

Marja Määttä

**AISA FENIXIN KALIBROINTI JA VALIDOINTI**

# AISA FENIXIN KALIBROINTI JA VALIDOINTI

Marja Määttä  
Opinnäytetyö  
Kevät 2015  
Laboratorioalan koulutusohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu

Laboratorioalan koulutusohjelma, laiteanalytiikan suuntautumisvaihtoehto

---

Tekijä: Marja Määttä

Opinnäytetyön nimi: Aisa Fenixin kalibrointi ja validointi

Työn ohjaajat: Mikko Autio ja Eija Hakala

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2015. Sivumäärä: 52.

---

Tämän opinnäytetyön pääasiallisena tarkoituksena oli hyperspektraalisen mittalaitteen, Aisa Fenixin, kalibrointi ja validointi. Lisäksi opinnäytetyössä perehdyttiin mittalaitteiden kuvantamisen ongelmakohtiin sekä niiden ratkaisuihin teoreettisella tasolla. Mittalaitteen rakennetta ei käsitellä opinnäytetyössä tarkemmin.

Keskeisimmät ongelmakohdat hyperspektraalisessa kuvantamisessa liittyvät radiometriin ja geometriin vääristymiin. Osa vääristymistä aiheutuu mittalaitteesta itsestään ja osa kuvantamisesta. Mittalaitteesta aiheutuvia vääristymiä korjataan optiikan huolellisella kollimoinnilla ja käyttämällä laadukkaita komponentteja. Kuvantamisesta johtuvia geometrisia ja radiometrisia vääristymiä korjataan erilaisilla korjauskertoimilla. Korjauskertoimet saadaan tekemällä mittalaitteelle ennen kuvantamista neljä erilaista kalibrointia, joita ovat spektraalinen, geometrinen ja radiometrinen kalibrointi sekä puoliarvomittaus.

Mittalaitteelle tehtiin referenssimittaus ulkona skannaamalla kuva maisemasta valkoista täysin heijastavaa referenssitaulua vasten. Referenssimittauksesta saatuja tuloksia verrattiin standardiin ilmakehän irradianssimalliin, jonka perusteella todettiin mittalaitteen täyttävän sille asetetut laatuksiteerit. Referenssimittauksen haasteena on sen riippuvuus sääolosuhteista. Tällä hetkellä mittauksesta saatavia tuloksia verrataan standardiin ilmakehän irradianssimalliin, joka on tehty aurinkoisella säällä. Tuloksiin vaikuttaa kuitenkin useampi parametri, joista tärkein on auringon säteilyn määrä. Muita parametrejä ovat esimerkiksi lämpötila, ilmankosteus ja ilman aerosolit sekä kaasut. Jatkotutkimuksena referenssimittaukseen liittyen olisi hyödyllistä kehittää erilaisia ilmakehämalleja, jotka vastaisivat vaihtuvia sääolosuhteita.

Opinnäytetyön toimeksiantaja oli Specim Oy, joka on erikoistunut hyperspektraaliseen kuvantamiseen tarvittavien mittalaitteiden valmistamiseen ja kehittämiseen.

---

Asiasanat: Aisa Fenix mittalaite, hyperspektraalinen kuvantaminen, kalibrointi

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## SISÄLLYS

1. JOHDANTO	6
2. SÄHKÖMAGNEETTINEN SÄTEILY	7
2.1. Fotonien emissio, absorptio, taittuminen ja heijastuminen	8
2.2. Spektrometria	9
2.3. Multi- ja hyperspektrometrian eroavaisuuksia	11
3. HYPERSEKTRAALINEN KUVANTAMINEN	14
3.1. Kaasujen tulkitseminen terminaalialueella hyperspektrisen kuvantamisen avulla	16
3.2. Hyperspektraalisen kuvantamisen sovellusmahdollisuuksia	17
4. HYPERSEKTRAALIKUVANTAMISEN HAASTEET	19
4.1. Signaalikohinasuhde	19
4.1.1. Pimeävirrän kohina, fotonikohina ja lukukohina	20
4.1.2. Valaistusolosuhteet ja detektorin kvanttihyötysuhde	21
4.2. Hajavalo	22
4.3. Ilmakehän vaikutus	23
4.3.1. Geometriset ongelmat	24
4.3.2. Radiometriset ongelmat	25
4.3.3. Valon sironta	26
5. AISA FENIXIN KALIBROINTI	28
5.1. Aisa Fenixin kuvaustekniikka	29
5.2. Aisa Fenixin säätö ennen kalibrointia	32
5.3. Spektraalinen kalibrointi	33
5.4. Geometrinen kalibrointi	36
5.5. Puoliarvomittaus	37
5.6. Radiometrinen kalibrointi	38
6. AISA FENIXIN VALIDOINTI	40
6.1. Integroivan pallon radiometrinen korjaus	40
6.2. Kalibroinnin tarkistus	44
6.3. Referenssimittaus	45

6.4. Validoinnin tulosten tarkastelu	45
7. YHTEENVETO	48
LÄHTEET	50

# 1. JOHDANTO

Opinnäytetyön tavoitteena on perehtyä hyperspektraalisen kuvantamiseen ja siihen liittyviin ongelmakohtiin niin teoriassa kuin käytännössä. Empiirisen tutkimuksen tavoitteena on Aisa Fenix mittalaitteen kalibrointi ja korjauskertoimien määrittäminen sekä mittalaitteen validointi.

Hyperspektraalisen kuvantamisen haasteet liittyvät laitteiden kokoamiseen ja suunnitteluun sekä maaston kaukokartoitukseen. Spektraalisten mittalaitteiden suunnittelussa tulee ottaa huomioon erilaisten tuloksia vääristävien häiriötekijöiden vaikutukset kuvantamisesta saatavaan dataan. Kaukokartoitukseen on puolestaan kehitelty erilaisia korjausmenetelmiä vääristymien poistamiseen.

Aisa Fenix mittalaitteen kalibrointi pitää sisällään spektraalisen, geometrisen ja radiometrisen kalibroinnin sekä puoliarvomittauksen. Kalibroinneilla saadaan määritettyä kaukokartoituksesta saatavan datan korjaukseen tarvittavia korjauskertoimia. Validoinnilla puolestaan testataan kalibroinnin tarkkuus käytännössä vertaamalla mittalaitteella saatuja tuloksia tunnettuihin tuloksiin.

Validointiin liittyy erilaisia haasteita, jotka tulevat esiin erityisesti alueilla, joissa on useampi vuodenaika. Validointiin liittyvä referenssimittaus tulisi tehdä aina mahdollisimman samanlaisissa olosuhteissa, sillä auringon säteilyn määrä on referenssimittauksista tehtäessä keskeisimmässä asemassa. Auringon säteilyn lisäksi myös säteiden tulokulma, ilman lämpötila, kaasut ja aerosolit, pilvet sekä ilman suhteellinen kosteus vaikuttavat mitattuihin tuloksiin. Mittalaitteen referenssimittauksesta saatuja tuloksia verrataan tunnettuun ilmakehän irradianssimalliin, jossa referenssimittaus on tehty aurinkoisessa ja stabiilissa olosuhteissa. Talvisin, keväisin ja syksyisin olosuhteet poikkeavat paljon kesän säätilasta. Tämä rajaa ajankohtaa, jolloin Aisa Fenixille voidaan tehdä referenssimittauksia. Yksi suuri kysymys onkin, kuinka saataisiin kehitettyä mittausmenetelmä, jossa vuodenaikalla sekä säällä ei olisi niin suurta merkitystä tuloksiin.

## 2. SÄHKÖMAGNEETTINEN SÄTEILY

Spektrometrian avulla voidaan tutkia ja tunnistaa aineita eri olomuodoissaan. Kohteen absorboiman sähkömagneettisen säteilyn ominaisuuksista voidaan päätellä kohteen ominaisuuksia. Tutkittava kohde voi olla kaasuna, nesteenä tai kiinteässä muodossa. Sähkömagneettinen säteily on aaltomaista ja muodostuu jokaiseen ilmansuuntaan etenevästä sähkömagneettisesta värähtelystä sähkö- ja magneettikentissä (1). Säteily on kvantittunutta, joten säteilylähde lähettää säteilyä kvantteina eli fotoneina. Fotonin kuljettama energia ja liikemäärä ovat verrannollisia säteilyn taajuuteen (1). Säteilyn energia lasketaan kaavasta 1.

$$E = hf \leftrightarrow E = \frac{hc}{\lambda} \qquad \text{KAAVA 1}$$

missä

$E$  on Fotonin sisältämä energia (J),

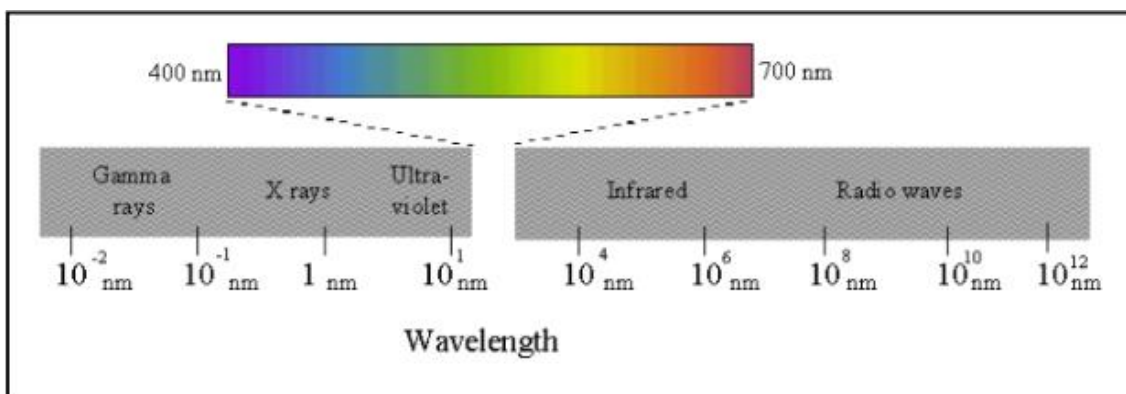
$h$  Planckin vakio, joka on  $6,62606957 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ,

$f$  Aallonpituuden taajuus (Hz),

$c$  valon nopeus, joka on  $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  tyhjiössä ja

$\lambda$  Aallonpituus (nm) (2, s. 279).

Mitä suurempi taajuus aallonpituudella on sitä pienempi on säteilyn sisältämä energia. Sähkömagneettinen säteily jaetaan aallonpituuden mukaan radioaaltoihin, mikroaaltoihin, infrapunasäteilyyn, näkyvään valoon, ultraviolettisäteilyyn, röntgensäteilyyn ja gammasäteilyyn (4, s.1). Nämä edellä mainitut säteilylajit muodostavat sähkömagneettisen spektrin (kuva 1).



KUVA 1. Sähkömagneettinen spektri (4, s. 1)

## 2.1 Fotonien emissio, absorptio, taittuminen ja heijastuminen

Jokaisella atomilla ja molekyylillä on oma perustilansa, jossa sillä on energia alimmillaan. Atomi tai molekyyli voi virittyä elektronin virittyessä ja siirtyessä seuraavalle energiatasolle säteilyn antaessa sille virittymiseen tarvittavan energian. Viritystila on epästabiili, joten atomi tai molekyyli pyrkii palautumaan takaisin perustilaansa, jolloin atomin tai molekyylin viritystila purkautuu vapauttaen ylimääräisen energian säteilynä. Viritystilan purkautuminen tarkoittaa emissiota, jossa fotoni kuljettaa pois vapautuneen energian. (5.)

Atomin tai molekyylin virittymisen voi aiheuttaa esimerkiksi valo. Mikäli valo muodostuu hehkuvassa kaasussa, muodostuu erillisistä emissioviivoista koostuva emissiospektri. Jokaisella kaasulla on ominaiset aallonpituudet, joissa se emittoi valoa ja näin eri kaasut voidaan erottaa toisistaan. (6.)

Emission vastakohta on absorptio, jossa atomiin tai molekyyliin osuu fotoni. Tällöin fotoni tuhoutuu ja atomi virittyy korkeampaan energiatilaan. Kullakin alkuaineella on tietyt energiatilat. Mikäli atomiin osuva fotonin energia ei vastaa kyseiselle alkuaineelle sopivaa kahden energiatilan erotusta, atomi ei pysty absorboimaan sitä. Esimerkiksi kaasupilven lävitse kulkevasta säteilystä, joka sisältäisi kaikkia aallonpituuksia, pilven atomeista absorboituisivat vain ne fotonit, joilla on sopiva energia. Vain tietyillä aallonpituuksilla absorboituminen aiheuttaa sen, että säteily heikkenee luonnollisesti. (7.)



Aaltoliikkeen suunnan muuttuessa kahden faasin rajapinnassa on kyseessä taittuminen. Tulo- ja taitekulmien suuruuksiin vaikuttavat faasien taitekertoimet. Kulmat määritellään aina aaltojen menosuunnan ja faasin, johon aallot osuvat, väliseksi. Rajapinnassa aallonnopeus muuttuu taitekertoimien mukaiseksi ja osa aaltoliikkeestä heijastuu aina faasin pinnasta. Valon tullessa optisesti harvemmasta tiheämpään valo taittuu pinnan normaalia päin. Samalla valon nopeus pienenee. Vastaavasti valon tullessa optisesti tiheämmästä harvempaan valo taittuu pinnan normaalista poispäin ja valon nopeus kasvaa. Taittumista ei tapahdu lainkaan, mikäli valo tulee kulmassa, jossa kaikki valo heijastuu pinnasta takaisin. Valo heijastuu esimerkiksi peileistä lähes kokonaan. Valon taajuus pysyy faasin muuttuessa samana eikä tällöin myöskään taittumista tapahdu. Valon taittumista käytetään apuna optisissa laitteissa, joissa on prismoja tai hiloja (2, s. 272–273).

## 2.2 Spektrometria

Kaikilla materiaaleilla on ominainen spektrinsä, minkä vuoksi eri materiaalit absorboivat eri tavoin sähkömagneettista säteilyä. Lisäksi kukin materiaali absorboi tai emittoi vain tietyllä sille ominaisella aallonpituusalueella. Absorptio ja emissio johtuvat materiaalien erilaisista atomi- ja molekyyli-rakenteista. Tässä tutkimuksessa keskitytään näkyvään- ja infrapuna- aallonpituusalueeseen. Infrapuna- eli IR-aallonpituusalue sisältää lähi- eli NIR-, lyhyt- eli SWIR-, keski- eli MWIR- ja kaukoinfrapuna- eli LWIR-aallonpituusalueet (8). Näkyvä- eli VIS-aallonpituusalue sisältää aallonpituudet 380 nm–780 nm, NIR 700 nm–1100 nm, SWIR 1100 nm–3000 nm, MWIR 3 µm–5 µm ja LWIR 8 µm–14 µm (taulukko 1). Edellä mainittuja aallonpituusalueita käytetään hyperspektraalisessa kuvantamisessa (8).

TAULUKKO 1. VIS- ja IR-aallonpituusalueiden säteilyalueet

<u>Spektrialue</u>	<u>Säteilyalue</u>
VIS	380 nm – 780 nm
NIR	700 nm – 1100 nm
SWIR	1100 nm – 3000 nm
MWIR	3 $\mu\text{m}$ – 5 $\mu\text{m}$
<u>LWIR</u>	<u>8 <math>\mu\text{m}</math> – 14 <math>\mu\text{m}</math></u>

Multispektrometriaa, josta käytetään tavallisesti nimitystä spektrometria, käytetään lähinnä UV- eli ultraviolettiaallonpituusalueella ja VIS- sekä NIR-aallonpituusalueella. Multispektrometriassa spektri muodostuu enintään muutamasta kymmenestä spektrikaistasta. Multispektrometriaa voidaan käyttää eri alkuaineiden kvalitatiiviseen ja kvantitatiiviseen mittaukseen. Kvalitatiivisen mittauksen avulla saadaan tietoa tutkittavasta aineesta, mitä se sisältää. Erottelu eri aineiden välillä on kuitenkin huomattavasti epätarkempaa kuin hyperspektrometrian avulla johtuen juuri multispektrisessä mittauksessa saatavasta vähäisemmästä tiedon määrästä.

Multispektrometrian avulla saadaan kuitenkin määritettyä melko tarkasti tarkasteltavan komponentin määrä näytteessä. Mittaustulosten tarkkuuteen vaikuttaa se, että mittauksissa käytetään usein käsin valmistettuja standardeja. Käsin tekeminen luonnollisesti lisää satunnaisvirheen mahdollisuutta, mikä lisää mittausepävarmuutta ja heikentää toistotarkkuutta. Näytteessä olevien komponenttien kvantitatiiviseen määrittämiseen käytetään apuna standardin lisäys-, sisäisen standardin- tai ulkoisen standardin menetelmää. Edellä mainittuihin menetelmiin ei tässä tutkimuksessa kuitenkaan perehdytä tarkemmin. (3.)

Mittauksissa voidaan käyttää apuna Lambert-Beerin lakia. Säteilyn osuessa aineeseen pienenee säteilyn intensiteetti sen kulkiessa aineen läpi. Transmittanssi kertoo aineen läpi menneen säteilyn määrän, joka lasketaan kaavasta 2.

$$T = \frac{I}{I_0}$$

KAAVA 2

missä

$T$  on transmittanssi,

$I$  näytteen läpi menneen säteilyn intensiteetti ja

$I_0$  näytteeseen osuneen säteilyn intensiteetti (3).

Transmissio  $T$  % puolestaan ilmaisee aineen läpi menneen intensiteetin prosentuaalisesti.

Kullakin aineella säteilyn intensiteetin pieneneminen on ominainen ja vaikuttaa aineesta läpi menneeseen säteilyn määrään, aallonpituuden ja ainekerroksen paksuuden lisäksi. (3.)

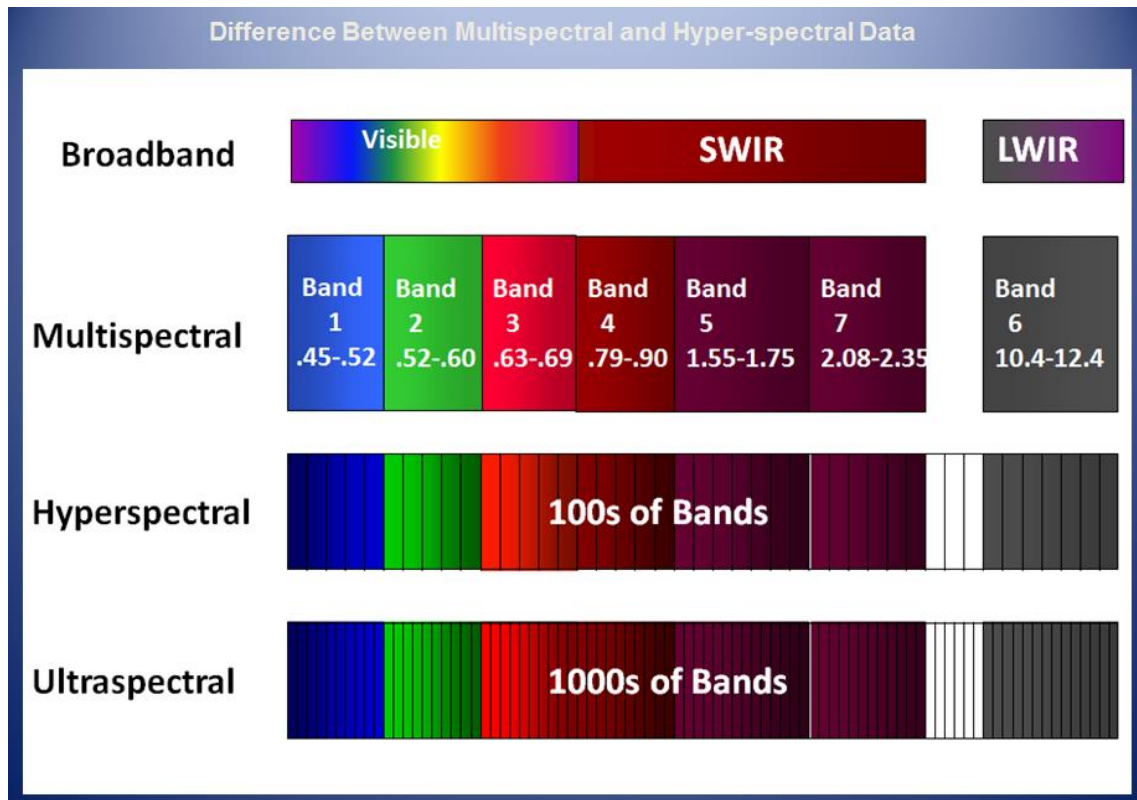
### 2.3 Multi- ja hyperspektrometrian eroavaisuuksia

Multispektrometrejä on monenlaisia, ja niitä voidaan käyttää kaasujen, nesteiden ja kiinteiden aineiden tutkimiseen. Usein näyte tulee kuitenkin esikäsitellä sopivaan muotoon, eikä sitä voi mitata sellaisenaan. Nesteitä voidaan tutkia esimerkiksi sellaisella multispektrometrillä, joka sisältää valon lähteen, monokromaattorin, näytepaikan, valomonistinputken, vahvistimen ja tulostimen. Valon lähde toimii säteilylähteenä, se voi olla esimerkiksi volframilamppu tai deuteriumlamppu. Monokromaattori puolestaan valikoi tulleesta säteilystä sen aallonpituuden tai kapean aallonpituuskaistan, jota mittauksessa halutaan käyttää. Monokromaattori on usein hila. Hilan laadun määrittää hilan kaistaleveys. Mitä kapeampi kaistaleveys on sitä parempi on hilan resoluutio. Toisaalta kohina

saattaa samalla lisääntyä. Näytepaikkaan puolestaan asetetaan mitattava näyte. Valomonistimessa valo osuu valomonistinputken fotokatodille, joka aiheuttaa valosähköisen ilmiön. Tämän seurauksena irtoaa elektroneita, jotka kulkeutuvat vahvistimille. Vahvistin vahvistaa valomonistinputkelta tuulleet elektronit saaden signaalin luettavaan muotoon. (3).

Hyperspektrometria tarkoittaa samaa asiaa kuin multispektrometria. Suurin ero niiden välillä on spektrikaistojen määrä, jota mittauksissa käytetään. Hyperspektraalisia mittalaitteita on monenlaisia, ja ne valmistetaan niiden käyttökohteiden mukaan. Erona multispektrometreihin on se, että samaa mittalaitetta voidaan usein käyttää kaikissa aineen olomuodoissa olevaan kohteeseen. Tarkempi esimerkki hyperspektraalisesta mittalaitteesta esitellään luvussa 5.

Verrattaessa multispektrometriaa hyperspektrometriaan voidaan hyperspektrometrian avulla mitata aineen spektraalisia ja kemiallisia koostumuksia huomattavasti tarkemmin kuin multispektrometriaa käyttäen. Hyperspektrin data sisältää sekä spatiaalisen että spektraalisen tiedon mitattavasta materiaalista, joka voi olla kiinteä, nestemäinen tai kaasu. Hyperspektrometriassa spektri koostuu sadoista spektrikaistoista, kun taas multispektrisessä mittauksessa spektri koostuu maksimissaan muutamista kymmenistä kaistoista. Erot spektrikaistojen määrässä on kuvattu havainnollisesti kuvassa 2. Hyperspektrometrian avulla on mahdollista erotella esimerkiksi kaasuseoksesta tai nesteestä, kuten viemäriverdestä, yksi erillinen komponentti. Korkearesoluutioinen spektri näyttää tarkasteltavan kohteen ominaisuudet, jotka ovat kullekin aineelle ominaisia ja joita ei voida nähdä multispektraalisessa datassa. (8.)

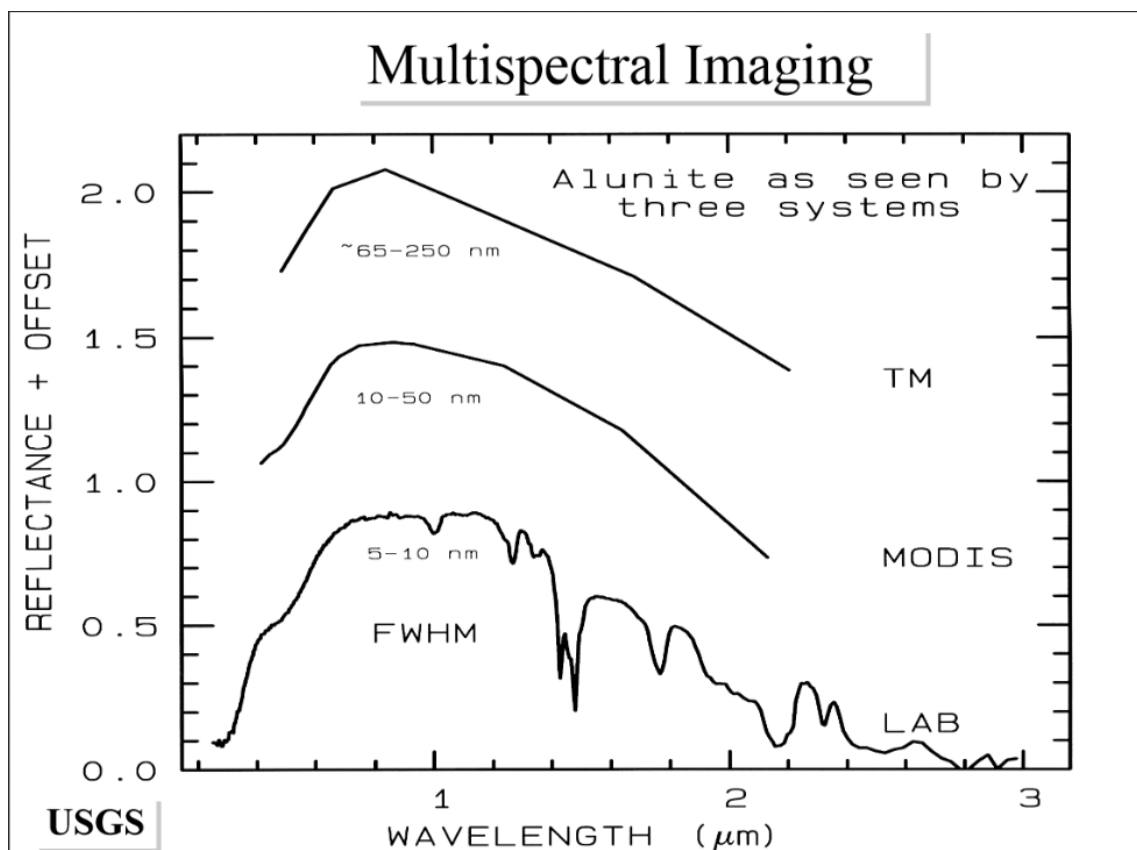


KUVA 2. Multi- ja hyperspektraalisen kaistojen ja leveyksien eroavaisuudet (8)

### 3. HYPERSPEKTRAALINEN KUVANTAMINEN

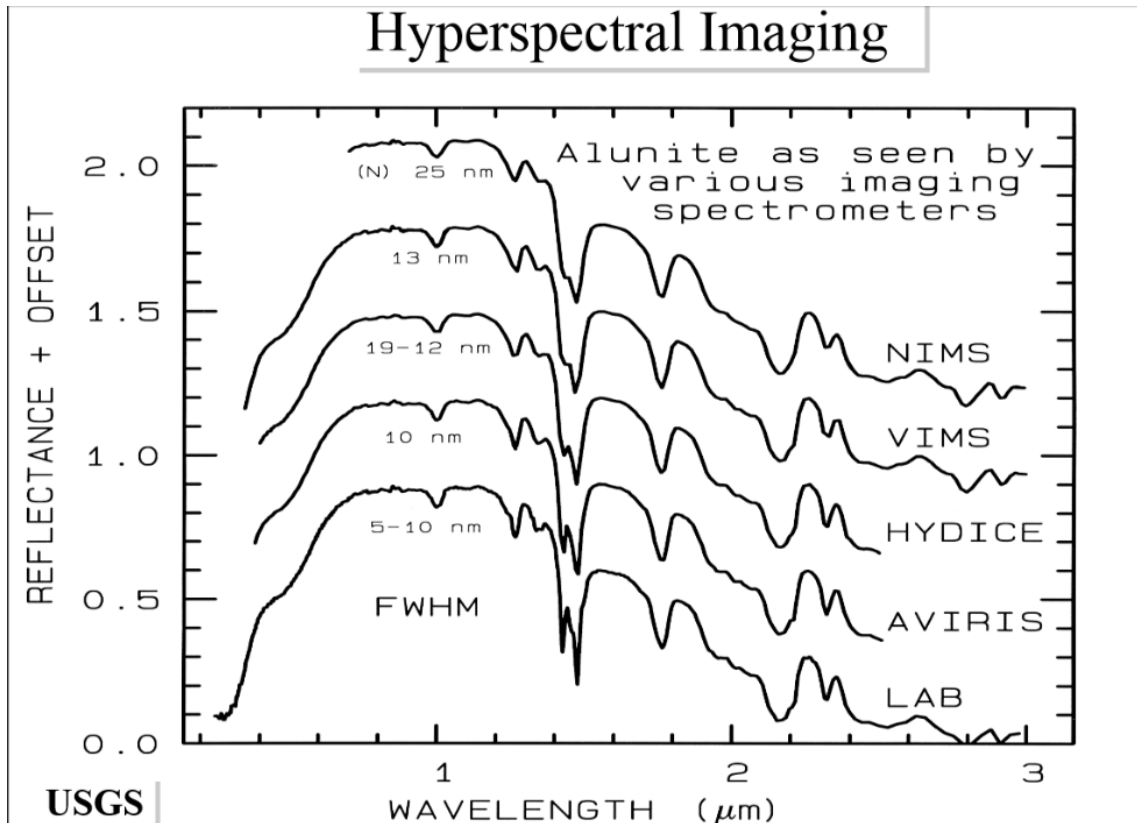
Hyperspektraalisen kuvantamisen avulla saatuja spektrejä voidaan käyttää eri komponenttien tunnistamiseen ja erityispiirteiden luonnehtimiseen eri olomuodossa olevista aineista. Tämä perustuu kullekin aineelle ominaiseen sormenjälkeen, jonka jokainen alkuaine tai yhdiste sisältää. Kaasuilla on useita ominaisia absorptio-ominaisuuksia niiden spektrisormenjäljessään, mikä tekee tunnistuksen mahdolliseksi.

Yksi ero multispektraalisessa ja hyperspektraalisessa kuvantamisessa on kuvantuotto. Multispektraalisessa kuvantamisessa spektraalinen erotuskyky on huonompi, joten kuvantamisesta saatava data on vähäisempää ja saatu data ei ole niin informatiivista (kuva 3). (8.)



KUVA 3. Esimerkki multispektraalisesta spektristä (8)

Hyperspektraalisessa kuvantamisessa saatava data on jatkuva spektri. Jatkuva spektri saadaan siten, että jokainen pikseli ylitetään jatkuvana sekvenssinä. Pikselit ovat otoksia useasta kapeasta kuvasta tietyssä spatiaalisessa paikassa spektrikuution sisällä (kuva 4). Datakuution muodostumisesta kerrotaan tarkemmin luvussa 5.1. (8.)

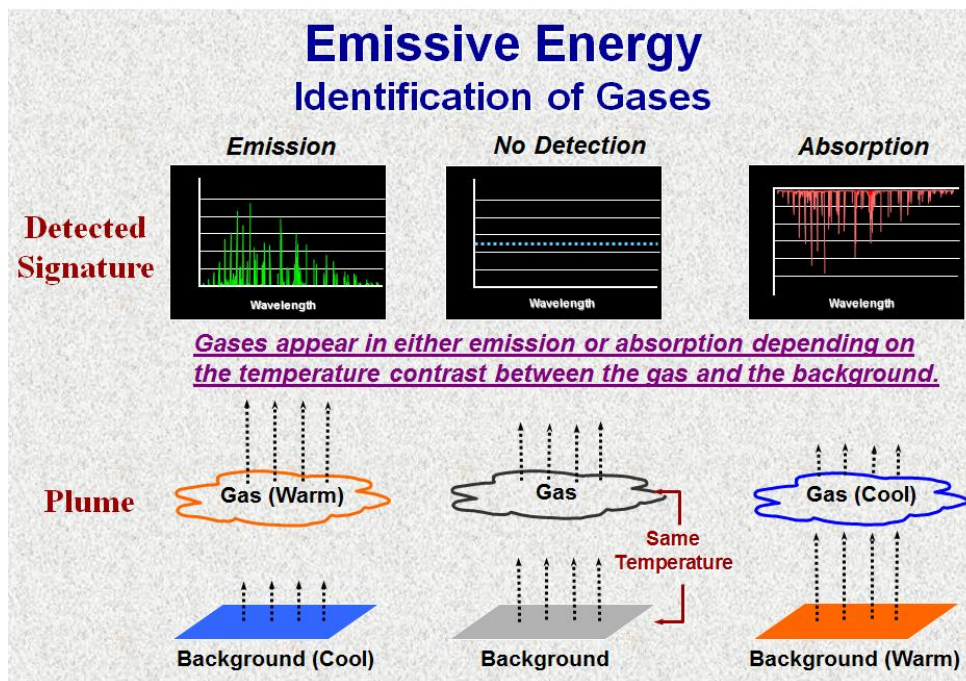


KUVA 4. Esimerkki hyperspektaalisesta spektristä (8)

Kuvantamisessa saatua dataa voidaan tulkita joko aineen absorptiosta tai emissiosta. Absorptio voidaan mitata aineeseen kohdistetun valon heijastuksesta. Heijastuvuus ja emissiivisyys riippuvat tutkittavan materiaalin aallonpituudesta ja molekyyleistä. Absorptiota tapahtuu aallonpituusalueella 0,38–3  $\mu\text{m}$  ja emissiota aallonpituusalueella 7–14  $\mu\text{m}$ . Seka-alue, jossa tapahtuu sekä absorptiota että emissiota on 3–5  $\mu\text{m}$ . (8).

### 3.1 Kaasujen tulkitseminen terminaali-alueella hyperspektrisen kuvantamisen avulla

Yksi tärkeimmistä ominaisuuksista, johon hyperspektraalista kuvantamista voidaan soveltaa, on kaasujen tulkitseminen ja niiden erottelu toisistaan. Kaasut joko emittoivat tai absorboivat säteilyä. Jotta saadaan aikaiseksi kaasujen emissiota tai absorptiota termaali-alueella, tulee kuvattavan kaasun ja taustan välillä olla lämpötilaeroa. Kaasun ja kaasun taustan lämpötilaero määrää sen, tapahtuuko absorptiota vai emissiota kaasusta sensorille. Taustan ollessa kylmempi kuin kaasu saadaan absorptiospektri. Taustan ollessa puolestaan lämpimämpi kuin kaasu saadaan emissiospektri. Mikäli taustan ja kaasun välillä ei ole lämpötilaeroa, ei emissiota eikä absorptiota voida nähdä spektrissä ja se tekee kaasun tunnistuksen mahdottomaksi (kuva 5). Seka-alueella kaasu sekä emittoi että heijastaa säteilyä, mikä mahdollistaa hyvin spesifiseen kaasujen erotteluun. (8.)



KUVA 5. Kaasun ja taustan välisen lämpötilaerojen vaikutukset säteilyyn (8)



### 3.2 Hyperspektraalisen kuvantamisen sovellusmahdollisuuksia

Hyperspektraalisella kuvantamisella on paljon erilaisia sovellusmahdollisuuksia. Näitä ovat muun muassa geologia, maa- ja metsätalous, lääketiede, jätteiden käsittely sekä sotilaalliset käyttökohteet. Tyypillisiä sotilaallisia sovelluksia on esimerkiksi sotilaiden naamioituminen taustaansa jäljittelemällä kasvien spektraalista sormenjälkeä. Taustakasveilla ja kasveja jäljittelevillä materiaaleilla näkyy molemmilla spektrissä niin kutsuttu punainen reuna eli red edge. Red edge näkyy spektrissä siten, että VIS- ja NIR-aallonpituusalueen rajakohta-alueella spektriviiva nousee jyrkästi. Hyperspektraaliset sensorit käyttävät sekä NIR-että SWIR-aluetta tunnistamaan naamioituja materiaaleja taustakasveista. Luonnon kasveissa on huomattavia eroja, kun verrataan luonnonkasveista valmistettuja häivemateriaaleja ja niiden spektraalista sormenjälkeä toisiinsa. Eroavaisuus voi olla esimerkiksi kosteusero. (8.)

Korkea spektraalinen erotuskyky mahdollistaa selkeän Red edgen ominaisuuksien tunnistamisen terveistä kasveista. Nuutuneet ja sairaat kasvit näkyvät korkeamman heijastavuuden spektrissä SWIR-alueella. Lisäksi nuutuneen tai sairaan kasvin klorofyllin pitoisuus muuttuu, ja se näkyy NIR- ja SWIR-alueella spektrissä. Terveet kasvit absorboivat sekä sinisellä että punaisella aallonpituusalueella. Kasveja voidaan erottaa toisistaan myös tutkimalla niiden tiettyjä solun osia, vesi-pitoisuutta ja pigmenttiä. (8.)

Yksi tärkeimmistä hyperspektraalisen kuvantamisen sovelluskohteista on eri mineraalien tunnistaminen ja niiden erottelu toisistaan. Hyperspektraalisen kuvantamisen avulla voidaan myös kartoittaa mineraalien ominainen kiderakenne. SWIR on käytetyin aallonpituusalue, kun kartoitetaan mineraaleja. (8.)

Hyperspektraalinen kuvantaminen on erittäin toimiva menetelmä, kun arvioidaan ympäristökatastrofeja. Paikallistettaessa esimerkiksi öljyvuotoa merivedestä, öljy voidaan tunnistaa käyttämällä muutamaa ominaista absorptiokaistaa ja näin tunnistaa hiilivety-yhdisteitä. Pienet määrät öljyä absorboivat herkästi 2,3  $\mu\text{m}$ :n aallonpituusalueella. Tähän on syynä hiilivety-molekyylien rotaatiotilat. Paksummat määrät öljyä absorboivat 1,73  $\mu\text{m}$ :n alueella, mikä on seurausta

hiilivetymolekyylin venymisestä eli niin kutsutusta venymistilasta. Öljyn kvantitatiivinen määrä voidaan myös arvioida hyperspektraalisen kuvantamisen avulla. (8.)

Lääketieteessä hyperspektraalisen kuvantamisen avulla voidaan erotella esimerkiksi väärennetyt lääkkeet aidoista lääkkeistä. Jätteiden käsittelyssä puolestaan erilaiset jätteet voidaan erotella toisistaan. Eri sovellusmahdollisuuksia on valtavasti. (8.)

## 4. HYPERSEKTRAALIKUVANTAMISEN HAASTEET

Hyperspektraalisella kuvantamisella on lähes rajattomasti sovellusmahdollisuuksia, mutta samalla se tuo valtavasti haasteita mukanaan. Laboratorioolosuhteissa haasteet ovat vähäisemmät verrattaessa luonnon olosuhteisiin. Laboratoriossa kuvantamisen olosuhteet ovat stabiilimmat, ja näin ollen haasteet liittyvät valaistukseen ja mittalaitteen kokoamiseen sekä komponentteihin, jotka aiheuttavat datan vääristymiä. Ulkona kuvattaessa ja erityisesti ilmakehän kuvasta saatuun dataan ja sen oikeellisuuteen liittyy huomattava määrä epästabiiliutta ja -varmuutta.

Hyperspektraalisen mittalaitteen valmistuksessa otetaan huomioon dataa vääristäviä tekijöitä ja ne pyritään minimoimaan eri keinoin. Lisäksi on kehitelty erilaisia datan korjausmenetelmiä, jossa luonnon olosuhteista johtuvia vääristymiä voidaan korjata.

### 4.1 Signaalikohinasuhde

Yksi dataan vaikuttava tekijä on signaalikohinasuhde SNR, jolla tarkoitetaan spektraalisessa mittalaitteessa esiintyvän hyötysignaalin ja kohinasignaalin tehojen suhdetta. SNR lasketaan kaavasta 3.

$$SNR = \frac{\text{Signaali}}{\text{Kohina}}$$

KAAVA 3

missä

SNR on signaalikohinasuhde (9).

Mitä suurempi SNR on, sitä paremmin signaali on havaittavissa. Samalla signaalia häiritsevää kohinaa on vähemmän. Signaalin määrä on yksi vaikeimmista parametreista, kun tehdään kalibrointeja spektraalisille mittalaitteille. Signaalin

määrä ja laatu riippuvat kolmesta muuttujasta, jotka ovat valaistusolosuhteet, optiikan transmissio ja detektorin kvanttihyötysuhde. Signaaliin laatuun vaikuttaa monenlaista kohinaa, joita ovat Dark noise eli pimeävirran kohina, Photon noise eli fotoneista aiheutuva kohina ja Read noise eli lukukohina. (10).

Mittauksissa pyritään maksimoimaan kohteesta mitattu signaali ensisijaisesti kasvattamalla valaisun tehoa ja toissijaisesti nostamalla integrointiaikaa. Kohinan minimoimiseksi kuvia otetaan mahdollisimman paljon ja otetuista kuvista lasketaan keskiarvokuva.

SNR vaikuttaa kuvan tarkkuuteen suoraan, joten SNR on tärkeä havaintojen laadun mittari. Himmeitä kohteita havaittaessa on yleistä, että otetaan useita lyhempiä valotuksia yhden pitkän sijaan. SNR:n kannalta yksi pitkä valotus on aina kuitenkin parempi kuin useampi lyhyt valotus, sillä jokaisella lukukerralla kuvaan tulee lisää lukukohinaa. (11).

#### **4.1.1 Pimeävirran kohina, fotonikohina ja lukukohina**

Pimeävirran kohina aiheutuu atomien lämpövärähtelystä johtuvista elektroneista, jotka havaitaan signaalina. Yleensä kohina aiheutuu siitä, että pimeävirran kohinan määrä vaihtelee pikselistä toiseen. Kohinan seurauksena kuva on kohinainen, jolloin kuvan himmeitä kohtia on vaikea tunnistaa. Tyypillisesti pikselit jaetaan kohtuullisen pienen pimeävirran pikseleihin ja niin sanottuihin kuumiin pikseleihin, joissa pimeävirta on huomattavan suuri. Pikseleissä olevaa pimeävirtaa ei voida muuttaa, mutta pimeävirta voidaan vähentää tuloksista ottamalla pimeäkuvia. Pikselien pimeävirta vähennetään jokaiselta pikseliltä erikseen kuva kerrallaan. (12, s. 25, 40.)

Fotoneista johtuvalla kohinalla puolestaan tarkoitetaan luonnollista vaihtelua fotonivuossa. Tämä tarkoittaa sitä, etteivät fotonit saavu detektorille tasaisin väliajoin vaan satunnaisesti (14, s. 10). Fotonien tasaista saapumista detektorille parantaa se, jos niitä saapuu detektorille paljon. Fotonien suuri määrä vähentää kohinaa ja samalla tasoittaa fotonien aikaväliä, kuinka ne saapuvat detekto-

rille. Havaittujen fotoninen lukumäärä on suoraan verrannollinen integraatioaikaan ja havaittuun taajuusväliin. Kohinan määrä puolittuu, kun integrointiaika kasvaa nelinkertaiseksi. Tämän vuoksi integraatioajalla on huomattava vaikutus kohinan määrään. (13, s.1, 3).

Detektorille kertyneet elektronit muutetaan havaittavaksi jännitteeksi ja muutetaan luettavaan muotoon A/D-muuntimessa. Datan lukemisessa kameralta muodostuu aina lukukohinaa, jota ei voi jälkikäteen poistaa. Vaikka lukukohina olisikin melko vähäistä, siitä voi olla haittaa, sillä lukukohina voi esimerkiksi leikata pois kaikkein heikoimmat signaalit. Kameran ominaisuudet vaikuttavat huomattavasti siihen, kuinka paljon lukukohinaa esiintyy. Kuvien määrä ja valotusaika vaikuttavat lisäävästi lukukohinan määrään. (14, s. 10.)

#### **4.1.2 Valaistusolosuhteet ja detektorin kvanttihyötysuhde**

Valaistusolosuhteet vaikuttavat saadun datan tarkkuuteen ja SNR:oon. Valaistusolosuhteet pyritään saamaan mahdollisimman tasaisiksi. Tasaisen valon voi saada aikaiseksi laboratorio-olosuhteissa integroivalla pallolla, jonka sisäpinta on pinnoitettu muovipohjaisella synteettisellä polymeerilla. Integroivan pallon valaistus on peräisin halogeenilähteestä. Sen etuna on jatkuva ja riittävä teho aallonpituusalueella 380 nm:stä 2500 nm:iin. Mikäli valaistusolosuhteet ovat heikot tai epätasaiset, myös kuvasta saatu informaatio on vähäisempää ja kuva on epätarkempi. Tämän vuoksi luonnon olosuhteissa pyritään kuvaamaan mahdollisimman aurinkoisella ja selkeällä ilmalla.

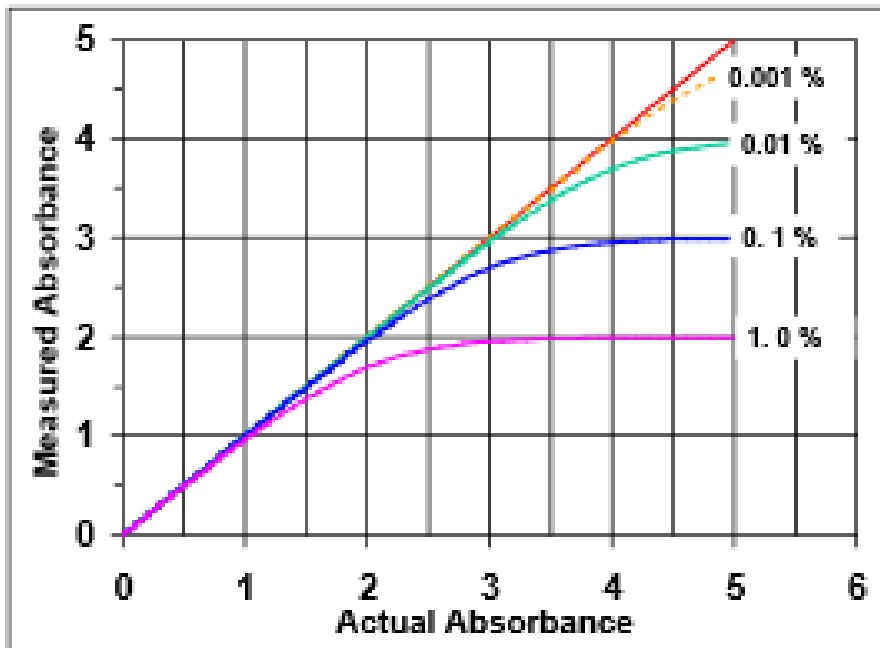
Kvanttihyötysuhde kuvaa detektorin herkkyyttä havaita siihen osuvien fotonien määrää. Kvanttihyötysuhde ja valotus ovat suoraan verrannollisia toisiinsa nähden. Mikäli valon määrä on pieni, detektorille saapuvien fotonien määrä on myös pienempi. Tämä puolestaan lisää fotonikohinaa, joka huonontaa SNR:ta. (15.)

## 4.2 Hajavallo

Pääasiallinen virheiden lähde hyperspektrissä on hajallaan ja virheellisesti kuvannettu optinen säteily. Se sisältää sekä spektraalisen että spatiaalisen hajavalon. Hajavallo on erittäin tavallinen ongelma kaikenlaisessa kuvaamisessa, mutta samalla hyvin vaikeasti poistettavissa. Hajavallo on optisissa pinnoissa sironnutta valoa joltain toiselta aallonpituudelta, jota ei sillä hetkellä tarkastella, ja sironnut valo näkyy tarkasteltavalla aallonpituudella. (11.)

Hajavalloa on monenlaista. Valon siroamisesta aiheutuu hajavalloa. Valoa myös emittoituu komponenteista. Lämpösäteily aiheuttaa elektromagneettista säteilyä, joka näkyy hajavalona. Erityisesti IR – alueen optiset laitteet ovat alltiita lämmölle. Spatiaalinen hajavallo on yleensä datan laatua heikentävä. Hajavalon vaikutuksia datan laatuun on kuvattu kuvassa 6. Mitä kirkkaampi kohde on, sitä enemmän tapahtuu valon siroamista. Tämä johtuu siitä, että tällöin on enemmän siroavia fotoneja. (11.)

Hajavalon kerrannaisvaikutuksia tulee linseistä, hilasta ja kameran kennon suojalasista. Heijastuksenestopinnoitteiden avulla hajavalloa saadaan huomattavasti poistettua. Pinnoitteet voivat kuitenkin sisältää naarmuja ja optiset materiaalit voivat sisältää myös mikroskooppisen pieniä ilmakuplia ja epäpuhtauksia. Nämä valmistuksessa muodostuneet epätäydellisyydet lisäävät hajavalloa. Hyvälaatuisissa materiaaleissa edellä mainittuja ongelmia on harvoin, joten niiden aiheuttamilta vääristymiltä välttyä hankkimalla mahdollisimman laadukkaita optisia komponentteja. Lisäksi hajavalloa saadaan poistettua rajaamalla mustalla maalilla linssien ja peilien heijastus- ja läpäisy-pintaa. Mittalaitteen rungon pinta pyritään saamaan myös mahdollisimman himmeäksi, jotta valon heijastumista tapahtuisi mittalaitteen sisäpinnoilta mahdollisimman vähän. (11.)



KUVA 6. Kuva havainnollistaa kuinka paljon hajavalo vääristää tuloksia (16, s. 15)

### 4.3 Ilmakehän vaikutus

Ilmakehä koostuu kuudesta eri kerroksesta. Troposfääri on alin kerros, jossa on yleensä sääilmiöt ja -muutokset. Troposfääri ulottuu maanpinnalta noin kymmenen kilometrin korkeuteen. Tällä korkeudella ilmakehä on tiheintä ja sen vaikutus säteilyn etenemiseen on voimakkainta. Troposfäärin lämpötila laskee ylöspäin mentäessä ja samalla paine laskee. Suurin osa lentokoneista tehtävistä kuvauksista tehdään kymmenen kilometrin korkeudella tai sen alapuolella. (17.)

Ilmakehässä esiintyy tiheys- ja lämpötilavaihteluita, jotka aiheuttavat turbulenssia. Turbulenssi huonontaa kuvan terävyyttä. Kuvan terävyyttä mitataan puolivoleveydellä FWHM. Erilaiset hiukkaset vaikuttavat valon kulkuun. Luotettavien mittaustulosten saamiseksi on tunnettava hiukkasten koon lisäksi myös kuinka hiukkasten koko mahdollisesti muuttuu, kun ilmakehän suhteellinen kosteus muuttuu. Hiukkasten muoto ja kemiallinen koostumus tulee myös tietää, jotta tiedetään hiukkasten vaikutukset valon kulkusuuntaan ja voimakkuuteen.

Säteilyn läpäisykyky riippuu sen aallonpituudesta. Aallonpituudella on suuri merkitys säteilyn läpäisyyn ilmakehässä.

Ilmakehä koostuu muun muassa pienistä partikkeleista eli aerosoleista, kuten pölystä ja vesipisaroista sekä molekyyleistä. Vesihöyryllä sekä kaasuista hapella, hiilidioksidilla ja otsonilla on suurimmat vaikutukset ilmakehän optisiin ominaisuuksiin. Happi vaikuttaa erityisesti absorptiokaistalla, joka on lähellä 760 nm:a. Pilvet ovat enimmäkseen vesihöyryä, joten kuvaukseen pyritään valitsemaan mahdollisimman pilvetön päivä. Meri, maaseutu ja kaupunkialue vaikuttavat myös vahvasti ilmakehän koostumukseen. Ilmakehän vaikutuksesta muodostuvat virheet jaetaan radiometrisiin ja geometrisiin virheisiin. (18, s. 517–518.)

#### **4.3.1 Geometriset ongelmat**

Geometrisia virheitä ovat optiikasta ja kuvausolosuhteista johtuvat vääristymät, joita pyritään ehkäisemään ennen kuvausten aloittamista. Kuvaamista ennen tehdään arvio lento- ja kuvausolosuhteista. On otettava huomioon muun muassa tuulen nopeus, auringon kirkkaus ja korkeus sekä kuvattava kohde. Kuvaus on hyvä tehdä mahdollisimman tyyneellä ilmalla, sillä voimakas tuuli hankaloittaa lentonopeuden pitämistä stabiilina. Lentokoneen kallistukset sekä nopeuden ja korkeuden muutokset aiheuttavat geometristä vääristymää. Kallistukset ja korkeuden muutokset voidaan rekisteröidä GPS-laitteella ja virheet voidaan korjata jälkiprosessoinnilla. (11.)

Ennen kuvaamista voidaan myös käyttää menetelmiä, jossa hyödynnetään ilmakehän simulointiohjelmistojen valmiita ilmakehämalleja. Tällainen menetelmä voi olla esimerkiksi sellainen, jossa luodaan tapauskohtaiset ilmakehämallit sääennusteiden ja säätietojen pohjalta. Ilmakehässä olosuhteet voivat kuitenkin muuttua hyvin nopeasti, mikä tekee niiden ennustamisen ja mittaamisen hankalaksi.

Lentonopeus vaikuttaa integrointiajan valintaan. Hidastamalla lentonopeutta saadaan lisättyä integrointiaikaa. Lentonopeutta ei luonnollisesti voida hidastaa



loputtomiin, sillä lentokone tarvitsee tietyn lentonopeuden pysyäkseen ilmassa. Integrointiaika ja kuvien määrä ovat liitoksissa toisiinsa. Kuvia pyritään ottamaan mahdollisimman paljon sekuntia kohden, jotta saadaan mahdollisimman hyvä SNR. Integrointiaikaa valittaessa ongelmana on, että toiseen suuntaan lennettäessä integrointiaika voi olla sopiva suhteessa kuvien oton määrään, mutta lennettäessä vastakkaiseen suuntaan lennon nopeus voi muuttua ja integrointiaika suhteessa kuvien määrään ei enää olekaan sopiva. Optiikasta johtuvia geometrisiä virheitä käsitellään geometrisen kalibroinnin yhteydessä luvussa 5.3. (11.)

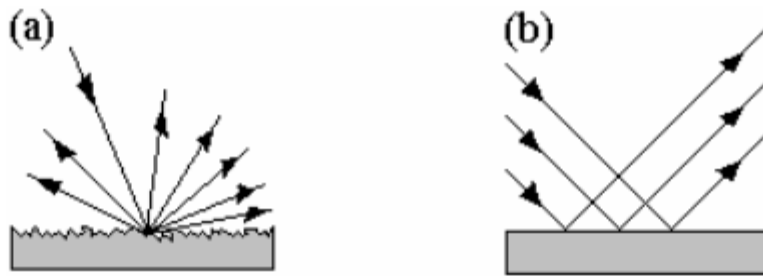
#### **4.3.2 Radiometriset ongelmat**

Radiometrisellä korjauksella pyritään saamaan instrumentin havaitsema säteily vastaamaan maastosta heijastunutta ja emittoitunutta säteilyä. Mikäli järjestelmä on radiometrisesti kalibroitu, saadaan signaalista laskettua reflektanssin eli heijastumisen lisäksi esimerkiksi kohteen lämpötila LWIR-alueella. Sensorille tulevaan radianssiin eli säteilytehoon vaikuttavat ilmakehän optiset ominaisuudet, kuten transmittanssi, sironta ja emissio. Näiden vaikutusten poistaminen eli ilmakehäkalibrointi on välttämätöntä tarkkojen tulosten saamiseksi. (11.)

Eri materiaalit heijastavat ja absorboivat eri tavalla auringon valoa. Heijastuksen sekä absorption suuruudet vaihtelevat eri aallonpituuksilla. Väliaine eli ilmakehä ja siinä olevat kaasut ja aerosolit vaikuttavat sirottamalla ja absorboimalla säteilyä, joten dataan tulee tällöin vääristymiä. Radiometriset virheet voivat olla esimerkiksi heterogeenisen ilmakehän aiheuttamia. Näitä vääristymiä voidaan korjata ilmakehäkorjauksen avulla. Radiometrinen korjaus on erittäin tärkeää, kun vertaillaan keskenään eri alueita tai eri ajankohtana otettuja kuvia. (11.)

Maastossa tehty hyperspektraalinen kuvantaminen perustuu auringosta saapuneen ja kohteesta heijastuneen valon havainnointiin. Säteilyn intensiteetti riippuu säteilyn heijastus- ja tulokulmasta. Luonnonmateriaalit heijastavat säteilyä kukin omalla tavallaan suhteessa säteilyn heijastus- ja tulokulmiin. Luonnonkoh-

teissa tapahtuu yleensä diffuusi heijastuminen eli säteily kimpoaa niistä kaikkiin ilmansuuntiin (kuva 7). (19, s. 17.)



KUVA 7. a) Diffuusiheijastus b) Peiliheijastus (19, s 18.)

#### 4.3.3 Valon sironta

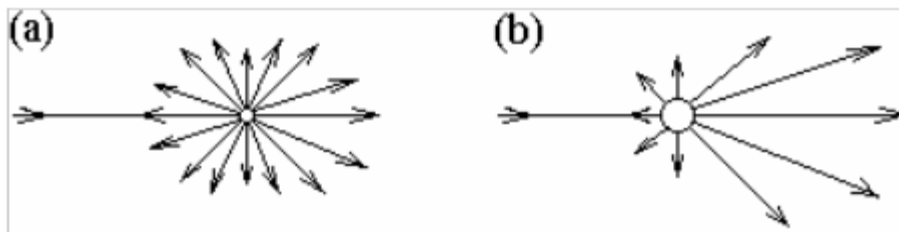
Valon siroamista tapahtuu jo ilmakehässä johtuen ilmakehässä olevista kaasusta ja aerosoleista (19, s. 18). Säteilyn ominaisuudet muuttuvat sen kulkeutuessa ilmakehässä ja vuorovaikuttaessa ilmakehän hiukkasten kanssa. Säteilyn nopeus, taajuus, intensiteetti ja suunta voivat muuttua, mitkä puolestaan aiheuttavat radiometristä virhettä. Virheen suuruus riippuu säteilyn aallonpituudesta ja ilmakehän ominaisuudesta kuvaushetkellä (19, s. 18). Yhtenä ongelmana on myös se, että ilmakehän kaasut ja aerosolit ovat sekoittuneet keskenään ja niiden määrät saattavat muuttua kuvausten aikana radikaalistikin esimerkiksi ilmavirtausten vuoksi.

Säteilyn lyhyet aallonpituudet reagoivat voimakkaammin ilmakehän hiukkasten kanssa kuin pitkät aallonpituudet. Näkyvä valo, erityisesti sininen valo siroaa voimakkaasti ilmakehässä. Ilmakehäkorjauksella pyritään poistamaan ilmakehän säteilyn aiheuttama vaikutus kohteen ja instrumentin välillä. (19, s. 19.)

Eniten sirontaa tapahtuu ilmakehän alaosissa, jossa on paljon aerosoleja ja ilmakehä on tiheämpää. Sironnan laatu ja merkitys riippuu myös hiukkasen suuruudesta suhteessa sironneen säteen aallonpituuteen. Suurimmaksi osaksi molekyylit, mutta myös hyvin pienet ilmakehän hiukkaset näkyvän valon aallonpi-

tuusalueella aiheuttaen Rayleigh-sirontaa. Rayleigh`n sironnassa sirottavan partikkelin koko on pienempi kuin säteen aallonpituus. Tällaisia säteilyn hajottajia ovat esimerkiksi happi- ja typpimolekyylit. Säteilyn aallonpituus vaikuttaa sironnin määrään siten, että valon lyhimät aallonpituudet siroavat eniten. Tästä johtuu esimerkiksi taivaan sininen väri. (19, s. 19).

Mie-sirontaa tapahtuu, kun säteily osuu pöly- ja savuhiukkasiin. Hiukkaset ovat samaa suuruusluokkaa säteilevän aallonpituuden kanssa. Mie-sirontin säteily siroaa kaikkiin suuntiin (kuva 8). Suurin osa säteilystä jatkaa kuitenkin eteenpäin. Rayleigh-sironnassa säteily siroaa myös kaikkiin ilmansuuntiin. (19, s. 20.)



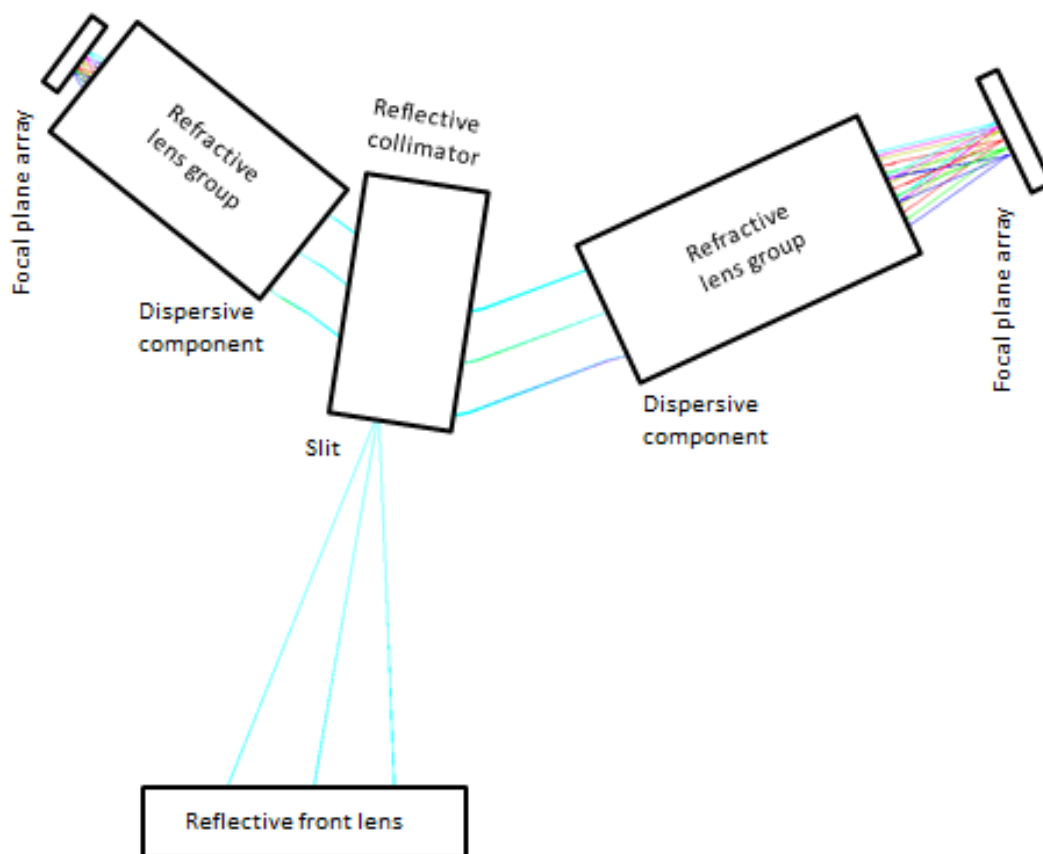
KUVA 8. a) Rayleigh`n sironta b) Mie-sironta (19, s. 20)

Valikoimatonta sirontaa tapahtuu, kun hiukkaset ovat kooltaan moninkertaisia verrattuna niihin osuneen säteilyn aallonpituuteen. Suuria hiukkasia esiintyy ilmakehän alaosissa. Sumu esimerkiksi johtuu niiden sirottamasta säteilystä. Valikoimaton sironta sisältää kaikkia auringon säteilyn aallonpituuksia yhtä paljon. Tämän vuoksi pilvet ja sumu ovat väriltään valkoisia ja harmaita. (19, s. 20.)

## 5. AISA FENIXIN KALIBROINTI

Tämän opinnäytetyön empiirinen osuus koostuu Aisa Fenixin kalibroinnista ja validoinnista. Aisa Fenixin kalibrointi sisältää spektraalisen, radiometrisen ja geometrisen kalibroinnin sekä puoliarvoveyden mittauksen.

Kuvassa 9 on esitetty yksinkertaistettu rakennekuva Aisa Fenixistä. Spektraalisen mittalaitteen tarkempaa rakennetta ja sen toimivuutta ei käydä tässä opinnäytetyössä syvemmin läpi tietosuojallisista syistä. Aisa Fenixillä voi kuvata ja kerätä dataa 380 nm:stä 2500 nm:iin. Mittalaite on rakennettu siten, että kuvassa 9 vasemmalla oleva puoli mittaa VNIR-aallonpituusaluetta ja oikealla oleva puoli mittaa SWIR-aallonpituusaluetta. Aisa Fenixin optiikka koostuu useista peileistä, slitistä ja kahdesta hilasta sekä prismasta. Etuoptiikka on rakennettu siten, että se on yhteinen VNIR:llä ja SWIR:llä. Valo ohjataan tuloraon kautta mittalaitteeseen. Mittalaitteessa valon säteet jaetaan VNIR- ja SWIR-aallonpituusalueisiin. Säteet kulkevat kameran kennolle hilasta ja prismasta muodostetun komponentin kautta.



KUVA 9. Yksinkertaistettu kuva Aisa Fenix mittalaitteen rakenteesta (11)

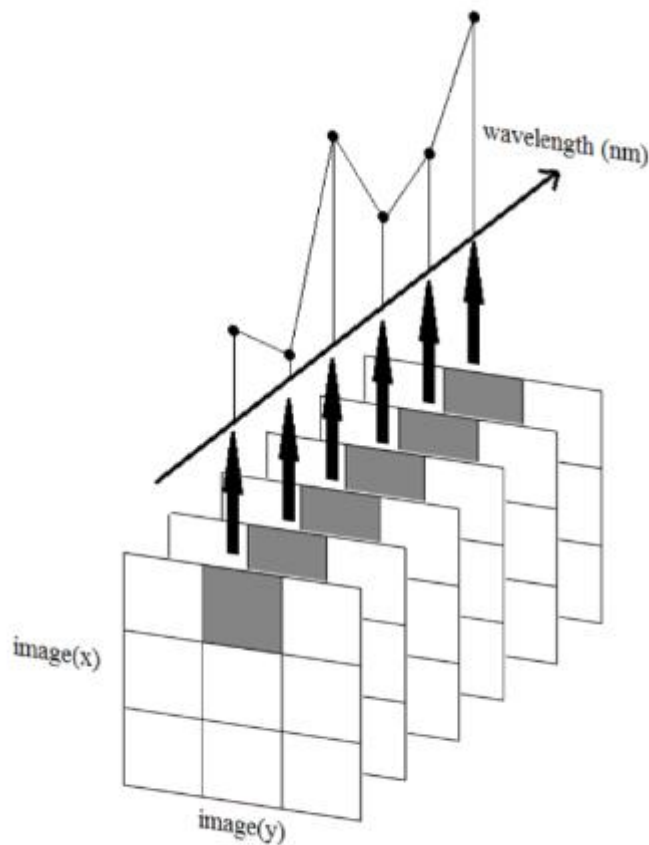
Aisa Fenixiä käytetään pääasiallisesti kaukokartoitukseen, joka tehdään lentokoneesta käsin. Aisa Fenixin avulla voidaan hankkia tietoa monipuolisesti johtuen sen laajan aallonpituusmittausalueen vuoksi.

### 5.1 Aisa Fenixin kuvaustekniikka

Harmaasävykuva muodostuu kahdesta eri kerroksesta, ja se on kaksiulotteinen. Kuva sisältää valkoisen ja mustan välillä eri sävyvaihtoehtoja jokaisella kennon pikselillä. Harmaasävykuvassa jokaiselle pikselille on annettu numeroarvo, joka määrittää pikselin kirkkauden. Täysvärikuva eli RGB-kuva (red, green, blue)

muodostuu puolestaan kolmesta eri kerroksesta, jotka sisältävät eri värisävyjä jokaisella kennon pikselillä. Hyperspektrikuva voi sisältää esimerkiksi 256 kerrosta, mikä on huomattava ero niin kutsuttuun normaalikuvaan. Tämän vuoksi hyperspektrikuvasta saatava tieto on huomattavasti infomatiivisempaa kuin normaalilla kuvaamisella saatu informaatio. Harmaasävykuvan tapaan täysväri- ja hyperspektrikuvan kukin pikseli saa numeroarvon, joka määrittelee kunkin pikselin värin. (20).

Hyperspektrikuva on kolmiulotteinen datakuutio, joka kuvaa jotain halutun kokoista ja tiettyä kohtaa maastosta. Kuva muodostuu kahdesta tilaulottuvuudesta ja lisäksi aallonpituusarvoista kuvatulla alueella (kuva 10).

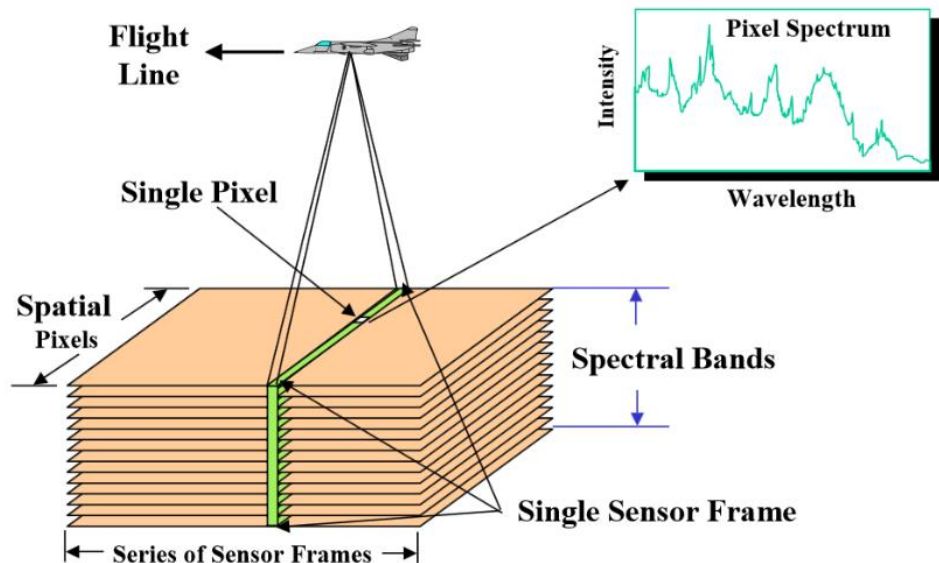


*KUVA 10. Hyperspektrikuva muodostuu spektraalisesta ja spatiaalisesta tilaulottuvuudesta sekä aallonpituusarvoista (pushbroom tekniikka) (10, s. 3)*

Erilaisia hyperspektraalisen kuvantamisen kuvaustekniikoita, joilla saadaan aikaiseksi datakuutio, ovat staring-, whiskbroom- ja pushbroom-tekniikat. Staring-tekniikalla datakuutio saadaan aikaiseksi muuttamalla spektraaliulottuvuutta ja aallonpituutta spatiaaliulottuvuuden ollessa vakio. Kuvauksen ongelmana on se, että kameran tulee pysyä kuvauksen aikana paikoillaan ja lisäksi kuvausolosuhteet eivät saa muuttua. Whiskbroom-tekniikalla datakuutio muodostuu siten, että kuvattavaa kohdetta tai kameraa liikutellaan molemmissa spatiaaliulottuvuuksissa spektraaliulottuvuuden pysyessä vakiona. Whiskbroom-tekniikassa käytetään liikuteltavaa peiliä, joka tekee tekniikkaa käyttävistä kameroista epäluotettavampia. (21, s. 15–16.)

Aisa Fenixillä kuvattaessa käytetään pushbroom-tekniikkaa, joka on esitelty yksinkertaisesti kuvassa 11. Pushbroom-tekniikan avulla saadaan kuvattua samanaikaisesti kaikki datakuution ulottuvuudet. Hyvä ominaisuus pushbroom-tekniikassa on se, ettei se ole herkkä esimerkiksi sensorin tai kuvattavan kohteen liikkeille. Sensorissa ei ole liikkuvia osia, mikä lisää kuvauksen vakautta ja luotettavuutta. Lisäksi kuvaus on huomattavasti nopeampaa pushbroom-tekniikalla kuin staring- tai whiskbroom-tekniikalla. Kuvassa 11 esitellään pushbroom-tekniikka tarkemmin. (20, s. 15–16.)

# Hyperspectral Sensing



KUVA 11. Pushbroom- tekniikka (11.)

## 5.2 Aisa Fenixin säätö ennen kalibrointia

Ennen varsinaista kalibrointia säädettiin Aisa Fenixin optiikka siten, että piirto-  
kyky on mahdollisimman tarkka. Säätäminen tarkoittaa sitä, että mittalaitteen  
optiset osat kohdistetaan yhdensuuntaisiksi. Mikäli säätämistä ei tehdä, kerran-  
naisvaikutukset raakadataan ovat huomattavia.

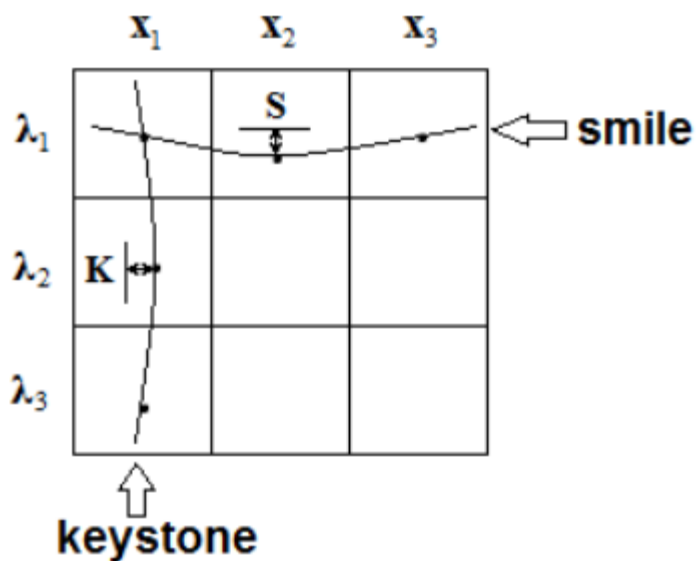
Ensin optiikkaa säädetään kohdilleen spektraalisessa suunnassa. Tulorako tu-  
lee asettaa kohtisuoraan kennoa kohden, jotta spektriviivat saadaan suoraan.  
Spektriviivojen suoruus voidaan todeta ohjelmalla, jossa tilt-arvo kuvaa spektri-  
viivojen vinoutta. Spektriviivojen vinous aiheuttaa spektraalista taipumista, mikä  
vääristää tuloksia. Taipumista voi tapahtua joko ylös- tai alaspäin tai se voi  
vaihdella. Spektraalinen taipuminen on yksi tärkeimmistä mittalaitteen suoritus-  
kykyä kuvaavista ominaisuuksista.



Taipumista voi tapahtua myös spatiaalisessa suunnassa. Spatiaalista taipumista on erityisen hankalaa poistaa, mikäli sitä huomataan esiintyvän itse kalibroinnin aikana. Spatiaalinen taipuminen aiheutuu myös siitä, jos optiikka ei ole yhdensuuntainen.

### 5.3 Spektraalinen kalibrointi

Kalibroinnit tehtiin laboratorio-olosuhteissa. Spektraalinen kalibrointi tehtiin mitalaitteelle ensimmäisenä. Spektrikalibroinnissa määritettiin kunkin pikselirivin keskiarvoaallonpituus. Pikseliruudukossa spektriakseli on pystysuunnassa ja spatiaaliakseli vaakasuunnassa (kuva 12). Spatiaaliakseli käsittää koko laitteen kaistan sisältäen kaikki pikselit tietyllä aallonpituudella.



KUVA 12. Kuvassa smile kuvaa spektraalista taipumista ja keystone spatiaalista taipumista (10, s. 18)

Spektraalisen taipumisen numeerinen arvo lasketaan kaavasta 4.

$$S_{\lambda} = \pm \frac{\max(\lambda) - \min(\lambda)}{2} \quad \text{KAAVA 4}$$

missä

$\max(\lambda)$  on maksimiaallonpituusarvo spektraaliakselilla ja

$\min(\lambda)$  minimiaallonpituusarvo spektraaliakselilla (10).

Spatiaalisen taipumisen numeerinen arvo lasketaan kaavasta 5.

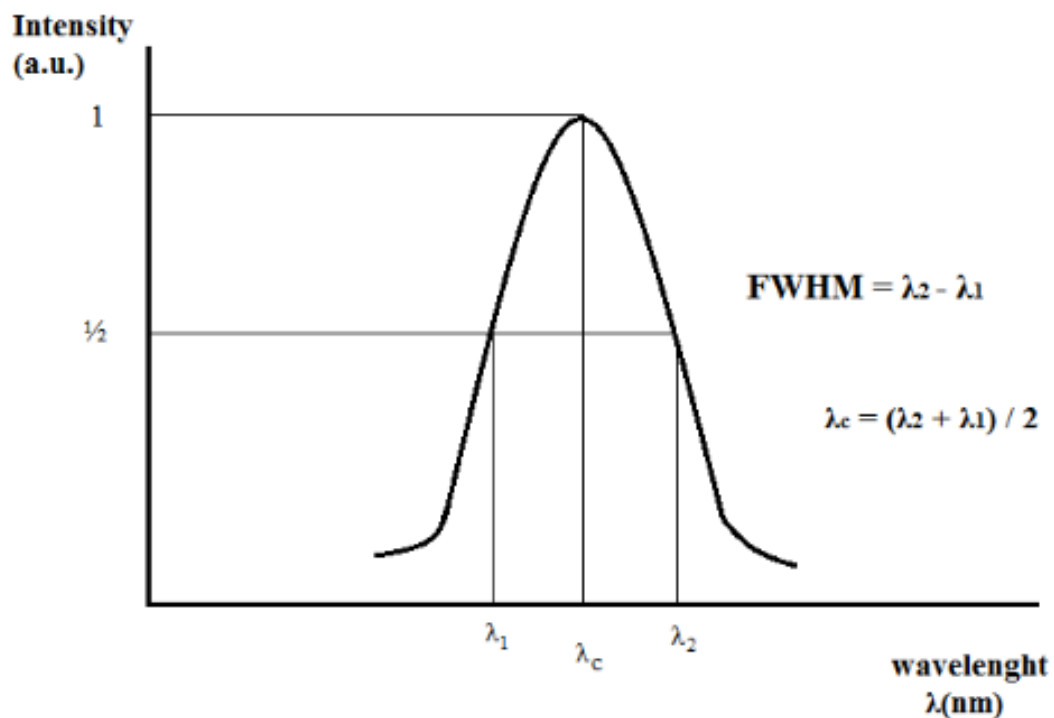
$$K_{\lambda} = \pm \frac{\max(x) - \min(x)}{2} \quad \text{KAAVA 5}$$

missä

$\max(x)$  on maksimiarvo spatiaaliakselilla ja

$\min(x)$  minimiarvo spatiaaliakselilla (10, s. 18).

VNIR-aallonpituusalueen spektriviivat nähdään Hg-Ar-lampun avulla. Spektrin kalibroinnissa valittiin kuvasta tasaisesti noin kymmenen spektriviivaa. Ennen kuvien ottoa on erittäin tärkeää fokusoida kuva teräväksi siten, että kuva saapui mahdollisimman tarkkana kennolle. Spektriviivoista otettiin Hg-Ar-lampulla kymmenen kuvaa. Mitä enemmän kuvia otetaan sitä parempi SNR saadaan. Hg-Ar- ja pimeäkuvia otettiin sama määrä. Hg-Ar-kuvista laskettiin keskiarvo ja saadusta datasta vähennettiin pimeävirrän vaikutus vähentämällä pimeäkuvien keskiarvo. Gaussin käyrä sovitettiin jokaiseen valittuun spektripiikkiin ja sen avulla etsittiin kalibrintipiikin maksimipuoliarvo  $\text{FWHM}_{\text{MAX}}$  jokaiselle piikille. Puoliarvo lasketaan kuvassa 13 esitetyn kaavan mukaisesti.



KUVA 13. Puoliarvon mittausperiaatteet. (10, s. 19)

Kullekin aallonpituudelle löytyy taulukosta tunnetut referenssiaallonpituudet. Taulukosta katsottiin kullekin mitatulle pikselille referenssiaallonpituus. Saatuihin arvoihin sovitetaan toisen, kolmannen tai neljännen asteen polynomifunktio. Polynomien aste valitaan siten, että saadaan minimoitua keskimääräinen poikkeama referenssarvoihin verrattuna. Mitattu data sovitettiin neljännen asteen polynomiin.

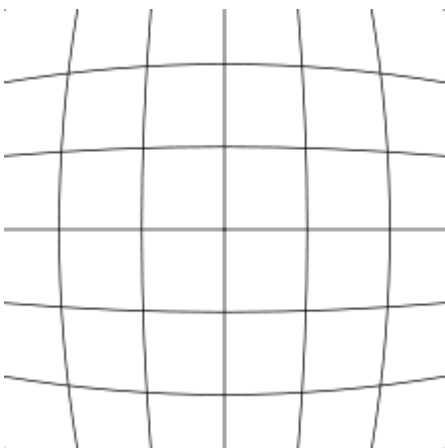
SWIR-aallonpituusalueen spektriviivat 2000–2500 nm näkyvät ksenon- ja elohopealampun avulla. Spektriviivoista otettiin kuvia kuten edellä VNIR-aallonpituusalueella ja niistä vähennettiin pimeäkuvien keskiarvo.

Sovitusmenetelmän ongelmana on piikkien esiintyvyyden epätasaisuus kennolla, sillä piikkejä tulisi esiintyä tasaisesti koko kennon alueella. Siellä missä spektriipiikkejä on eniten, tarkkuus on parempi. Käytetyillä lampuilla aallonpituusalueella piikkejä on huomattavasti vähemmän, sillä piikit ovat painottuneet aallonpituusasteikon alkupäähän.

Spektraalisessa kalibroinnissa on otettava huomioon myös se, ettei signaalia ole liikaa. Mikäli valon määrä suhteessa integrointiin on liian suuri, osa spektriipiikistä ylivalottuu ja piikkiin ei voida tarkasti sovittaa Gaussin käyrää.

#### 5.4 Geometrinen kalibrointi

Aisa Fenixin etuoptiikka on suunniteltu siten, että objektiivin kuva on kaareva. Datatulkinnan lopputulokseen etuoptiikasta johtuva vääristymä ei vaikuta, mutta sillä saadaan vähennettyä tarvittavia peilejä ja näin etuoptiikka saadaan pienempään kokoon. Kuvauksia tehtäessä dataan tulee etuoptiikasta johtuen vääristymä ja se saadaan korjattua geometrisen korjauksen avulla. Hyvä vertailuesimerkki tälle vääristymälle on tynnyrivääristymä (kuva 14), jota esiintyy tyyppillisesti laajakulmaobjektiiveilla. Vääristymästä johtuen maapikselien paikat muuttuvat eri kohtaan kuvassa, missä ne todellisuudessa ovat. Geometrisella korjauksella maapikselit siirretään kuvassa oikeille paikoilleen. Geometristä kalibrointia tehtäessä on tärkeää, että luodaan tilanne, jossa mittauksen etäisyys vaikuttaisi olevan sama kuin lentäessä. Kollimoinnin avulla testilaboratorioon saadaan luonnollista tilannetta vastaava etäisyys.



KUVA 14. Havainnollistava kuva tynnyrivääristymästä (21)

Tehtäessä hyperspektraalista kuvaamista tarvitaan tieto, kuinka paljon maapikselin paikka poikkeaa sen todellisesta paikasta kennolla kunkin pikselin kohdalla. Tämä tieto saadaan tekemällä geometrinen kalibrointi. Ensin tehtiin mittaus kuvan taipumisen määrästä spatiaalisessa suunnassa. Aisa Fenixissä oleva tulorako on suora, mutta sille tuleva kuva on kaareva. Tuloraolle tulleesta kaarevasta kuvasta sovitettiin tulorakoon 21 pistettä ja niiden poikkeama tuloraosta mitattiin. Näistä poikkeamista laskettiin tulokset ja poikkeamat ilmoitettiin asteina, millimetreinä ja prosentteina. Lopullisessa raportissa on kennon jokaiselle pikselille oma korjaus, joka sovitetaan taipuneeseen kuvaan.

Seuraavaksi mitattiin kuvan vääristymä lentosuunnassa. Aisa Fenix asetettiin pöydän päälle, jonka kulmaa voitiin muunnella. Valo ohjattiin tuloraolle pienen reiän kautta. Reiästä tulleen valon kirkkain kohta etsittiin muuttamalla pöydän kulmaa. Kirkkaimmista kohdista laskettiin niiden poikkeama slitin todelliseen paikkaan verrattuna ja ne ilmoitettiin raportissa kuten spatiaalisen paikan poikkeavuus. Saatujen poikkeamien avulla saadaan laskettua jokaiselle pikselille lentosuunnassa maapikselin todellinen paikka.

## 5.5 Puoliarvomittaus

Puoliarvomittauksen eli FWHM:n avulla mitattiin mittalaitteen spektraalinen puoliarvoveveys. FWHM kertoo samalla resoluution laitteen jokaiselle spektrikanavalle erikseen. Mittaus tehtiin monokromaattorin avulla. Monokromaattorin lähtöportin aallonpituutta muutettiin ja näin saatiin jokaiselle aallonpituudelle mitattua oma FWHM.

FWHM tarvittiin myös tehdessä spektraalista kalibrointia, mutta tuolloin FWHM mitattiin ainoastaan kalibrointiin valituille piikeille. FWHM kertoo erinomaisesti spektraalisen mittalaitteen laadun. Puoliarvovevyyden mittaus tehtiin erikseen VNIR:lle ja SWIR:lle. Tämä johtui siitä, että VNIR ja SWIR tarvitsivat monokromaattoriin eri komponentit. Monokromaattorin lähtöportin aallonpituus mitattiin ja mitattuun signaaliin tehtiin Gaussin sovitus, josta määritettiin FWHM arvo kyseiselle kanavalle.

## 5.6 Radiometrinen kalibrointi

Radiometrisen kalibroinnin tarkoitus oli mitata jokaiselle kennon pikselille oma radiometrinen korjauskerroin. Mitatun datan radiometrinen korjaus poistaa tuloksista valaistuksen vaikutuksen. Radiometrinen mittausta ja siihen liittyvä korjaus tehtiin siten, että mitattiin laitteen vaste tunnetulla eli kalibroidulla radianssilähteellä, integroivalla pallolla. Integroivan pallon valaistusteho heikkenee ajan saatossa, joten integroivan pallon luminanssia eli kirkkautta ja sen heikkenemistä seurataan.

Korjauskerroin  $c$  saadaan laskettua kaavasta 6.

$$c = \frac{\bar{L}_\lambda \cdot t}{\hat{S}} \quad \text{KAAVA 6}$$

missä

$\bar{L}_\lambda$  on tunnettu radianssilähde ( $\mu\text{W} / \text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm}$ ),

$t$  integrointiaika (ms) ja

$\hat{S}$  pimeäkuvavähennetty mittaustieto (DN).

Kaavalla saadaan kalibroinnille SI-yksikkö  $c = \frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm}} \frac{\text{ms}}{\text{DN}}$  (10, s. 6, 23.)

Tehtäessä kuvantamista saadaan kohteesta kuvan jokaiselle pikselille signaalin määrä numeerisena arvona. Tämä numeerinen arvo saadaan muutettua yksikölliseen muotoon ratkaisemalla kaavasta 6 radianssilähde. Radiometrinen korjaus saadaan siis laskettua mitatulle datalle kaavasta 7.

$$\bar{L}_\lambda = c \frac{\hat{S}}{t} \quad \text{KAAVA 7}$$

missä

$\bar{L}_\lambda$  on mitattu radianssi (10, s. 6).

## 6. AISA FENIXIN VALIDOINTI

Validoinnin tarkoituksena oli testata Aisa Fenix mittalaitteen toimivuus ja luotavuus käytännössä. Validointi pyritään toteuttamaan ulkoilmassa mahdollisimman aurinkoisella ja tyynellä ilmalla ajankohtana. Tällöin radiometriset häiriöt ovat vähäisemmät kuin esimerkiksi sateisella tai tuulisella ilmalla. Lisäksi pyritään, että lämpötila olisi tunnetun ilmakehän irradianssimallin kanssa melko sama, sillä IR-alueella lämpötila vaikuttaa saatuun dataan. Vuodenaika otetaan myös huomioon lämpötilasta johtuen.

Mikäli kuvausolosuhteet ovat kovin sateiset ja pilviset, irradianssimalli, johon tuloksia verrataan, ei olisi luotettava. Irradianssimallin luominen on myös huomattavasti hankalampaa, sillä ilmassa olevien aerosolien ja kaasujen määrä muuttuu jatkuvasti epävakaan sään vuoksi. Epävarmuutta epävakaalla säällä tulee ilmankosteudesta, lämpötilasta, auringon valon määrästä ja aerosolien määrästä.

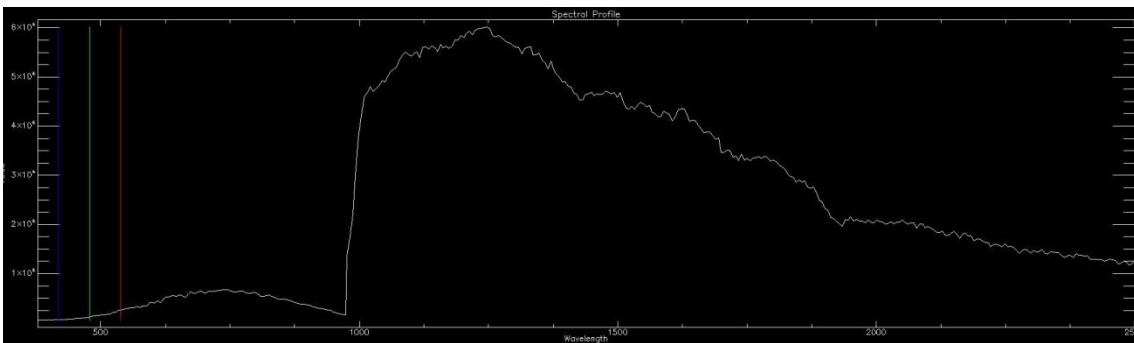
Saatuja tuloksia verrataan tunnettuun irradianssimalliin, joka vastaa kuvausolosuhteita mahdollisimman paljon. Mitattujen tulosten ollessa lähellä tunnetun irradianssimallin spektriä, voidaan todeta mittalaitteen avulla saatavan tiedon olevan luotettavaa. Mikäli poikkeamia tunnettuun irradianssimalliin esiintyy paljon, tulee mittalaite säätää ja kalibroida uudestaan.

### 6.1 Integroivan pallon radiometrinen korjaus

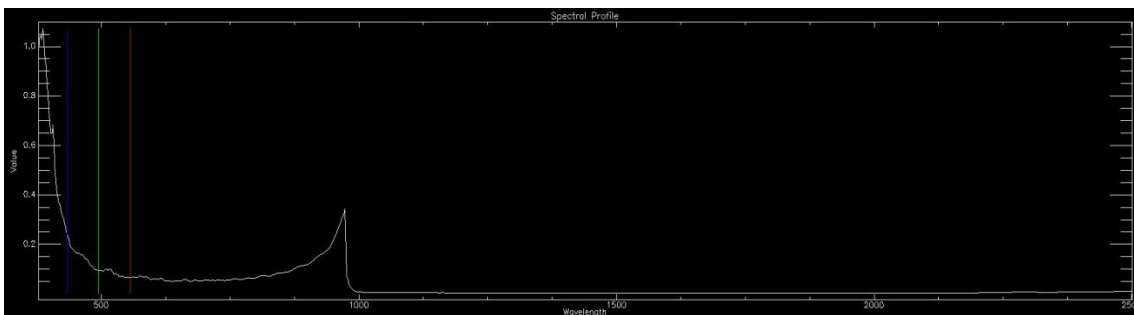
Ensimmäisenä tehtiin mittaus integroivan pallon vasteesta ja siitä saadulle raakadatalle tehtiin radiometrinen korjaus. Integroivan pallon lampun vaste saatiin mitattua sekä VNIR- että SWIR-aallonpituusalueelle ottamalla kuvia. Vasteen mittauksella tarkistettiin spektrin jatkuvuus tasaisena ilman virhettä VNIR- ja SWIR-aallonpituusalueiden muutoskohdassa. Muutoskohdan pitää olla mahdollisimman huomaamaton, jotta kuvauksista saatu data on mahdollisimman yhtenäinen.



Vaste mitattiin ottamalla sata kuvaa integroivan pallon lampulla. Pimeäkuvia otettiin sama määrä kuin integroivalla pallolla. Lampulla otettujen kuvien keskiarvosta vähennettiin pimeävirta vähentämällä pimeäkuva pikseli pikseliltä. Kuvista saadulle raakadatalle (kuva 15) laskettiin aiemmin radiometrisestä kalibroinnista saadulla korjauskertoimella arvo (kuva 16) jokaiselle pikselille erikseen. Lopullinen spektri (kuva 17) saatiin kertomalla raakadata korjauskertoimella.



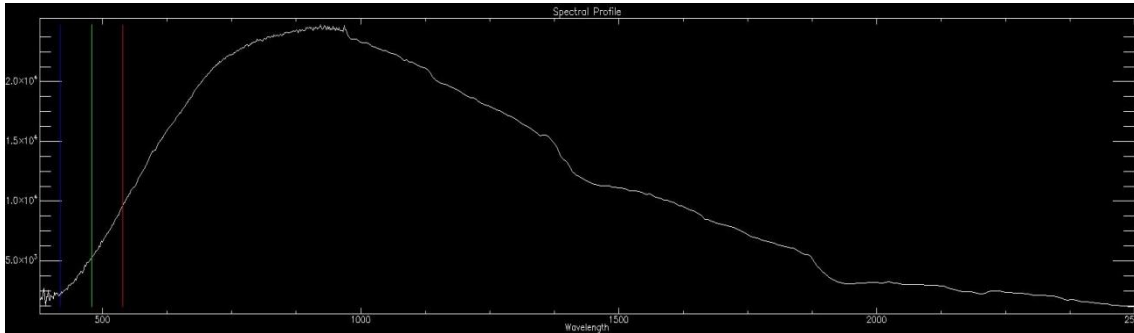
*KUVA 15. Kuvassa on esitetty integrointipallolampusta saatu vaste kullekin aallonpituudelle. Aallonpituusalue on esitetty kuvassa x-akselilla.*



*KUVA 16. Kuvassa on esitetty jokaiselle aallonpituusalueelle korjauskerroin. Aallonpituusalue on esitetty kuvassa x-akselilla.*

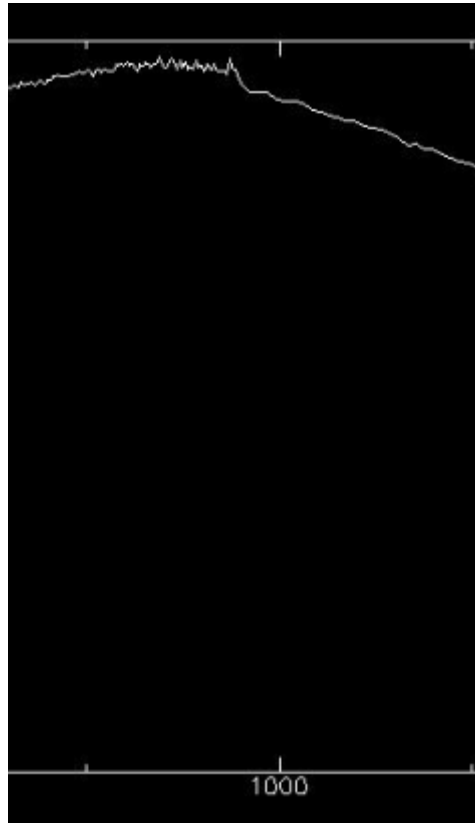
Lyhyemmillä aallonpituuksilla korjauskerroin on huomattavasti suurempi kuin pitkillä aallonpituuksilla. Tämä johtuu siitä, että kameroilla on erilaiset digitaaliset dynamiikat. VNIR-aallonpituusalueella integroivasta pallosta saatu vaste oli huomattavasti pienempi kuin SWIR-aallonpituusalueelta saatu vaste. Samaa integrointiaikaa tuli kuitenkin käyttää koko aallonpituusalueella, jotta vasteesta saatiin yhtenäinen spektri. Mikäli integrointiaikaa olisi nostettu, SWIR – aallonpi-

tuusalueella signaalia olisi ollut liikaa ja kuva olisi palanut puhki. Tällöin korjauskerroin olisi vääristynyt, mikä puolestaan olisi väärentänyt saatuja tuloksia. Kuvassa 17 on esitetty radianssikorjattu data.



*KUVA 17. Korjauskertoimen avulla saatu lopullinen data*

Kuvasta 18 nähdään, että VNIR- ja SWIR-aallonpituusalueiden muutoskohdassa 970 nm:n hyppäys on pieni ja läpäisee valmistajan asettaman rajan kanavien väliselle erolle.

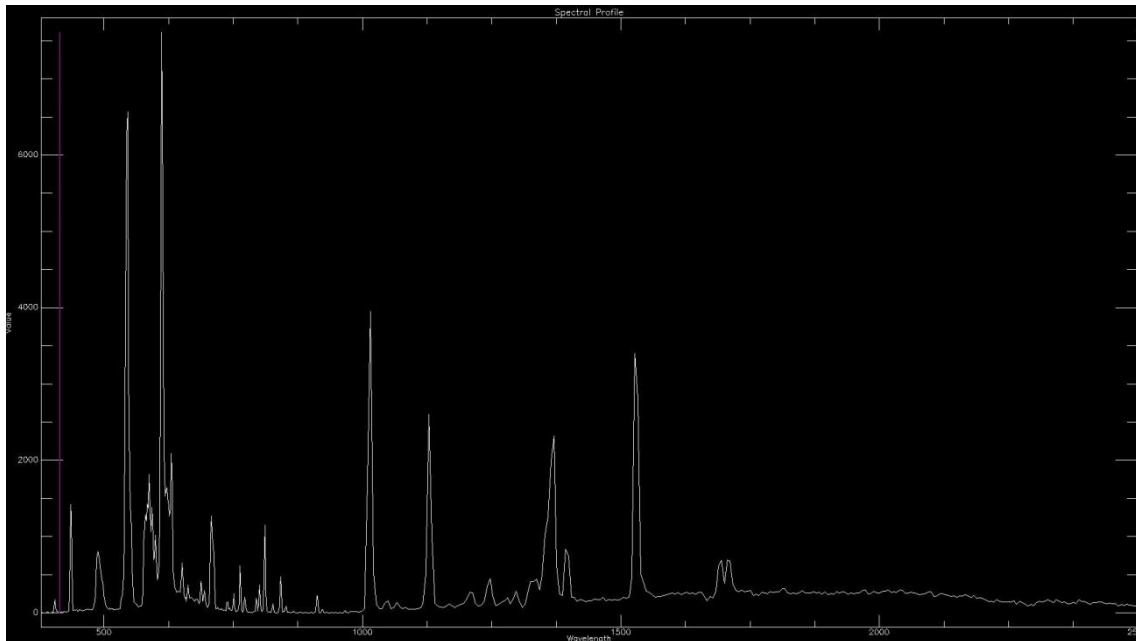


*KUVA 18. VNIR- ja SWIR aallonpituusalueiden muutoskohta*

Näin ollen kalibrointi oli onnistunut eikä mittalaitetta tarvinnut uudelleenkalibroida.

## 6.2 Kalibroinnin tarkistus

Seuraavaksi tarkistettiin tiettyjen tunnettujen spektriipiikkien paikat. Hg-Ar-lampun avulla saatiin paikannettua tunnetut elohopean ja argonin pääpiikit VNIR-aallonpituusalueella. Kuvassa 19 vaaka-akselilla on aallonpituus ja pysty-akselilla spektriipiikin vahvuus.

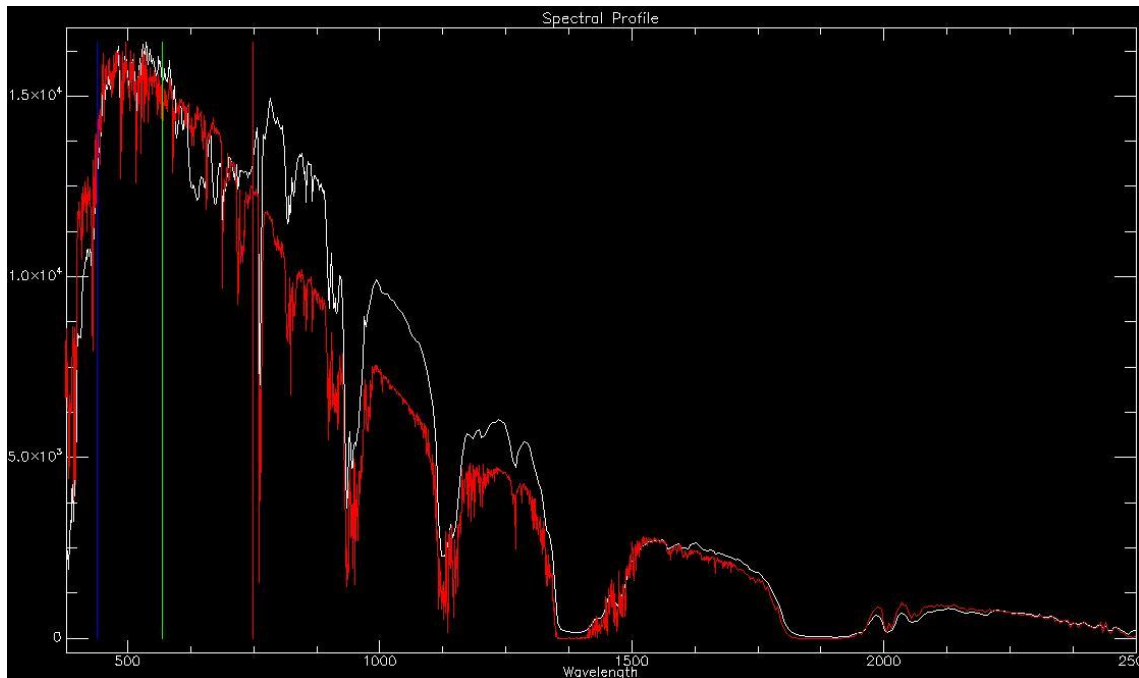


*KUVA 19. Kuvassa näkyy Hg-Ar – ja fluoresenssilampun avulla saadut elohopeapiikkien paikat.*

Piikit esiintyvät aallonpituuksilla 404 nm, 435 nm, 912 nm ja 965 nm. Fluoresenssilampun avulla saatiin näkyviin SWIR-aallonpituusalueelta tunnettuja piikkejä. Nämä piikit olivat aallonpituudet 1014 nm, 1128 nm, 1529 nm ja kaksoispiikki, joista toisen aallonpituus oli 1695 nm ja toisen 1711 nm. Kuvasta 19 nähdään, että piikin paikat osuivat kohdilleen eikä uudelleenkaliointia tarvinnut tehdä. Hyväksyttävä poikkeama piikkien paikoille olisi ollut VNIR-aallonpituusalueella noin 1 nm ja SWIR-aallonpituusalueella noin 3 nm.

### 6.3 Referenssimittaus

Validoinnin viimeisenä vaiheena oli referenssimittauksen tekeminen ulkoilmas-  
sa. Mittaus toteutettiin siten, että 43 cm x 43 cm kokoinen valkoinen referenssi-  
taulu, jonka heijastus on lähes sata prosenttia, vietiin noin 50 metrin päähän  
Aisa Fenix -mittalaitteesta. Mittalaitteella skannattiin kuva maisemasta. Valkoi-  
sesta referenssitaulusta saatua spektriä verrattiin standardiin ilmakehän irra-  
dianssimalliin. Tulokset ovat nähtävissä kuvassa 20.



*KUVA 20. Kuvassa valkoinen spektri on mitattu ja punainen spektri on standardi  
ilmakehän irradianssimalli (11)*

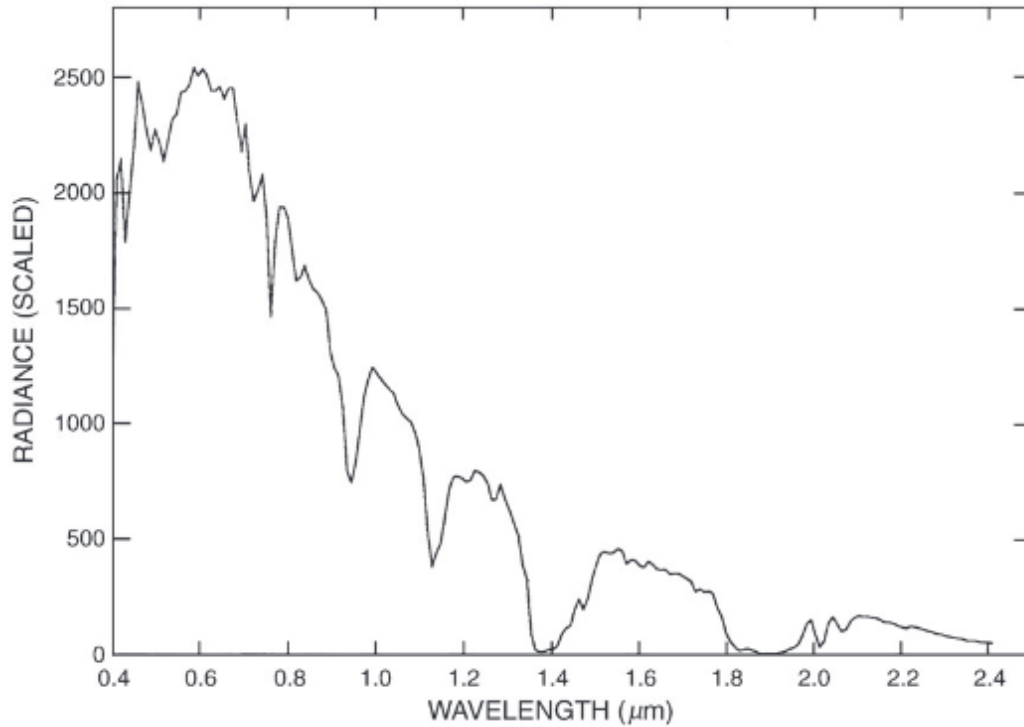
### 6.4 Validoinnin tulosten tarkastelu

Irradianssistandardina pidetään mallia, joka on auringon diffuusi säteily sekä  
diffuusi takaisinheijastuma maanpinnalta mitattuna tasolla, joka osoittaa suo-  
raan etelään 37 asteen kulmassa horisonttiin nähden (11). Tuloksia analysoita-

essa tarkasteltiin spektrien radiometrian ja spektrikäyrien yhteensopivuutta. Spektrejä tarkasteltaessa absorptiopiikkien paikkoja verrattiin keskenään. Kuvaa 20 tutkittaessa nähtiin, että mitattu ja standardispektri olivat keskenään melko samanlaiset. Mittauksessa saatu signaalikäyrä on hyvä. Absorptiopiikit olivat kohdillaan, mutta ne olivat jonkin verran epätarkemmat.

Epätarkkuus johtui siitä, että käytetty standardi ilmakehän irradianssimalli ei ollut sopiva vertailumalli tässä validoinnissa. Sääolosuhteet olivat kuvauspäivänä kylmät, mikä vaikuttaa erityisesti IR-aallonpituusalueella. Spektristä voidaan nähdä (kuva 20), että erityisesti juuri IR-aallonpituusalueella 1000 nm:stä eteenpäin spektrissä voitiin havaita epätarkkuutta standardispektriin nähden. Toisekseen kuvauspäivä oli pilvinen ja aurinko paistoi pilvien takaa heikosti. Pilvisyys vähensi luonnollisesti auringon säteiden määrää ja lisäsi ilmankosteutta ja sitä kautta häiritseviä aerosoleja ja kaasuja ilmakehässä.

Kun verrataan tehtyä referenssimittausta muihin absorptiokanaviin, joita referenssimittauksissa on saatu, absorptiokanavien tulisi esiintyä aallonpituuksilla 940 nm, 1140 nm, 1380 nm ja 1880 nm, missä näkyvät veden absorptiokanavat, 760 nm hapen absorptiokanava ja hiilidioksidin absorptiokanava aallonpituudella 2080 nm. Kuvassa 21 näkyy veden, hapen ja hiilidioksidin absorptiokanavat aallonpituusalueella 400–2500 nm. (18, s. 518.)



*KUVA 21. Veden, hiilidioksidin ja hapen absorptiokanavat aallonpituusalueella 400–2500 nm (18, s. 518)*

Tuloksia ei tarkastella tässä opinnäytetyössä tarkemmin numeroarvoilla tietosuojallisista syistä. Jokainen Aisa Fenix -mittalaite valmistetaan tilaustuotteena. Kalibroinnista ja referenssimittauksesta saadut tulokset ilmoitetaan vain asiakkaalle ja dokumentoidaan Specim Oy:n sisäiseen tietokantaan.

## 7. YHTEENVETO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tehdä kalibrointi ja validointi Aisa Fenix -mittalaitteelle sekä perehtyä kalibrointiin ja validointiin liittyviin haasteisiin teoreettisesti. Kalibroinnissa ja validoinnissa käytetty Aisa Fenix -mittalaite oli koottu ja optiikka säädetty valmiiksi valmistajan laatuvaatimusten mukaisesti.

Opinnäytetyöhön liittyvä empiirinen osuus alkoi siitä, kun optiikan tarkkuus testattiin testislitin avulla. Näin tarkistettiin, ettei tuloksissa esiinny spektraalista tai spatiaalista taipumista, joka vaikuttaa kaikkien muiden kalibrointien tuloksiin. Mittalaitteelle tehtiin spektraalinen, geometrinen ja radiometrinen kalibrointi sekä puoliarvomittaus FWHM. Kalibroinnin tulokset olivat hyviä, joten mittalaitteelle voitiin tehdä referenssimittaus.

Referenssimittaus toteutettiin Aisa Fenixille ulkoilmassa asettamalla 43 cm x 43 cm:n kokoinen valkoinen referenssitaulu noin 50 m:n päähän Aisa Fenix -mittalaitteesta ja skannaamalla kuva maisemasta referenssitaulua vasten. Referenssitaulun heijastusaste on lähes sata prosenttia. Saatua spektrikäyrää verrattiin standardiin ilmakehän irradianssimalliin. Mittauksen ja mallin spektraalinen vastaavuus oli hyvä, mutta IR-alueella ilmeni tasoeroa. Tämä osoittaa sen, ettei irradianssimalli ollut täysin soveltuva.

Referenssimittausta tehtäessä ilma ei vastannut standardia. Aurinko paistoi pilvien takaa heikosti, joten referenssitaulusta saatava vaste oli heikompi. Toisekseen pilvet vaikuttavat ilmassa esiintyviin kaasuihin ja aerosoleihin lisäävästi, mikä aiheuttaa auringon säteiden sirontaa ilmakehässä. Ilman suhteellinen kosteus oli pilvisyyden vuoksi standardiin verrattuna korkeampi, mikä vaikuttaa veden absorptiopiikkeihin. Ilman lämpötila oli myös kylmempi, mikä puolestaan vaikuttaa etenkin IR-aallonpituusalueella.

Referenssimittauksen haasteena on sen riippuvuus auringon valon määrästä ja mittaushetkellä olevasta säästä. Eri vuodenaikoina valaistus on erilainen ja ilmakehän koostumus erilainen. Aurinko paistaa eri korkeudelta ja eri kulmasta eri vuoden aikoina. Lisäksi talvella ja keväällä lisäheijastusta tulee lumesta. Yhtenä suurena haasteena onkin, kuinka valaistusolosuhteet saataisiin sellaisiksi,



että voitaisiin luotettavasti tehdä mittaus vuodenajasta ja auringon valaistuksesta ja sen säteiden tulokulmasta riippumatta.

Mikäli referenssimittauksia tehdään tulevaisuudessa edelleen ulkona, voitaisiin useammalle erilaiselle ilmalle tehdä oma ilmakehän irradianssimalli. Näihin irradianssimalleihin voitaisiin verrata referenssimittauksista saatuja tuloksia. Toisaalta tällaisten ilmakehämallien tekeminen olisi erittäin työlästä, sillä niissä tulisi ottaa huomioon useampi parametri, kuten ilman suhteellinen kosteus ja lämpötila. Tämä edellyttäisi taulukointia ja laskelmia, joissa eri parametrit olisi otettu huomioon yhtäaikaisesti. Nykyinen vertailumalli on käyttökelpoinen juuri sen vuoksi, että sitä voidaan käyttää aurinkoisella säällä, jolloin ilmakehä on suhteellisen stabiili ja tulosten vertaaminen vertailumalliin on luotettavaa.

Opinnäytetyön aihe oli erittäin mielenkiintoinen, sillä opinnäytetyössä pääsi hyödyntämään teoreettista tietoa suoraan käytäntöön. Työn haastavimpana osana oli saada kaikki teoreettinen tieto kalibrointiin ja validointiin liittyen rajattua mahdollisimman yhtenäiseksi ja tiiviiksi kokonaisuudeksi. Lisähaastetta opinnäytetyön tekemiseen toi myös kiireellinen aikataulu.

## LÄHTEET

1. Sähkömagneettinen säteily. Aalto yliopisto. Saatavissa: <http://foto.hut.fi/opetus/350/k01/luento1/sms.html>. Hakupäivä: 2.4.2015.
2. Silberberg, Martin. 2009. Chemistry The Molecular Nature of Matter and Change. New York: McGraw – Hill.
3. Kekarainen, Pirkko 2010. Oulun ammattikorkeakoulu. Luentomateriaalia kurssilta spektrometria 1, OAMK sisäinen tietokanta.
4. Shippert P. 2003. Introduction to hyperspectral image analysis, Online Journal of Space Communication, Issue No. 3: Remote Sensing of Earth via Satellite. Saatavissa: <http://spacejournal.ohio.edu/pdf/shippert.pdf>. Hakupäivä: 2.4.2015.
5. Karttunen, Hannu. Energiatila, perustila, viritystila. Turun yliopisto. Saatavissa: <http://www.astro.utu.fi/zubi/atom/estate.htm>. Hakupäivä: 15.4.2015.
6. Karttunen, Hannu. Emissio, emissioviiva. Turun yliopisto. Saatavissa: <http://www.astro.utu.fi/zubi/atom/emission.htm>. Hakupäivä: 15.4.2015.
7. Karttunen, Hannu. Absorptio, absorptioviiva. Turun yliopisto. Saatavissa: <http://www.astro.utu.fi/zubi/atom/absorpt.htm>. Hakupäivä: 15.4.2015.
8. Elowitz RM. 2012. Imaging spectroscopy (hyperspectral imaging). Saatavissa: <http://www.markelowitz.com/Hyperspectral.html>. Hakupäivä: 26.5.2015.
9. Poole I. Signal to noise, SNR. Saatavissa: <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/rf-noise-sensitivity/receiver-signal-to-noise-ratio.php>. Hakupäivä: 15.4.2015

10. Tuunanen, Mika. 2012. Calibration and verification of a sun-induced fluorescence spectral camera. Oulun yliopisto. Luonnontieteiden tiedekunta. Pro gradu –tutkielma. Saatavissa: Oulun Yliopiston kirjasto.
11. Specim Oy, sisäinen tietokanta.
12. Takalo. 2008. Luentomateriaalia. Turun yliopisto. Saatavissa: <http://users.utu.fi/takalo/luku6.pdf>. Hakupäivä: 13.4.2015.
13. Luentomateriaalia. Helsingin yliopisto. Saatavissa: [http://www.courses.physics.helsinki.fi/astro/havaitsevall/RA10\\_L2b.pdf](http://www.courses.physics.helsinki.fi/astro/havaitsevall/RA10_L2b.pdf). Hakupäivä 13.4.2015.
14. Honkanen, Riku. Majakivi, Antti. Nissinen, Juuso. Puikkonen, Markus. & Tervonen, Roosa. Mikrobitti. Saatavissa: <http://koti.mbnet.fi/andu/not/php/Fotometria.pdf>. Hakupäivä: 13.4.2015.
15. Karttunen, Hannu. Kvanttivyötysuhde. Turun yliopisto. Saatavissa: <http://www.astro.utu.fi/zubi/obs/qeff.htm>. Hakupäivä: 14.4.2015.
16. Strak, E. & Luchter, K. 2005. NIR instrumentation technology. N.I.R. News 16 (7), 13-16.
17. Ilmakehän kerrokset. 2010. Ilmatieteen laitos. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/ilmakeha-ja-saailmiot>. Hakupäivä: 22.5.2015.
18. Gao, B. Montes, M. Davis, C. & Goetz, A. 2007. Atmospheric correction algorithms for hyperspectral remote sensing data of land and ocean. Remote sensing of environment 113, 517-524.

19. Lumme, Juho. 2004. Kasvillisuuden sekä maaperän luokittelu ja analysointi hyperspektrikuvalta. Helsingin teknillinen korkeakoulu. Pro gradu – tutkielma. Saatavissa: [http://foto.hut.fi/publications/diplomityot/koko/lumme\\_juho.pdf](http://foto.hut.fi/publications/diplomityot/koko/lumme_juho.pdf). Hakupäivä: 2.4.2015
20. Itä-Suomen yliopisto, sisäinen tietokanta. Saatavissa: <http://cs.joensuu.fi/~franti/compress/kuvatyytit.html>. Hakupäivä: 21.4.2015.
21. Wikipedia. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Tynnyriv%C3%A4%C3%A4ristym%C3%A4>. Hakupäivä: 21.4.2015.