, vaid kaadri keskosas on hajusvalguse hulk kõrgem kui äärtes. Viimaks hinnati ka maavaatluskaamera signaal-müra suhet, kus kombineeriti omavahel hajusvalguse signaal-müra suhe ja pildisensori signaal-müra suhe. Tulemuste põhjal saab väita, et maavaatluskaameraga on võimalik saavutada nõuetekohane signaal-müra suhe 50.

Tänuavaldused

Töö autor soovib tänada oma juhendajat Tõnis Eenmäed, kes aitas mind väga palju töö vormistuse ja kirjutamise osas. Samuti soovib autor tänada oma tööühma, kellega on olnud väga meeldiv viimase kahe aasta jooksul koos töötada. Suur tänu kuulub kolleeg Joosep Kivastikule, kes innustas hajusvalguse temaatikaga tegelema ja oli alati valmis teooria üle arutlema. Teiseks soovib autor tänada ka kolleeg Silvar Muru, kes aitas raalprojekteerimisega ja andis tagasisidet optiliste varjukite süsteemile mehaanilise lahenduse vaatepunktist.

Kirjandus

- [1] A. Slavinskis, M. Pajusalu, H. Kuuste, E. Ilbis, T. Eenmäe, I. Sünter, K. Laizans, H. Ehrpais, P. Liias, E. Kulu, J. Viru, J. Kalde, U. Kvell, J. Kütt, K. Zalite, K. Kahn, S. Lätt, J. Envall, P. Toivanen, J. Polkko, P. Janhunen, R. Rosta, T. Kalvas, R. Vendt, V. Allik, and M. Noorma. „ESTCube-1 in-orbit experience and lessons learned“. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 30(8):12–22, 2015.
- [2] L. Alminde and M. Bisgaard and D. Vinther and T. Viscor and K. Z. Østergard. „The AAU-Cubesat Student Satellite Project: Architectural Overview and Lessons Learned“. *IFAC Proceedings Volumes*, 37(6):949 – 954, 2004.
- [3] ESA Earth Observation Portal. „QuakeSat“. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/q/quakesat>. Viimati külastatud: 06.05.20.
- [4] NanoSats database. <https://www.nanosats.eu/>. Viimati külastatud: 06.05.20.
- [5] D.Šelva and D. Krejci. „A survey and assessment of the capabilities of Cubesats for Earth observation“. *Acta Astronautica*, 74:50 – 68, 2012.
- [6] ESA Earth Observation Portal. „Copernicus: Sentinel-2“. <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/copernicus-sentinel-2>. Viimati külastatud: 06.05.20.
- [7] ESA Earth Observation Portal. „EnviSat (Environmental Satellite)“. <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/e/envisat>. Viimati külastatud: 06.05.20.
- [8] „Upper Atmosphere Research Satellite (UARS)“. <https://uars.gsfc.nasa.gov/>. Viimati külastatud: 06.05.20.
- [9] The National Aeronautics and Space Administration. „CubeSats Overview“. https://www.nasa.gov/mission_pages/cubesats/overview. Viimati külastatud: 25.05.20.
- [10] Sentinel-2 Team. „Copernicus Sentinel-2C and -2D System Requirements Document (SRD)“.
- [11] TO-IIS-EOI-TN1-v1.2. „Requirement specifications document“, 2018.
- [12] E. C. Fest. „*Stray Light Analysis and Control*“. SPIE Press, Bellingham, WA. USA, 3 edition, 2013.

- [13] J. C. Stover. „*Optical Scattering: Measurement and Analysis*“. SPIE Press, Bellingham, WA. USA, 3 edition, 2012.
- [14] F. E. Nicodemus, J. C. Richmond, J. J. Hsia, I. W. Ginsberg, and T. Limperis. „Geometrical considerations and nomenclature for reflectance“. Final Report National Bureau of Standards, 1977.
- [15] J. E. Harvey. „*Understanding Surface Scatter Phenomena: A Linear Systems Formulation*“. SPIE Press, Bellingham, WA. USA, 3 edition, 2019.
- [16] H. E. Bennett and J. O. Porteus. „Relation Between Surface Roughness and Specular Reflectance at Normal Incidence“. *J. Opt. Soc. Am.*, 51(2):123–129, 1961.
- [17] M. G. Dittman, F. Grochocki, and K. Youngworth. „No such thing as sigma: flowdown and measurement of surface roughness requirements“. In O. Manuel Uy, John C. Fleming, and Michael G. Dittman, editors, *Optical Systems Degradation, Contamination, and Stray Light: Effects, Measurements, and Control II*, volume 6291, pages 210 – 217. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2006.
- [18] J. E. Harvey. „Surface Scatter Phenomena: A Linear, Shift-Invariant Process“.
- [19] S.Ö. Rice. „Reflection of electromagnetic waves from slightly rough surfaces“. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 4(2-3):351–378, 1951.
- [20] P. Beckmann and A. Špizzichino. „*The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*“. Artech House radar library. Artech House, 1987.
- [21] M. G. Dittman. „K-correlation power spectral density and surface scatter model“. In O. Manuel Uy, John C. Fleming, and Michael G. Dittman, editors, *Optical Systems Degradation, Contamination, and Stray Light: Effects, Measurements, and Control II*, volume 6291, pages 226 – 237. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2006.
- [22] S. J. Wein. „*Small-Angle Scatter Measurement*.“ PhD thesis, THE UNIVERSITY OF ARIZONA., 1989.
- [23] P. R. Spyak and W. L. Wolfe. „Scatter from particulate-contaminated mirrors. part 1: theory and experiment for polystyrene spheres and $\lambda = 0.6328 \mu m$ “. *Optical Engineering*, 31 (8):1746–1756, 1992.
- [24] P. R. Spyak and W. L. Wolfe. „Scatter from particulate-contaminated mirrors. part 4: properties of scatter from dust for visible to far-infrared wavelengths“. *Optical Engineering*, 31 (8):1775–1784, 1992.

- [25] IEST-STD-CC1246D. „Product Cleanliness Levels and Contamination Control Program“, 2002.
- [26] O. Hamberg and E. M. SHON. „Particle Size Distribution on Surfaces in Clean Rooms“. Technical report, The Aerospace Corporation, 1984.
- [27] Mecart Cleanrooms. „CLEANROOM CLASSIFICATIONS (ISO 8, ISO 7, ISO 6, ISO 5)“. <https://www.mecart-cleanrooms.com/learning-center/cleanroom-classifications-iso-8-iso-7-iso-6-iso-5/>. Viimati külastatud: 28.05.2020.
- [28] J.Ö. Park, W. K. Jang, S. H. Kim, H.Š. Jang, and S. H. Lee. „Stray Light Analysis of High Resolution Camera for a Low-Earth-Orbit Satellite“. *J. Opt. Soc. Korea*, 15(1):52–55, Mar 2011.
- [29] A. Mazzoli, P. Holbrouck, Y. Houbrechts, L. Maresi, Y.Štockman, M. Taccola, and J. Versluys. „Baffles design of the PROBA-V wide FOV TMA“. In Errico Armandillo, Bruno Cugny, and Nikos Karafolas, editors, *International Conference on Space Optics — ICSO 2010*, volume 10565, pages 66 – 71. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2017.
- [30] M. Cheng, H. C. Chang, A. Chang, S. H. Lin, J-Q Xi, and E.Š Schubert. „Design of optical path for wide-angle graded-index antireflection coatings“. *Applied optics*, 46:6533–8, 2007.
- [31] M. Bass. „*Handbook of Optics*“. McGraw-Hill , Inc, 1995.
- [32] Photon Engineering. „FRED Optical Engineering Software“. <https://photonengr.com/fred-software/>. Viimati külastatud: 25.05.20.
- [33] Lambda Research Corporation. „TracePro“. <https://www.lambdares.com/tracepro/>.
- [34] Synopsis. „LightTools Illumination Design Software“. <https://www.synopsys.com/optical-solutions/lighttools.html>. Viimati külastatud: 25.05.20.
- [35] J. E. Gentle. „*Computational Statistics*“. Springer-Verlag New York, 2 edition, 1995.
- [36] Lambda Research Corporation. „*Tracepro User’s Manual*“. Lambda Research Corporation.
- [37] J. Kivastik. „Optical Design of a Radiometrically Calibrated Miniature Earth Observation Imager“. Master’s thesis, University of Tartu, 2019.
- [38] „Functions for Forward Mie Calculations of Homogeneous Spheres“. <https://pymiescatt.readthedocs.io/en/latest/forward.html>. Viimati külastatud: 25.05.20.

- [39] Acktar. „Magic Black“. <https://www.acktar.com/product/magic-black/>. Viimati külastatud: 31.03.2020.
- [40] J. L. Marshall, P. Williams, J. P. Rheault, T. Prochaska, R. D. Allen, and D. L. DePoy. „Characterization of the reflectivity of various black materials“. In S. K. Ramsay and I. S. McLean and H. H. Takami, editor, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V*, volume 9147, pages 1459 – 1466. SPIE, 2014.
- [41] G. Thuillier, M. Herse, D. Labs, T. Foujols, W. Peetermans, D. Gillotay, P. L. C. Simon, and H. Mandel. „The Solar Spectral Irradiance from 200 to 2400 nm as Measured by the SOLSPEC Spectrometer from the Atlas and Eureka Missions“. *Solar Physics*, 214:1–22, 2003.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Hans Hubert Sams,

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

Hajusvalguse karakteriseerimine ja optilise varjuki disain miniatuurse maavaatluskaamera jaoks,

mille juhendaja on Tõnis Eenmäe, Msc, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. olen teadlik, et punktis 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Hans Hubert Sams,

Tartu, 29. mai 2020. a.