

Mat-2.177 Operaatiotutkimuksen projektiseminaari

Infrapunasensorin ja sensoriverkon mallintaminen

Loppuraportti

3.5.2007

Asiakas

Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos

Projektiryhmä

Juho Simpura, projektipäällikkö

Tapio Heimo

Jussi Kangaspunta

Tuomas Koskela

Antti Toppila

Tiivistelmä

Tässä työssä tarkastellaan infrapuna-alueella toimivan sensorin mallintamista ja siihen liittyviä keskeisiä aiheita ja ongelmia. Työssä esitellään keskeisimmät mallintamiseen liittyvät fysikaaliset ja tekniset kysymykset, joiden perusteella esitellään matemaattinen pohja simulaatiomallin toteuttamiselle. Työssä esitetään tähän pohjaan perustuva yksinkertainen ja helposti laajennettava matlab- malli käyttöliittymineen sensorijoukon mallintamiselle. Mallin toiminta osoitetaan joukolla tulosteita mallin tuottamista visualisoinneista eri tilanteissa. Lopuksi mallia tarkastellaan kriittisesti ja pohditaan mahdollisuuksia sen jatkokehittämiselle.

Sisältö

1	Johdanto	3
1.1	Lähtökohta	3
1.2	Tavoitteet	4
1.3	Käsittely	5
2	Kirjallisuuskatsaus	6
2.1	IR-sensorien sotilaallinen käyttö	6
2.2	IR-Sensorien tekniikka	7
2.3	Muutamia esimerkkejä sensoreista ja niiden käytöstä	10
3	IR-detektorin, väliaineen ja kohteen matemaattinen malli	13
3.1	Detektorin toiminta	13
3.2	Väliaineen vaikutus	13
3.3	Kohde	19
3.4	Optiikka	21
4	Mallin toteutus	21
4.1	Mallin käyttö	21
4.2	Optiikan mallinnus	23
4.3	Detektorin mallinnus	25
4.4	Väliaineen ja kohteen mallinnus	26
4.5	Visualisointi	28
5	Evaluointi ja sen tulokset	29
5.1	Alkuasetukset ja valitut parametrit	29
5.2	Tulokset ilman ilmakehän ja pilvien vaikutusta	29
5.3	Tulokset ilmakehän mallin kanssa	32
6	Loppupäätelmät	32
6.1	Mallin soveltuvuus	32
6.2	Kehitysmahdollisuuksia ja -tarpeita	38

1 Johdanto

1.1 Lähtökohta

Kuluvaan vuosisataan on jo ehditty kutsua sensorien vuosisadaksi¹: kasvava automaation aste edellyttää yhä parempaa kykyä havainnoida ja valvoa prosesseja, varastoja ja tiloja. Havainnointia vaativat myös yhä kehittyvät ja dynaamisemmat talous ja yhteiskunta. Tarve tiedolle ympäristön ja yhteiskunnan tilasta on valtava. Kaukokartoituksen enenevä käyttö on tästä hyvä esimerkki. Viime vuosien aikana nimenomaan paikallisen turvallisuuden merkityksen kasvu on ajanut erilaisten sensorien markkinoita. Tieto- ja tietoliikennetekniikan valtava kehitys on osaltaan ollut ajamassa tätä muutosta. Niiden ansiosta tietoa on tarvittavissa yhä paremmin saatavilla

Infrapuna-alueella toimivat sensorit ovat olleet tässä kehityksessä vahvasti mukana. Syinä tähän ovat luultavasti niin lämpöä tuottavien prosessien yleisyys luonnon ja ihmisten toiminnassa kuin sensoriratkaisujen kompakti kokokin; infrapuna-alueella toimiva optiikka on olennaisesti kutistettavissa samaan kokoon kuin näkyvän valon alueella toimiva optiikkakin. Mikrovalmistusmenetelmiä käyttävät infrapunasensorit ovat itse asiassa jo varsin arkipäiväisiä laitteita, sillä niitä käytetään muun muassa liikkeentunnistimissa ja kontaktittomissa lämpömittareissa. Korkean suorituskyvyn järjestelmät ovat kuitenkin vieläkin varsin vaativia valmistaa ja siten käytössä vain erikoissovelluksissa. Sotavoimat ympäri maailmaa ovat johtavia tällaisten laitteiden käyttäjiä.

Infrapuna eli IR-säteily on näkyvää valoa hieman pitempiaallonpituuksista sähkömagneettista säteilyä. Infrapunasäteilynä pidetään yleisesti sitä osaa sähkömagneettisen säteilyn spektristä, jonka aallonpituudet ovat välillä 750nm - $100\mu\text{m}$, joskin yläraja ei ole kovin tarkasti määritelty. Se yhdistetään perinteisesti lämpöön, sillä inihimillisen toiminnan kannalta normaaleissa lämpötiloissa olevat kappaleet emittoivat lähinnä infrapunasäteilyä. Erittäin kuumat kohteet voivat hehkua enemmän näkyvää valoa ja jopa röntgensäteilyä kuin infrapunasäteilyä. Meidän näkyvä valommehan on pää-

¹Wilson, J.S. (ed.):Sensor Handbook. Newnes, 2005.ix.

osin peräisin monituhatasteisesta auringosta. Yhteys lämpöön on kuitenkin tehnyt IR-säteilystä varsin keskeisen osan modernia teknologisoitunutta elämää.

Tämän työn ylesitavoitteena on tutkia yleistä infrapunatekniikkaan perustuvaa ilma- ja lämpötila- tai muuta sensoria vaihtelevissa olosuhteissa. Yleistäminen viedään tasolle, jolla havainnointijärjestelmää kuvataan detektorilla ja siihen liittyvällä optiikalla. Kohteen lähettämä heräte muutetaan sopivan yksinkertaiseen muotoon. Työn tuloksia voitaneen käyttää soveltuvin osin myös muiden kuin lentokoneiden havainnointiin, mutta yksinkertaisuuden vuoksi rajaudutaan ilma- ja lämpötilan viitekehukseen.

1.2 Tavoitteet

Tavoitteena on luoda infrapunasensorin malli, joka on tarpeeksi yleinen kattamaan tavanomaiset infrapunasensorit. Mallilla on tarkoitus voida tutkia erilaisten ilma- ja lämpötila- alusten havaittavuutta vaihtelevissa maasto- ja sääolosuhteissa. Lisäksi mallin on tarkoitus antaa tukea myös erilaisille signaalinkäsittelytekniikoille, joilla voidaan huomattavasti parantaa signaalin laatua. Pyritään myös mahdollistamaan kohteen herätteen monimutkaisenkin mallinnus. Malli implementoidaan Matlab-ohjelmistolla ja siihen liitetään tarpeellinen dokumentointi kooditasolla. Yleisen tason käyttöohjeviivat annetaan tässä raportissa. Mahdollisesti ajan riittäessä tarkastellaan myös sensoriverkkoja sekä sensorien optimaalisia sijoittelustrategioita.

Mallin tärkeimpänä tehtävänä on toimia pohjana erilaisten IR-sensoreiden havaintokyvyn vertailussa. Tältä kannalta olennaisinta on pystyä määrittämään, miltä etäisyydeltä sensori kykenee erottamaan kohteen. Jos malli pystyy esittämään tämän, on mahdollista vertailla keskenään sensoreita tai erilaisia olosuhteita. Tämä voidaan toteuttaa mallissa muuntelemalla niin detektorin, kohteen kuin ympäristönkin parametrejä. Vertailun helpottamiseksi on mallissa oltava sisäänrakennettuna myös selkeä tulosten visualisointitapa.

Tavoitteena ei ole välittömästi tehdä erittäin tarkkaa mallia vaan pikemminkin realistinen pohja, joka on helposti laajennettavissa ja päivitettävissä. Niinpä esimerkiksi kohteen malliksi riittää pelkkä tietyssä lämpötilassa ole-

va liikkuva pinta-ala. Myös ilmakehän malli pidetään pelkistettynä: ainoat muuttuvat tekijät ovat pilvet, joskin myös koko ilmakehän ominaisuuksia voidaan muuttaa mm. sen tiheyttä tai IR-läpinäkyvyyttä säätämällä. Koska mallin tulee olla helposti säädettävissä, on sen dokumentointi kooditasolla keskeisessä asemassa - näin esimerkiksi parametrejä säädettäessä tiedetään, mikä muuttuu.

Mallin olisi myös oltava helposti käytettävissä monen sensorin verkon simuloimiseen. Tähän varaudutaan tekemällä mallista helposti skaalautuva ja rakentamalla siihen selvät ulostulevan tiedon käsittelyrakenteet. Tämän mallin puitteissa ei signaalinkäsittelyä ja tulkintaa tarkastella, joskin ne tulee voida helposti rakentaa mallin päälle.

1.3 Käsittele

Tässä raportissa tarkastellaan alussa kirjallisuuskatsauksessa sensoreiden käyttöä yleisesti ja erityisesti sotilaallisissa yhteyksissä. Tämän jälkeen tarkastellaan IR-sensoreiden tekniikkaa käymällä läpi säteilyn havaitsemisen perusteita ja erilaisia teknisiä toteutuksia sekä muutamia detektoritekniikan keskeisiä käsitteitä. Käsitteilyn havainnollistamiseksi esitellään myös muutamia tuotteita, joissa IR-tekniikka on keskeisessä asemassa.

Tämän sovelluksia esittelevän kappaleen jälkeen esitetään simulaattorin mallille matemaattinen perusta. Tässä yhteydessä käydään läpi detektorin toiminta mallin kannalta eli annetaan matemaattinen muotoilu sille, milloin detektori havaitsee jotain merkittävää. Tämän jälkeen tarkastellaan väliaineen, erityisesti ilman ja pilvien vaikutusta säteilytehon (käytännössä radianssi) siirtymiseen kohteesta detektoriin. Lopuksi tarkastellaan kohteen matemaattiseen mallintamiseen liittyviä ongelmia.

Kolmannessa osassa tarkastellaan toisessa osassa tehdyn matemaattisen tarkastelun pohjalta toteutettua simulaatiomallia. Käsittele alkaa mallin yleisen rakenteen ja käytön tarkastelulla, jonka jälkeen esitellään detektorin ja optiikan mallien toteutukset. Tämän jälkeen käsitellään väliaineen ja kohteen mallit ja lopuksi tulosten visualisointi. Tätä osaa seuraa välittömästi muutamien esimerkkitapausten simulaatiotulosten esittely omana lukunaan.

Raportin lopuksi pohditaan mallin toimivuutta ja soveltuvuutta tavoitteiden kannalta ja sen jatkokehityssuuntia ja -mahdollisuuksia. Loppusanojen omaisesti käsitellään mallin käyttöä osana sensoriverkkoa.

2 Kirjallisuuskatsaus

2.1 IR-sensorien sotilaallinen käyttö

Modernissa sodankäynnissä informaatio ja sen kulku ovat ratkaisevia tekijöitä. Ilman tietoa vihollisjoukoista ovat useat pitkänmatkan aseet hyödyttömiä ja omat joukot ovat alttiita yllätyshyökkäyksille. Perinteisesti tieto vihollisjoukoista on saatu näköhavainnoin. Teknisin apuvälinein voidaan havainnointikynnystä sekä tiedon liikkuvuutta parantaa, jolloin joukkojen komentajat voivat reagoida ajantasaisen ja luotettavan tiedon perusteella. Erilaiset havainnointijärjestelmät ovatkin erittäin tärkeitä modernissa sodankäynnissä.

Havainnointijärjestelmät voivat olla aktiivisia tai passiivisia. Aktiiviset järjestelmät, kuten tutkat, lähettävät signaalin, joka vuorovaikuttaa havaittavan kohteen kanssa. Pääsääntöisesti aktiiviset järjestelmät ovat luotettavia ja niillä on suuri erottelukyky, mutta ne voidaan havaita ja paikallistaa lähettämänsä signaalin perusteella. Passiiviset järjestelmät havainnoivat kohteesta lähtevää signaalia, joka voi olla taustasäteilyn suhteen hyvinkin heikko, jolloin havainnointikynnys voi olla suuri. Etuna kuitenkin on, että passiivista järjestelmää ei yleensä voida yhtä helposti paikantaa.

Todellisuudessa aktiivisia ja passiivisia järjestelmiä käytetään rinnakkain: passiivisia niin kauan kuin joukkoja ei ole havaittu ja aktiivisia, kun taistelu on käynnissä ja joukot ovat havaittu. Passiivisten järjestelmien parantuksessa onkin siirrytty yhä enemmän niiden käyttöön aktiivisten järjestelmien kustannuksella. Passiiviset järjestelmät ovat usein lisäksi huomattavasti halvempia kuin aktiiviset järjestelmät, jolloin niitä voidaan jakaa laajemmin miehistölle taistelun tueksi.

Modernit asejärjestelmät, kuten lentokoneet, liikkuvat nopeasti taistelukentälle ja voivat aiheuttaa suurta tuhoa heikosti varautuneille joukoille. Lentokoneiden uhka vaatii todella nopeata reagointia, joten on luonnollista, että

erityisesti niitä vastaan on kehitetty havaintojärjestelmiä ilmavaaran havaitsemiseksi sekä torjumiseksi. Lentokoneiden havaitsemiseen voidaan käyttää mm. infrapunasensoreita. Passiivisena havainnointijärjestelmänä infrapunasensorin käyttäjä ei altistu lentokoneen hyökkäyksille.

IR-sensorit ovat ehkä tärkein sotilaskäytössä oleva passiivisten sensorien luokka. Niitä käytetään niin henkilökohtaisina varusteina kuin suurten asejärjestelmien, kuten risteilyohjusten ja laivatykkien ohjausjärjestelminä. Kaikkein monimutkaisimpia ovat satelliitteissä käytetyt IR-teleskoopit, joita tiedustelun ohella käytetään myös säähavainnointiin.

Sotilaskäytössä olevat IR-sensorit ovat useimmiten kuvantavia. Sotilaallisessa mielessä niiden tärkeimpänä etuna on ihmisen kannalta helposti ymmärrettävän ”visuaalisen” kuvan saaminen tilanteesta myös olosuhteissa, joissa valaistusta ei ole lainkaan - kaikki kohteethan emittoivat IR-säteilyä lämpötilansa mukaisesti. Joissain olosuhteissa IR-sensoreita on käytetty myös ”semi-aktiivisesti” IR-valaisun kanssa yhdessä. Tällainen valaisu mahdollistaa myös tasalämpöisen ympäristön havainnoinnin, mutta siihen kohdistuvat myös kaikki aktiivisten havaintokeinojen käytön vaarat.

IR-tekniikka on ollut keskeinen osa sotilaallista toimintaa jo niin kauan, että IR-alueella tapahtuvaan havainnointiin on varauduttu sotavarustusta suunniteltaessa. Tutkien yhteydessä monille tutuksi tullut stealth-tekniikka on arkipäivää myös IR-säteilyn alueella. Tämän vuoksi IR-tekniikkaan kohdistuu yhä suurempia vaatimuksia entistä heikompien kontrastien erottamiseksi ympäristöstään.

2.2 IR-Sensorien tekniikka

Markkinoilla on käytössä useita erilaisia IR-sensoryyppejä.² Nykytrendinä on ennen kaikkea jäähdyttämättömien ja siten varsin kompaktien sensorien käyttöönotto monilla aloilla. Jäähdyttämättömien sensorien etuna on pienen koon halpa hinta, koska niihin ei tarvita kalliita jäähdytyskomponentteja. Toistaiseksi jäähdyttämättömien sensoreiden suorituskyky ei ole kuitenkaan

²Uotila, J: Uncooled Infrared Imaging Sensors. Teoksessa Jormakka, J. ja Rissanen A: State-of-the-art in Sensors. PvTT, 2006.45-46.

ollut riittävää täyttämään kaikkein vaativimpien käyttötarkoitusten vaatimuksia. Näin ollen tulevaisuudessakin tullaan näkemään molemmanlaisiin tekniikkoihin perustuvia sensoreita.

Riippumatta siitä, onko sensori jäähdytetty vai jäähdyttämätön, perustuu se yhteen kolmesta IR-säteilyn perusmittausmenetelmästä: fotonien havaitsemiseen, aaltojen vuorovaikutukseen ja lämmön mittaamiseen. Fotoni-ilmaisimet perustuvat valosähköiseen ilmiöön, tosin IR-sensoreitten tapauksessa luonnollisesti IR- alueella tapahtuvaan reaktioon. Ne ovat usein liian herkkiä oman lämpötilansa aiheuttamalle kohinalle, joten niitä ei yleensä käytetä jäähdyttämättöminä. Kehitystyö jäähdyttämättömien fotonidetektorien saralla on kuitenkin aktiivista. Aaltojen vuorovaikutukseen perustuvat tekniikat ovat lähinnä kokeiluasteella.

Nykyiset jäähdyttämättömät IR-mittarit perustuvatkin siis lähes poikkeuksetta lämpötilan mittaamiseen. Näissä mittareissa absorboitunut IR-säteily nostaa detektorin lämpötilaa ja muuttaa sopivan säännöllisellä tavalla jotain sensorin fysikaalista ominaisuutta, esimerkiksi resistiivisyyttä. Nykyään lämpötilaan perustuvat mittarit tehdään mikrovalmistusmenetelmiä käyttäen lukupiirien kautta, joten valmistuksen osalta ne vastaavat mitä tahansa modernia elektroniikkakomponenttia.

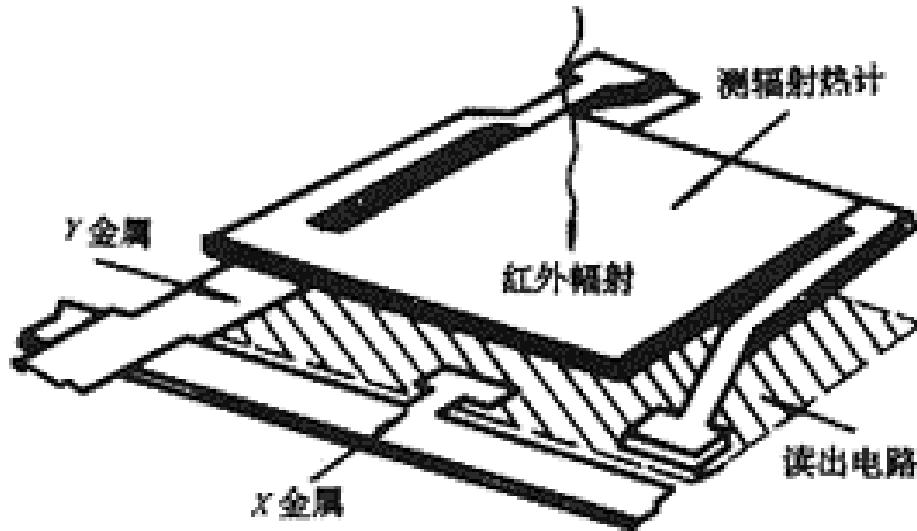
Lämpötilasta riippuvat detektorit ovat joko bolometrejä, pyroelektrisiä detektoreja tai termoelektrisiä detektoreja.³ Bolometrit ovat lämpötilasta riippuvia resistoreja. Bolometriin kuulukin detektorin lisäksi aina lukuelektroniikka, joka mittaa resistiivisyyden muutoksen. Tyypillinen monoliittisen piistä tehdyn bolometrimatriisin elementti on esitetty kuvassa 1.

Bolometrissä lämpösäteilyä keräävä elementti on eristetty substraatista, jonka päälle se on tehty, jättämällä se ”jaloille”. Itse detektorialueen alapuolinen alue on päällystetty heijastavalla materiaalilla jottei säteily vaikuttaisi siihen.

Pyroelektriset detektorit perustuvat detektorimateriaalin spontaaniin sähköiseen polarisaatioon, jonka säteilyn aktivoimat varauksenkuljettajat tasaisessa neutraloivat. Jos detektorille tulevaa säteily kuitenkin esimerkiksi pilkotaan ajassa, muuttuu efektiivinen lämpötila jatkuvasti ja polarisaation muu-

³Uotila, 50-55.

Kuva 1: Monoliittinen bolometrielementti.



tokset näkyvät jännite-erona. Termoelektriset detektorit toimivat puolestaan kuten lämpöparit: Kun parin toista osaa lämmitetään, syntyy elementtien välille jännite-ero (ns. Seebeck-efekti). Tämä jännite riippuu termoparin elementeistä.

Detektoritekniikka vaikuttaa olennaisesti kokonaisjärjestelmän kokoon ja sen soveltumiseen erilaisiin havainnointitehtäviin. Esimerkiksi kohinaominaisuudet ovat eri tekniikoilla toteutetuilla sensoreilla varsin erilaisia.

Tekniikasta riippumatta sensorin keskeisiä ominaisuuksia ovat sen kyky muuttaa sen havaintoalueelle tuleva säteily järkeväksi signaaliksi.⁴ Tätä kutsutaan detektorin herkkyydeksi. Tarkka herkkyydfunktio riippuu detektorin teknisen toteutuksen yksityiskohdista. Toinen, sensorin nopeutta kuvaava ominaisuus on sen sähköinen kaistanleveys. Se määrittyy siitä ajasta, joka sensorilla kuluu äkillisen herätteen jälkeen palautua n. 63%:in huippuarvon tasosta. Se ilmaistaan taajuden yksiköissä. Kolmas keskeinen suure on NEP

⁴Schanda, E: Physical Fundamentals of Remote Sensing. Springer, 1986. 156-157.

eli Noise Equivalent Power. Tämä kuvaa normaalin kielenkäytön mielessä juuri sensorin herkkyyttä, sillä NEP on se sensorille tulevan säteilyn taso, joka vastaa sensorin keskimääräistä kohinatasa sensorin annetulla sähköisellä kaistanleveydellä. Mikäli sensorielementille tulevan säteilyn teho on suurempi kuin NEP, erottuu se teoriassa kohinasta. Käytännössä eron tulee olla melko merkittävä.

Sensorien vertailua varten on hyvä laskea vielä neljäskin suure, detektiivisyys, joka on olennaisesti NEP:in käänteisarvo. Eri sensorien vertailua varten tämä kuitenkin on hyödyllistä normeerata siten, että sensorielementtien koon ja sähköisen kaistanleveyden vaikutus saadaan poistettua. Tällöin saadaan normalisoitu detektiivisyys, D^* :

$$D^* = \frac{\sqrt{A_d \Delta \nu_d}}{NEP}. \quad (1)$$

Edellisessä kaavassa A_d on sensorielementin aktiivinen ala ja $\Delta \nu_d$ sähköinen kaistanleveys. Viimeinen olennainen suure sensoreita vertailtaessa on NETD eli noise equivalent temperature difference. Se kuvaa pienintä havaittavissa olevaa lämpötilaeroa, jos oletetaan tarkkailtavien kappaleiden täyttävän vähintään yhden sensorielementin näkökentän.

2.3 Muutamia esimerkkejä sensoreista ja niiden käytöstä

Kuten aiemmin on todettu, IR-sensoreilla on useita käyttöjä. Muutamia näistä on lueteltu alla olevassa listassa: ⁵

- Säteilylämpömittari
- Liikkeentunnistin
- Spektrofotometri
- Kosteusmittari

⁵Hamamatsu: Characteristics and Use of Infrared Sensors, http://sales.hamamatsu.com/assets/applications/SSD/Characteristics_and_use_of_infrared_detectors.pdf

Kuva 2: Tyypillinen käsikäyttöinen IR-lämpömittari.



- Palohälytín
- Lämpökamera

Ehkäpä yksinkertaisin esimerkki tämän työn kannalta relevantista IR-sensorista on IR-lämpömittari. Se on muutakin kuin on/off-mittausarvoa antavana laitteena enemmän mittalaite kuin esimerkiksi liikkeentunnistin. Tyypillinen käsikäyttöinen IR-lämpömittari on esitetty kuvassa 2⁶. Tämänkaltaissa mittareissa käytetyn tyyppinen lämpösensori on kuvattu puolestaan kuvassa 3.⁷

Edellä kuvattu lämpömittari mittaa siis optiikan määrittämästä pisteestä tulevan lämpöenergian, joka muuttaa sen sisällä olevan termoparisarjan johtavuutta. Termoparit ovat sarjassa ulostulevan signaalin vahvistamiseksi.

Kuvantavissa sovelluksissa tarvitaan mikrovalmistustekniikoilla valmistettuja kuvantamiselementtejä. Näissä mittaavissa elementteissä on asetettu pikselimatriisiin. Tällaisesta on esimerkkinä kuvassa 4 oleva Teledynen malli.⁸ Tässä elementissä on 256x256 pikseliä, jotka on jaettu neljään lohkokseen.

⁶Raytek 3i series, http://www.raytek-europe.com/tools/free_form_content/view.html?phase=show&id=1077795078

⁷Rdf corporations: Simplified Heat Flow Measurement: Construction and Principles of Operation, http://www.rdfcorp.com/anotes/pa-hfs/pa-hfs_02.shtml

⁸Teledyne Scientific & Imaging - IR Sensors, http://www.rsc.rockwell.com/infrared_sensors/index.html

Kuva 3: Termoparisarja.

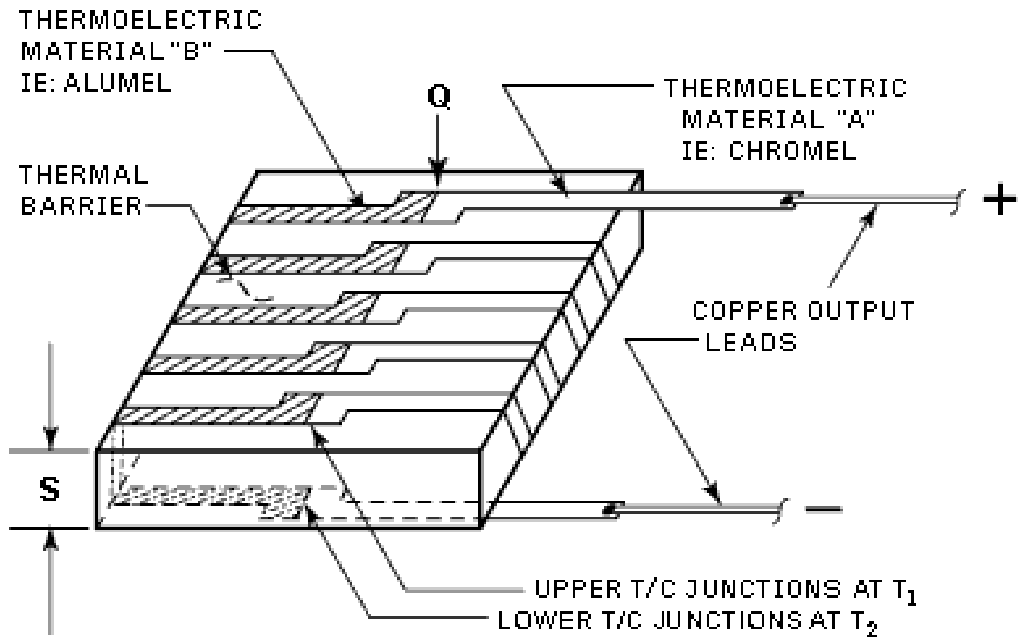
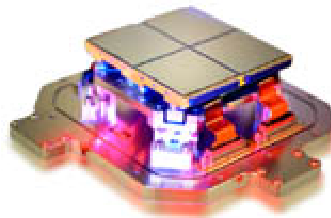


Figure 1. Micro-Foil® In-Depth Thermopile

Kuva 4: Kvantava Ir-sensori.



Tässä työssä tarkasteltavan ilmavalvontasovelluksen kannalta hyvä esimerkki on Thalesin ADAD.⁹ ADAD on nimenomaan passiiviseen ilmavalvontaan tarkoitettu järjestelmä, joka kykenee erottamaan helikopterin noin 8 km:n etäidyyttä. ADAD on nimenomaan valvontasensori - mahdollisesta asejärjestelmän kohdistamisesta kohteeseen huolehtivat muut järjestelmät. ADAD toimii 8-14 μm aallonpituusalueella ja se on esitetty kuvassa 5. Lopuksi kuvassa 6 on vielä väärävärinäkökuvana esimerkki siitä, minkälaista kuvaa korkealuokkainen infrapunakamera voi tuottaa.¹⁰

3 IR-detektorin, väliaineen ja kohteen matemaattinen malli

3.1 Detektorin toiminta

Detektorin malli koostuu $N \times M$ pikselistä. Optiikan ansiosta kuhunkin pikseliin kohdistuu säteilyä yhtä suuresta avaruuskulmasta. Jos yksittäiseen pikseliin osuva säteily teho tarkasteltavalla ajanhetkellä on yli kaksi kertaa suurempi, kuin detektorin NEP, tehdään havainto. Kohteen suunnan kertova avaruuskulma voidaan päätellä havainnon tehneen pikselin sijainnista. Tarkan sijainnin määrittämiseen tarvitaan havainto vähintään kahdelta eri detektorilta.

3.2 Väliaineen vaikutus

Infrapunasäteily on sähkömagneettisen säteilyn tyyppi. Mustan kappaleen, joka on lämpötilassa T , emittoima spektraaliradianssi (yksiköissä $W/m^2 \text{sradHz}$) saadaan Planckin laista:¹¹

$$I(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^2(e^{h\nu/kT} - 1)}. \quad (2)$$

⁹ADAD, <http://www.armedforces.co.uk/army/listings/10115.html>

¹⁰FLIR Systems, <http://www.flirthermography.com/images/gallery/F185.jpg>

¹¹Mansfield, M., O'Sullivan, C: Understanding Physics. Wiley, 1998. 361.

Kuva 5: Thales ADAD IR-ilmavaltasensori.



Kuva 6: IR-kameralla saatua kuvaa.



Tässä h on Planckin vakio, c valonnopeus, k Boltzmannin vakio ja ν säteilyn taajuus. Käytännössä mustia kappaleita ei esiinny kuin ideaalitilanteissa ja jopa harmaa kappale, jossa koko mustan kappaleen spektri on vaimentunut tietyllä vaimennustekijällä, ei käytännössä ole hyvä esitys juuri millekään fysikaaliselle kappaleelle.

Sähkömagneettisen säteilyn etenemiseen väliaineessa vaikuttaa olennaisesti se, millaista väliaine on. Sähkömagneettinen säteily voi absorboitua, heijastua, sirota tai uudeelleenemittoitua väliaineesta. Vuorovaikutusten vahvuus riippuu sekä säteilyn aallonpituudesta että väliaineen fysikaalisista ominaisuuksista, kuten molekyylien koosta ja muodosta, elektroniverhon rakenteesta ja luonnollisesti myös makroskooppisista ominaisuuksista, kuten lämpötilasta ja tiheydestä. Säteilyn kulku väliaineessa onkin melko vaikeasti mallinnettava ongelma, joka liittyy keskeisesti mm. nykyisin paljon tutkittujen inversio-ongelmien kenttään.¹²

IR-säteilyä, kuten muutakin sähkömagneettista säteilyä käsitellään aaltoliikkeenä lähtien liikkeelle Maxwellin yhtälöistä, joista saadaan johdettua aaltorintaman etenemistä kuvaava aaltoyhtälö. Tämän työn puitteissa ei ole kuitenkaan tarpeen tarkastella muuta kuin säteilytehon siirtymistä. Tätä ongelmaa on tutkittu jo pitkään spektrometriassa. Väliaineet jättävät jälkensä niiden läpi kulkevaan tai niistä lähtevään säteilyyn, ja nämä jäljet näkyvät nimenomaan säteilyn spektrissä. Varsinkin kaasussa, jossa hiukkasia voidaan heikkojen vuorovaikutusten takia käsitellä olennaisesti riippumattoina, näkyvät väliaineen atomien tai molekyylien sallitut energiatilat selkeinä spektriviivoina. Jotkut näistä viivoista voivat olla vahvempia tai leveämpiä kuin muut riippuen niiden aiheuttaman ilmiön luonteesta.

Ilmakehän, joka on monen kaasun seos ja jossa on paljon pienhiukkasia, tapauksessa väliaineen vaikutukset säteilyyn voivat olla monenlaisia:¹³

- Säteilevän kohteen irradianssi eli aallonpituuksilla voi muuttua epätaisisesti.

¹²Aihetta on käsitelty kattavasti mm. Chandrasekhar, S: Radiative Transfer. Dover, 1960.

¹³Kaufman, Y.J: The Atmospheric Effect on Remote Sensing and Its Correction. Teoksessa Asrar, G. (ed.): Theory and Applications of Optical Remote Sensing. Wiley, 1989. 337.

- Säteilvän kohteen lähettämä säteily voi levitä sironnan vaikutuksesta.
- Väliaineessa kulkevan säteilyn polarisaatio saattaa muuttua.

Makroskoopisella tasolla säteilyn etenemistä väliaineessa kuvaa siirtoyhtälö.¹⁴ Sen lähtökohtana on ajatus makroskooppisesta, monien eri mikroskooppisten ja kvanttimekaanisten ilmiöiden kokonaisvaikutusta kuvaavasta vaimenemiskertoimesta κ .

$$\kappa = N\sigma(\nu). \quad (3)$$

Yksikkö κ :lle on $1/m$. Ylläolevassa määritelmässä N on lukutiheys, ν säteilyn taajuus ja σ sionntavaikutusala ($1/m^2$). Yleisesti ottaen σ ja siten myös κ voidaan määrittää jokaiselle eri vuorovaikutustyyppille (sironna ja absorptio). Yleensä sionntavaikutusala riippuu myös säteilyn taajuudesta. Sironnassa ja absorptiossa menetetty teho voidaan laskea seuraavasti:

$$dI(\nu) = -\kappa I_\nu dz. \quad (4)$$

Tässä yhtälössä tarkastelu on yksiulotteista ja z koordinaatti. I on radianssi. Sironnan tapauksessa laskentaa vaikeuttaa se, ettei sironna yleensä tapahdu isotrooppisesti kaikkiin suuntiin. Näin ollen sironna tarvitsee yleensä laskea integroiden koko avaruuskulman yli.

Absorption ja sironnan lisäksi myös (stimuloitu) emissio on mahdollista. Emissiota kuvaa lähdetiheystermi $j(\nu, z)$, jonka yksiköt ovat $Wm^{-3}Hz^{-1}$. Emission differentiaalin vaikutus siirtoyhtälöön saadaan seuraavasti:

$$dI = j(\nu, z)dz. \quad (5)$$

Jos oletetaan, ettei sionntaa tapahdu, voidaan siirtoyhtälö esittää yksinkertaisessa muodossa. Yhdistämällä ja integroimalla kaikki termit saadaan siirtoyhtälöksi säteilylle, joka kulkee pinnalta A pinnalle B:

$$I_{\nu B} = I_{\nu A}e^{-\tau_0} + \int_0^{\tau_0} S_\nu^{-\tau} d\tau. \quad (6)$$

¹⁴Schanda, 136 - 140

Tässä τ on optinen tiheys, joka määritellään seuraavasti:

$$\tau = \int_{z_B}^z \kappa_a(\nu, z) dz. \quad (7)$$

S on puolestaan ns. lähdefunktio:

$$S = \frac{j(\nu)}{\kappa_a(\nu)}. \quad (8)$$

Tämä yhtälö on usein tarpeettoman monimutkainen ratakaistava. Käytännössä käytetäänkin usein tämän yhtälön kanssa hieman samanmuotoista, mutta yksinkertaisempaa empiiristä yhtälöä edelleen, joka tunnetaan Lambertin ja Beerin lakina.¹⁵

$$\frac{I_z}{I_0} = e^{-\kappa(\nu)z}. \quad (9)$$

Tässä on syytä huomata, että κ on nyt empiirisesti määritetty kerroin, jonka yksiköt tosin ovat samat edellä esitellyn κ :n kanssa. Tämä kappa yhdistää kaikki erilaiset vaikutukset yhteen numeroon ja on sen vuoksi hyvin käytännöllinen. Tämä yhtälö huomioi kyllä sironnasta johtuvan radianssin heikkenemisen, muttei sen leviämistä sironnan takia.

Koska sensoriteknikka ja varisinkin ilmasta tai avaruudesta käsin tehtävät mittaukset eri aallonpituusalueilla ovat nykyään arkipäivää ja näinollen erilaista kokeellista dataa on runsaasti saatavilla. Ohessa kuvassa 7 on esitetty tyypillinen ilmakehän kokonaisabsorption kuvaaja.¹⁶

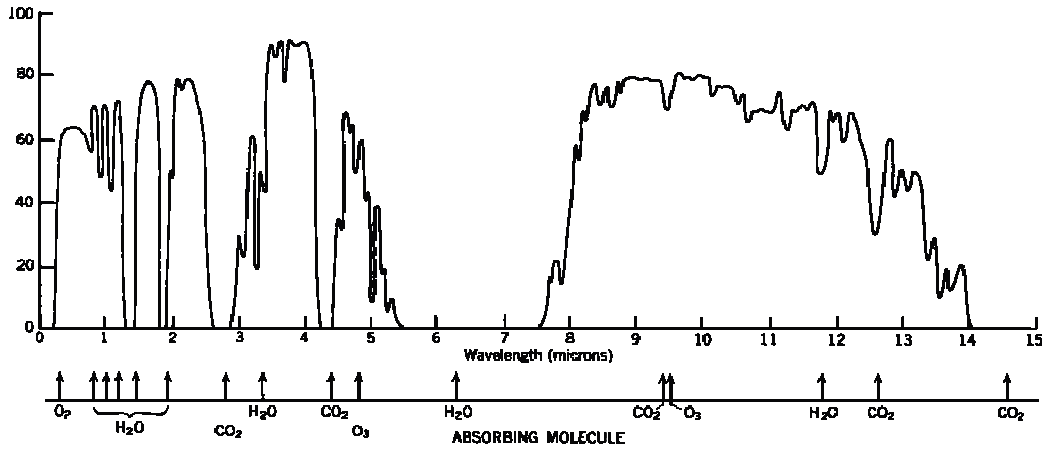
Suurimpana ongelmana käytettävissä olevan datan kanssa on se, että erilaisia yksiköjä on melko runsaasti, kunkin käyttötarkoituksen mukaan. Tämän takia datan valinta ja esikäsittely pitää tehdä huolella.

Pilvet koostuvat lähinnä vesihöyrystä, ja siksi niiden optisia ominaisuuksia mallinnetaan veden ominaisuuksilla. Veden optiikalle on ominaista se, että se sisältää muutamia ”ikkunoita” aallonpituusavaruudessa, joista säteily pääsee läpi. Jo hieman paksumpi pilvi absorboi lähes kaiken siihen osuvan

¹⁵Weichel, H: Laser Beam Propagation in the Atmosphere. Sarjassa Tutorial Texts in Optical Engineering, vol. TT 3. SPIE, 1990. 12.

¹⁶www.electro-optical.com/bb_rad/atmo_abs.htm

Kuva 7: Tyypillinen ilmakehän absorptio aallonpituuden funktiona.



säteilyn näiden ikkunoiden ulkopuolella. Sen vuoksi väliainetta päädyttiin mallintamaan näiden ikkunoiden avulla. Oletetaan, että ikkunat päästävät kaiken säteilyn läpi, ja ikkunoiden ulkopuolella absorptiokerroin on hyvin suuri. Nyt pilvi vaimentaa kokonaissäteilytehoa, sillä teho saadaan integraalina kaikkien aallonpituuksien yli. “Oikeampi” malli saataisiin, jos mallinnettisiin pilvien absorptiokerroin jatkuvana aallonpituuden funktiona. Tämä todettiin kuitenkin niin vaivalloiseksi toteuttaa, että päädyttiin approksimaatioon.

Lisätutkimuksen kohteeksi voitaisiin ottaa, miten sade tai lumisade vaikuttaa detektorin toimintaan. Luultavasti näkökyky huononisi entisestään, sillä ilman tilalla olisi paljon enemmän vettä. Myös maastoesteiden kuten puiden, kallioiden, naamioiden, yms. vaikutuksia voitaisiin mallintaa. Malliin on tätä varten jätetty mahdollisuus määrittää pallomaisia esteitä, joiden läpi detektori ei näe.

3.3 Kohde

IR-detektorilla pyritään pääasiassa havaitsemaan vihollisen lentokoneita, helikoptereita, tms. Kohteiden pääasiallinen lämmönlähde on niiden moottori, suihkukoneissa moottorista taaksepäin suuntautuva suihku. Tässä mallissa

tarkastelemme detektorista omiin dimensioihinsa nähden kaukana olevia kappaleita, jotka liikkuvat suorilla ratoja pitkin.

Kohteet mallinnetaan xyz – avaruudessa pistemäisinä kappaleina. Tämä approksimaatio tehdään, sillä oletetaan että kohteet ovat aina niin kaukana että ne kuvautuvat vain yhteen detektorin gridin pikseliin jolloin niiden dimensioilla ei ole merkitystä. Kohteille on kuitenkin määritelty detektoria vastaan kohtisuora pinta-ala säteilytehon laskemista varten. Kohteet oletetaan mustiksi kappaleiksi lämpösäteilyn emittoimista varten, jonka jälkeen niiden säteilemä spektri voidaan laskea Planckin lailla suoraan niiden lämpötilan avulla.

Kohteen pistemäisyysapproksimaatio aiheuttaa mallille tiettyjä rajoitteita. Malli ei pysty kuvaamaan lähellä olevaa kohdetta niin, että se näkyisi useassa pikselissä, jolloin sen muodosta voitaisiin tehdä johtopäätöksiä. Toinen rajoite on se, että kohteen kääntymistä ei voida mallintaa ja vaikka kohti tuleva lentokone voikin vaikuttaa hyvin pistemäiseltä, poikittain detektoria vastaan oleva lentokone ei välttämättä enää sitä niin hyvin ole.

Mallin puitteissa on kuitenkin mahdollista käsitellä myös suurempia kohteita, mallintamalla yksi kohde usean pisteen joukkona. Kunhan pistejoukkoa ei kasvateta liian suureksi, tämä toimii melko hyvin. Ongelmaksi muodostuu jälleen kohteiden kääntäminen, sillä se vaatii melkoista matemaattista pyörittelyä. Myös yksittäisten pisteiden säteilytehot on tällaisessa esityksessä mietittävä tarkkaan, jotta ne vastaavat todellisuutta. Malli ei huomoi sitä, että pisteet voivat varjostaa toisiaan, vaan jos yhdessä detektorin sektorissa on kaksi perättäistä pistettä, niiden lähettämä säteilyteho lasketaan yksinkertaisesti yhteen.

Kaikkine rajoitteineenkin, mallin käyttötarkoitusta ajatellen pisteapproksimaatio on kuitenkin toimiva. Infrapunasensorilla tuskin yritetäänkään havaita kohteita jotka ovat niin lähellä, että ne pystytään erottamaan ja tunnistamaan muutenkin. Kohteiden tunnistaminen tuskin on muutenkaan IR-sensorin päätehtävä. Kun tarkkaillaan kohteita, jotka ovat satojen tai tuhansien metrien korkeudessa, malli toimii moitteetta.

Approksimaation suurin etu on sen matemaattinen helppous, ja sitä kautta laskentatehon keveys. Kun kohteen dimensioita ei tarvitse huomioida, on

sen lähettämä säteilyteho sama joka suuntaan ja kaikki detektoriin osuva säteily tulee samasta pisteestä. Säästymme myös laskemasta toisiaan varjostavia kohteita, osittain pilvien peittämiä kohteita, sekä kääntyviä kohteita. Kaiken tämän avaruusgeometrian kanssa koodi tulisi helposti hyvin raskaaksi.

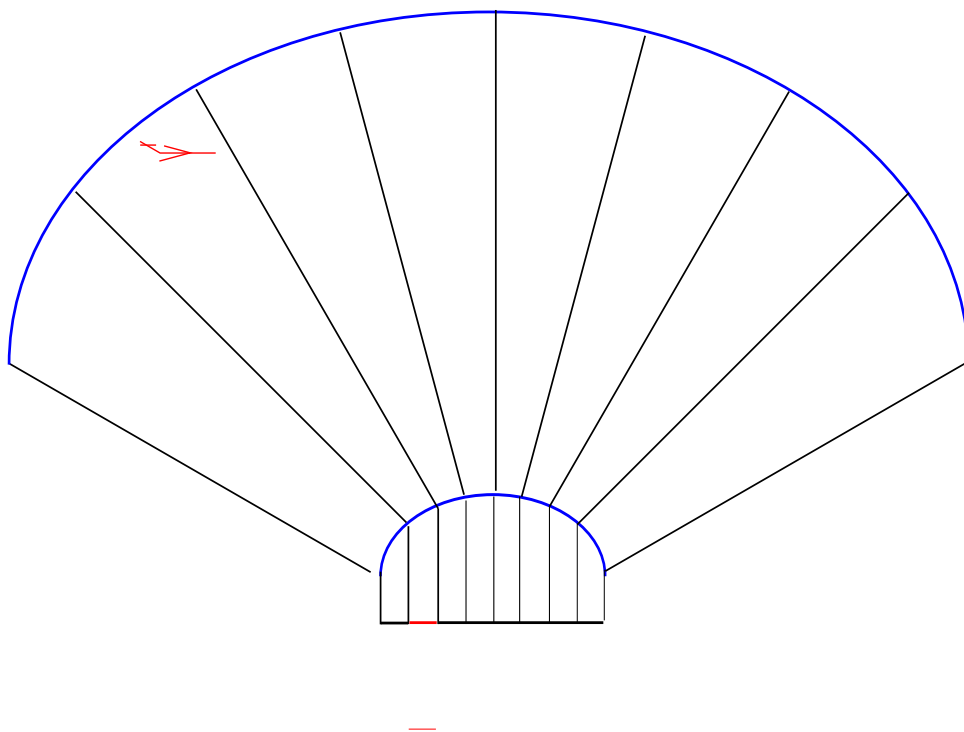
3.4 Optiikka

Optiikan tehtävänä on kuvata detektorin näkemästä avaruuskulmasta saapuvat säteilymäärät sen nelikulmaiselle, tasomaiselle pikseligridille. Sitä varten detektorissa on linssi, joka kuvaa yhtä suuret avaruuskulmat keskenään yhtäsuuriksi pinta-aloiksi detektorin aktiivisella alueella, ks. kuva 8. Detektorin näkökentän määräävät horisontaalikulma θ ja vertikaalikulma ϕ . Kun detektorin pikseligridin dimensiot ovat $N \times M$, yhteen pikseliin kuvautuvan avaruuskulman suuruus on $\frac{\theta}{N} \times \frac{\phi}{M}$. Tämän kuvaustavan etuna on sen yksinkertaisuus; nyt havainnon sijoittamiseksi oikeaan pikseliin tarvitsee tietää ainoastaan sen paikkavektori pallokoordinaateissa detektoriin nähden, joka saadaan yksinkertaisella koordinaattimuunnoksella. Haittana taas on se, että jos detektorin näkökenttä leikataan suoralla tasolla, reunalla oleviin pikselihin kuvautuu tasosta paljon suurempi osa kuin keskellä oleviin. Jos ajatellaan esimerkiksi lentokoneen lentävän suoraa rataa vakiokorkeudella, tulee se näkymään detektorin reunoilla kauemmin kuin keskellä.

4 Mallin toteutus

4.1 Mallin käyttö

Mallin käytössä on parametrien muuttamiseksi tarpeen muuttaa simulaation eri komponentteja kuvaavia m-tiedostoja, joihin suurin osa parametreista on koodattu kiinteästi. Mallinnus on ylätasolla toteutettu Matlab-skriptinä, joka kokoaa eri osafunktiot yhteen ja huolehtii niiden välisestä kommunikaatiosta. Kaikki simulaation parametreista suurin osa asetetaan tällä tasolla joko suoraan tai komponentit alustavien funktioiden avulla. Tässä vaiheessa ase-



Kuva 8: Kaaviokuva siitä, kuinka linssi jakaa näkemänsä avaruuskulman detektorin pikseleille.

versio8.m	Runkoskripti
Target.m	Kohteen liikeradan määrittävä funktio
spherical.m	koordinaattimuutokset
optics.m	Optiikan suorittaman kuvauksen
radiance_2.m	Kohteesta detektorille tuleva säteilyteho
AbsorptionFactorAir.m	Ilman optisen paksuus säteen polulla
AbsorptionFactorCloud.m	Pilvien optisen paksuus säteen polulla
AbsCoeffAir.m	Ilman sirontavaikutusala
AbsCoeffCloud	Pilven sirontavaikutusala
Clouds.m	Pilvien paikka ja tiheys
GetAirNumberDensity.m	Ilman lukutiheyden korjaus pilvien mukaan
AirNumberDensity.m	Ilman lukutiheys

Taulukko 1: Simulaatio-ohjelman komponentit.

tetaan mm. kohteiden ja detektorien määrät, paikat ja parametrin, mahdolliset kiinteät kappaleet ja simulaation yleiset parametrin, kuten simulaation pituus ja yhden simulointiaskeleen kesto.

Muita säädettäviä parametrejä ovat pilvisuus ja periaatteessa myös ilman ja pilvien läpäisevyys aallonpituuden funktiona. Näitä ei kuitenkaan voi säätää ylätasoin koodista, vaan niiden arvot tulee muuttaa niitä määrittävien funktioiden määritelmätiedoista.

Mallissa on nyky muodossaan kaiken kaikkiaan 12 komponenttifunktiota ylätasoin skriptin lisäksi. Niiden tehtävät selviävät oheisesta taulukosta 1.

Kunkin komponenttifunktion toimintaa ja käyttöä on kuvattu tarkemmin simulaation eri vaiheita käsittelevissä kappaleissa.

Runkoskriptin viimeisenä, muttei vähäisimpänä toimintona on tulosten visualisointi. Visualisoinnin periaatteet on kuvattu luvussa 4.5.

4.2 Optiikan mallinnus

Perinpohjainen tapa optiikan mallintamiseen olisi käydä jokaisen detektorin jokaisen pikselin näkemä avaruuskulma läpi, ja tarkistaa onko kulman määräämässä tilavuudessa näkyviä kohteita. Koska kohteet ovat pistemäisiä, ja niitä on samanaikaisesti mallissa vähän verrattuna detektorien pikselimäärään, suurin osa pikseleistä tulisi näyttämään tyhjää. Niinpä päädyttiin las-

kentatehon kannalta kevyempään malliin, jossa nämä tyhjät ruudut jätetään kokonaan laskematta.

Optiikka toimii “nurinkurisesti”, sillä malli käy kohteet läpi ja laskee näkyvätkö ne kullekin detektorille. Tämä tarkistus tehdään muuntamalla kohteen karteesiset koordinaatit pallokoordinaateiksi siten, että detektori on tämän pallokoordinaatiston origossa. Sen jälkeen voidaan verrata kohteen θ_{tgt} ja ϕ_{tgt} – koordinaatteja suoraan detektorin näkökentän rajoihin. Ollakseen detektorin näkökentässä kohteen on toteutettava 2 ehtoa:

$$\text{mod}(2\pi)(\theta_{tgt} - \theta_{min,d}) < \theta_d \quad (10)$$

ja

$$\phi_{min,d} < \phi_{tgt} \leq \phi_{max,d} \quad (11)$$

Ensimmäinen ehto toteutuu myös silloin, jos $\phi_{tgt} = 90^{\text{deg}}$, koska silloin kohde on suoraan detektorin yläpuolella ja se nähdään θ –kulmasta riippumatta. Toisen ehdon on silti toteuduttava.

Mikäli kohde on detektorin näkökentässä, lasketaan mihin pikseliin sen lähettämä säteily kuvautuu. Se tehdään jakamalla detektorin näkökentän määrävät kulmat niitä vastaavien gridin dimensioiden pikselien määrillä, jolloin saadaan jokaista pikseliä vastaava kulma. Nyt lasketaan sekä θ :lle että ϕ :lle erotus $(\theta_{tgt}, \phi_{tgt}) - (\theta_{min,d}, \phi_{min,d})$ ja jaetaan saatu tulos pikselin näkemällä kulmalla sekä pyöristetään saatu osamäärä ylöspäin lähimpään kokonaislukuun. Tuloksena on kohdepikselin indeksit i ja j

Kun detektorin pikseli johon säteily osuu on tiedossa, kutsutaan metodia, josta on kerrottu tarkemmin väliaineen mallintamista käsittelevässä kapaleessa, joka integroi kohteen radianssin aallonpituuden sekä matkan yli ja saadaan ko. pikseliin kohdistuva lämpöteho. Jos saatu lämpöteho on suurempi kuin $2 * NEP$, missä NEP on detektorin Noise Equivalent Power–suhde, havainto tallennetaan cell–tyyppiseen observations–muuttujaan.

Pallokoordinaatit valittiin siten, että θ kiertää vaakatasossa välillä $[0, 2\pi]$ lähtien myötäpäivään positiiviselta x–akselilta. ϕ kiertää pystytasossa välillä $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ lähtien ylöspäin negatiiviselta y–akselilta.

4.3 Detektorin mallinnus

Kuhunkin detektoriin liittyy 15 riippumatonta skalaariarvoista parametria. Nämä annetaan kunkin ajon aluksi $NoD \times 15$ matriisissa, jossa NoD tarkoittaa detektorien lukumäärää. Kutakin detektoria vastaa siis yksi rivi. Rivin alkioita vastaavat parametrit ovat:

1. sijainnin x -koordinaatti
2. sijainnin y -koordinaatti
3. sijainnin z -koordinaatti
4. vertikaalinen havainnointikulma
5. horisontaalinen havainnointikulma
6. suuntauspisteen x -koordinaatti
7. suuntauspisteen y -koordinaatti
8. suuntauspisteen z -koordinaatti
9. leveys (m) horisontaalisessa suunnassa
10. leveys (m) vertikaalisessa suunnassa
11. pikselien aktiivinen pinta-ala
12. detektiivisyys
13. kaistanleveys
14. pikselien lukumäärä horisontaalisessa suunnassa
15. pikselien lukumäärä vertikaalisessa suunnassa

Suuntauspisteeksi voidaan valita, mikä tahansa avaruuden piste lukuunottamatta detektorin sijaintipistettä. Yksiköllisten parametrien arvo annetaan SI-yksiköissä. Yllä mainittujen parametrien avulla määritetään detektorin havainnointisuunta, havainnointialueen reunakulmat molemmissa suunnissa

(horisontaalinen ja vertikaalinen), yksittäisten pikselin havainnointikulman suuruus (horisontaalinen ja vertikaalinen) sekä detektorin NEP.

Detektorin pikselit aistivat optiikan niihin ohjaamaan infrapuna-alueen säteilytehoa. Jos säteilyteho kasvaa jollain hetkellä yli kaksi kertaa suuremaksi kuin NEP, tekee detektorin havainnon. Detektorin havainnot kerätään $1 \times NoD$ kokoiseen observations-celliin. Kutakin detektoria vastaa siis yksi kyseisen cellin alkio. Jos detektorin ajon aikana tekemien havaintojen lukumäärä on H on detektoria vastaava alkio $H \times k$ kokoinen matriisi, jonka rivit siis vastaavat aina yhtä havaintoa. Rivin alkiot vastaavat seuraavia tietoja havainnoista:

1. aika-askel, jolla havainto tehtiin
2. havaitun kohteen numero
3. havainnon tehneen pikselin horisontalinen koordinaatti
4. havainnon tehneen pikselin vertikaalinen koordinaatti
5. havaittu säteilyteho W

Detektorin vastefunktio on myös mallinnettu, joskin se on tämän mallin kokeissa jätetty yksinkertaisuuden vuoksi yksinkertaiseksi.

4.4 Väliaineen ja kohteen mallinnus

ohteella on viisi parametria, joita voidaan päivittää simulaation edetessä:

1. x-koordinaatti
2. y-koordinaatti
3. z-koordinaatti
4. lämpötila
5. pinta-ala

Näistä koordinaatteja käytetään kohteen havainnoinnin laskemiseen, lämpötilaa ja pinta-alaa taas kohteen lähettämän säteilyn tehon laskemiseen. Kohde alustetaan target. m-funktiolla, mutta kohteiden liikuttaminen tehdään itse pääohjelmassa. Kohtesen tiedot tallennetaan $5 \times N \times NoT$ -matriisiin, missä N on simulaation aika-askelten määrä ja NoT kohteiden määrä. Näin tulee samalla määriteltyä jokaisen kohteen lentorata seuraamalla sen koordinaatteja ajan funktiona ja nopeus perättäisten koordinaattien erotuksena (derivaattana). Vaikka kohteen rata käytännön syistä rakennetaan simulaation edetessä, voitaisiin radat yhtä hyvin laskea valmiiksi etukäteen ja simulaation kuluessa viitata aina nykyistä aika-askelta vastaavaan sarakkeeseen. Lentoradat ovat oletusarvoisesti suoria, jolloin kohdetta on helppo liikuttaa yksinkertaisesti lisäämällä jokaiseen koordinaattiin jokin vakioarvo joka aika-askeleella. Aivan yhtä hyvin voitaisiin koordinaateille määrittää aika-askeleesta riippuva funktio, jolloin kohteet voisivat lentää mielivaltaisia ratoja.

Pilvet luodaan Clouds.m-funktiolla, joka määrittää 1D tiheysjakauman pilvikerrokselle. Oikeastaan koko ilma on tällöin pilveä, tosin kun pilven tiheys on 0, käytännössä sitä ei silloin ole olemassa. Clouds.m laskee pilven hiukkastiheyden, jos parametrinä annetulle korkeudelle on määritelty pilviä. Hiukkastiheys lasketaan kaavalla

$$n = 0.62n_{ilma}, \quad (12)$$

missä n on hiukkastiheys ja p on käsin määritelty pilven suhteellinen tiheys. Kokonaisabsorptiotekijä lasketaan integroimalla pilvien tiheys pitkin polkua detektorista kohteeseen

$$A_F = \int_{r_{det}}^{r_{tgt}} (n_{pilvi} dr)^{\alpha_{pilvi}}, \quad (13)$$

missä A_F on pilvien aiheuttama kokonaisabsorptio, r_{det} on detektorin paikkavektori, r_{tgt} on kohteen paikkavektori ja α on kokeellisesti määritelty absorptiokerroin. Ilman aiheuttama kokonaisabsorptio lasketaan samoin, mutta nyt integroidaan ilman hiukkastiheyttä, joka on vakio. Kokonaisabsorptio on vielä funktio aallonpituudesta, sillä $\alpha = \alpha(\lambda)$. Absorptioker-

roin α_{ilma} on määritetty approksimoimalla veden abrosptiopiikkejä, kuten jo edellä mainittiin.¹⁷ Suurimmat piikit näkee myös kuvasta 7, jossa on esitetty ilmakehän eri aineiden, myös veden, optista transmissiota.

4.5 Visualisointi

Tulosten visualisointiin käytetään Matlabin valmiita työkaluja. Kunkin kohteen lentorata esitetään plot3-funktion avulla mustalla viivalla xyz-avaruudessa. Jokainen kohde esitetään omassa kuvassaan, jonka numero vastaa kohteen numeroa. Simulaation diskreettisuudesta johtuen, kohteen lentorata ei ole jatkuva. Tätä korostetaan esittämällä kohteen sijainti kullakin aika-askeleella ”jatkuva” lentorataa esittävän mustan viivan päälle piirretyllä pisteellä. Piste on musta, jos yksikään detektori ei havainnut kohdetta (kyseisessä pisteessä), punainen, jos tasan yksi detektori havaitsi kohteen ja sininen, jos useampi detektori teki havainnon. Punainen piste siis kertoo, että kohde on havaittu, mutta sen sijaintia ei pystytä määrittämään tarkasti. Sininen piste puolestaan tarkoittaa, että tarkka sijainti pystytään määrittämään. Detektorit esitetään kyseisissä kuvissa magentan värisinä ympyröinä ja niiden havainnointisuunta sijainti pisteestä lähtevällä magentalla janalla, jonka pituus on viisi prosenttia kuvan lävistäjistä. Kuvaa voi katsella eri suunnista käyttämällä Matlabin normaaleja kuvatyökaluja.

Yksittäisten detektorien tekemät havainnot esitetään imagesc-funktion avulla. Kyseinen funktio piirtää kunkin detektorin gridin siten että katsomissuunta on takaapäin detektorin ”läpi”. Pikseli väritetään tumman siniseksi, jos se ei tehnyt havaintoja ajon aikana. Havainnot esitetään autumn-värikartan avulla, siten että havaintoaika vaikuttaa pikselin väriin. Ajan edetessä, käytettävä väri muuttuu kellertävästä tumman punaista kohti (kts. 5). Jos pikseli tekee useita havaintoja, väritetään se viimeisen havainnon perusteella.

¹⁷<http://omlc.ogi.edu/spectra/water/abs/index.html>

5 Evaluointi ja sen tulokset

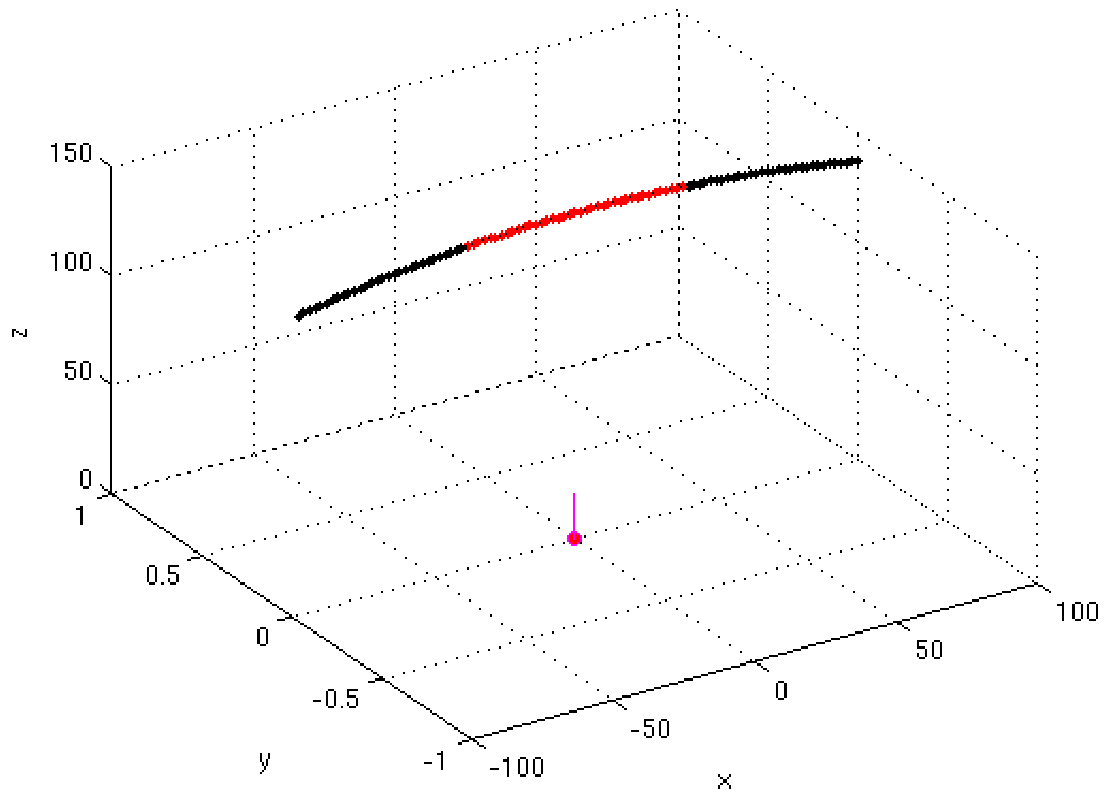
5.1 Alkuasetukset ja valitut parametrit

Simuloinnit suoritettiin Matlabilla käyttäen file.m tiedostoon integroitua visualisointimenetelmää. Simuloinneissa käytettävien detektoreiden pikseliverkoksi valittiin 256×256 suuruinen alue ja detektiivisyydeksi $10^{11} \text{ mW}^{-1} (\text{Hz})^{(1/2)}$, electric bandwidthiksi 1 Hz sekä active areaksi $150 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$.

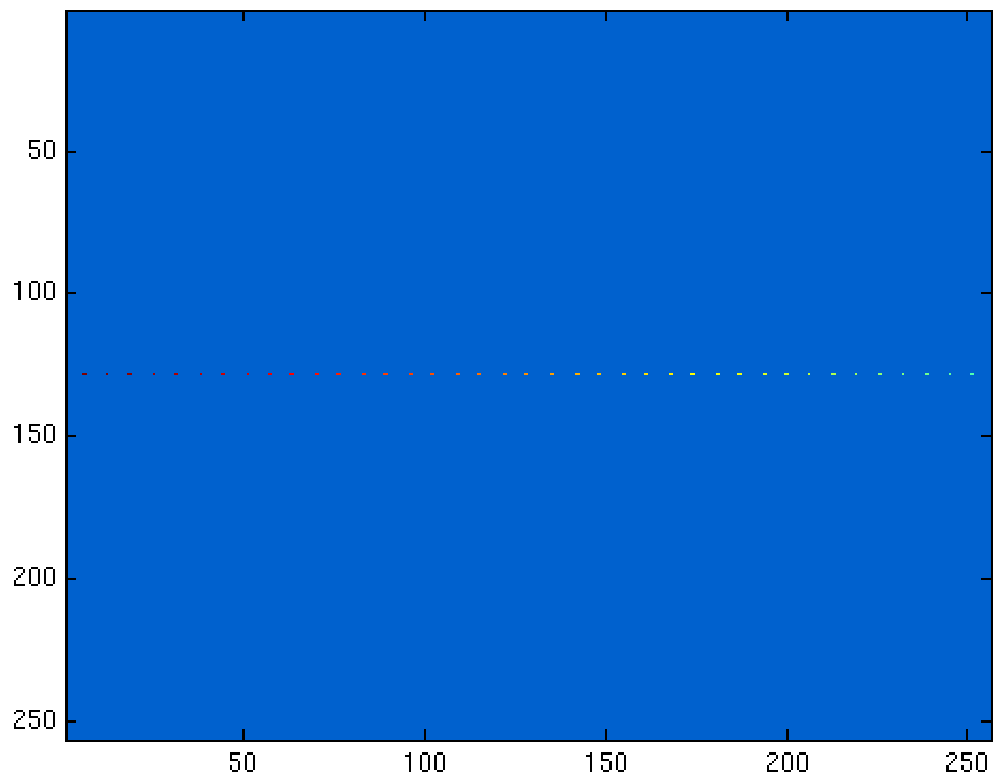
5.2 Tulokset ilman ilmakehän ja pilvien vaikutusta

Aluksi jätettiin sääolosuhteet huomioimatta ja kokeiltiin yksinkertaista tilannetta, missä käytössä on yksi detektori, joka sijaitsee origossa eli pisteessä $(0, 0, 0)$ ja se on suunnattu katsomaan suuntaan $(0, 0, 1)$ eli z-akselia pitkin. Kohteeksi valittiin lentokone, joka lentää y-akselin suuntaisesti pisteiden $(-100, 0, 100)$ ja $(100, 0, 100)$ välillä paraabelin muotoisesti saavuttaen lakipisteensä 150 m origon yläpuolella pisteessä $(0, 0, 150)$. Simuloinnin tilanne on kuvan 9 mukainen, mihin lentokoneen lentorata on merkitty mustalla viivalla ja punaisilla palloilla on havainnollistettu lentoradan pisteitä, joissa detektori on tehnyt havainnon. Yhden detektorin havaintojen perusteella ei voida sanoa kuitenkaan mitään lentokoneen etäisyydestä vaan tiedetään ainostaan, että missä suunnassa kohde sijaitsee. Detektorin havainnot detektorin pikseliverkon suhteen on esitetty kuvassa 10 eli detetori havaitsee siis suoraviivaisen liikkeen, mutta havaintokohteen etäisyydestä ei ole tietoa.

Toinen simulointi rakennettiin siten, että lentokone lensi kuten simuloinnissa 1 y-akselia pitkin 150 m korkeudella paraabelin muotoisella lentoradalla. Nyt kuitenkin käytettiin neljää detektoria, jotka asetettiin symmetrisesti origon ympärille neliön muotoiselle alueelle, jonka sivun pituudeksi määrättiin 20 m. Kuvassa 11 on esitetty simuloinnin 2 tilanne, jossa lentokoneen lentorata on merkitty mustalla viivalla ja sinisillä palloilla on havainnollistettu niitä lentoradan pisteitä, joissa vähintään kaksi detektoria on tehnyt havainnon. Näissä pisteissä saadaan siis lentokoneen paikka määriteltyä ja näin saavutetaan parempia tuloksia kuin yhden detektorin tapauksessa. Kuvissa 12-15 on esitetty detektorien havainnot, joiden avulla pystytään siis määrittämään



Kuva 9: Simulaation 1 tilanne, missä lentokone lentää y-akselia pitkin origon yläpuolelta paraabelin muotoisesti ja käytössä on 1 detektori.



Kuva 10: Detektorin havainnot simulaatiossa 1.

lentokoneen liikeradasta se osa, joka kuvassa 11 on merkitty sinisellä.

5.3 Tulokset ilmakehän mallin kanssa

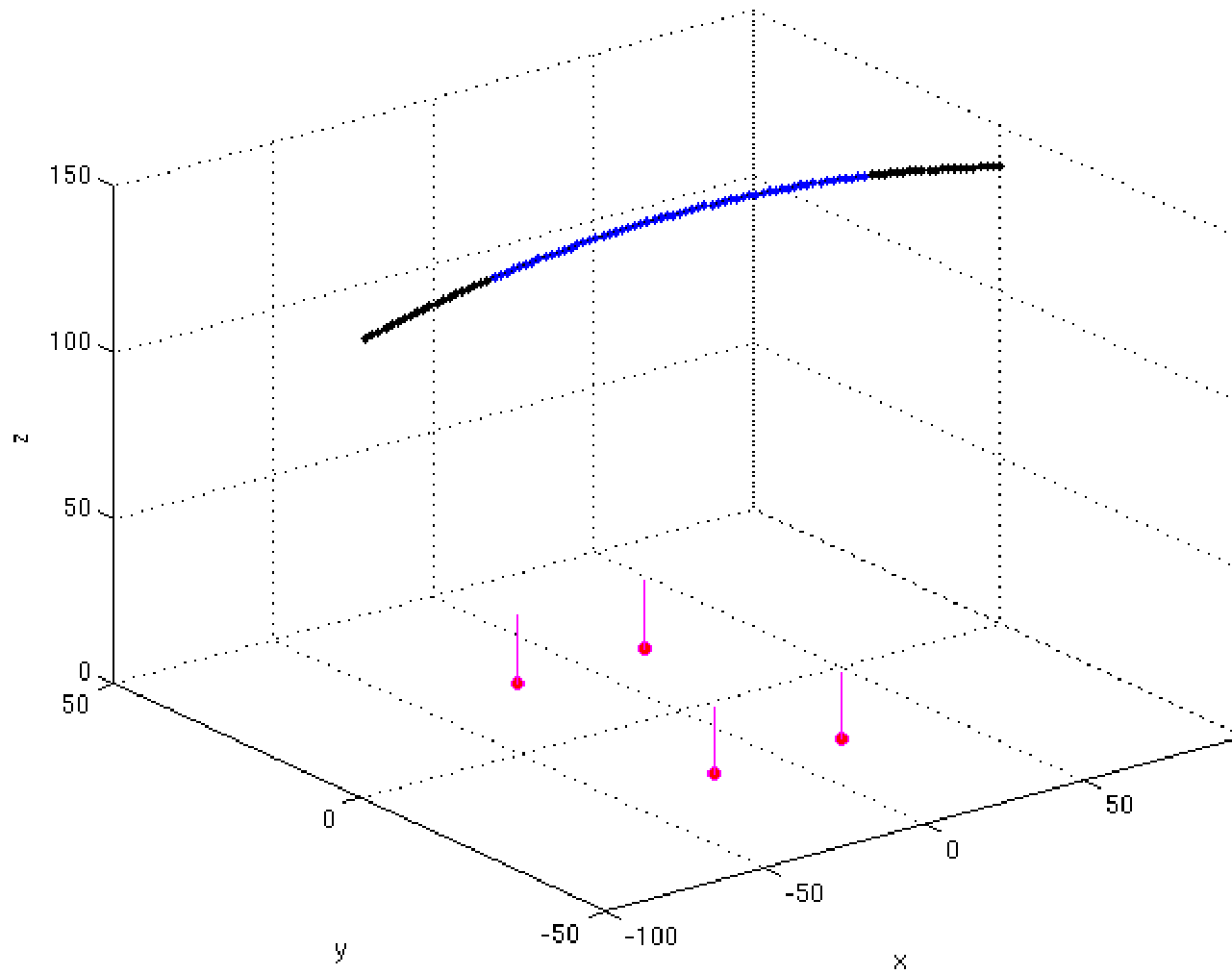
Mallia koetettiin myös täydellä ilmakehän mallinnuksella. Tästä tehtiin vain yksi ajo johtuen osin siitä, että ilmakehän huomiointi tuo laskuihin mukaan huomattavasti raskaampia numeerisia operaatiota ja näin ollen vaatii melko runsaasti aikaa verrattuna ajoihin ilman ilmakehän vaikutusta - yhden pikselin laskeminen kestää ilman ilmakehää n. sekunnin 10000-osan, kun taas vastaavalla tarkkuudella ilmakehän kanssa se vaatii n. puoli sekuntia. Koeajossa mallinnettiin maasta kohtisuoraan ylöspäin lähtevää kohdetta, jonka pinta-ala oli $0.2m^2$, nopeus $50m/s$ ja lämpötila ympäristöön verrattuna $200K$. Detektori oli asetettu sadan metrin päähän lähtöpaikasta ja se katsoi myös suoraan ylöspäin. Detektorin parametrit olivat muutoin samat kuin ilman ilmakehän vaikutusta testattaessa. Malli käyttäytyi näissä olosuhteissa täsmälleen samalla tavalla kuin testeissä ilman ilmakehän vaikutusta. Ainoana erona oli havaintojen hieman pienempi voimakkuus. Pilvien vaikutusta ei näissä kokeissa tutkittu lainkaan.

6 Loppupäätelmät

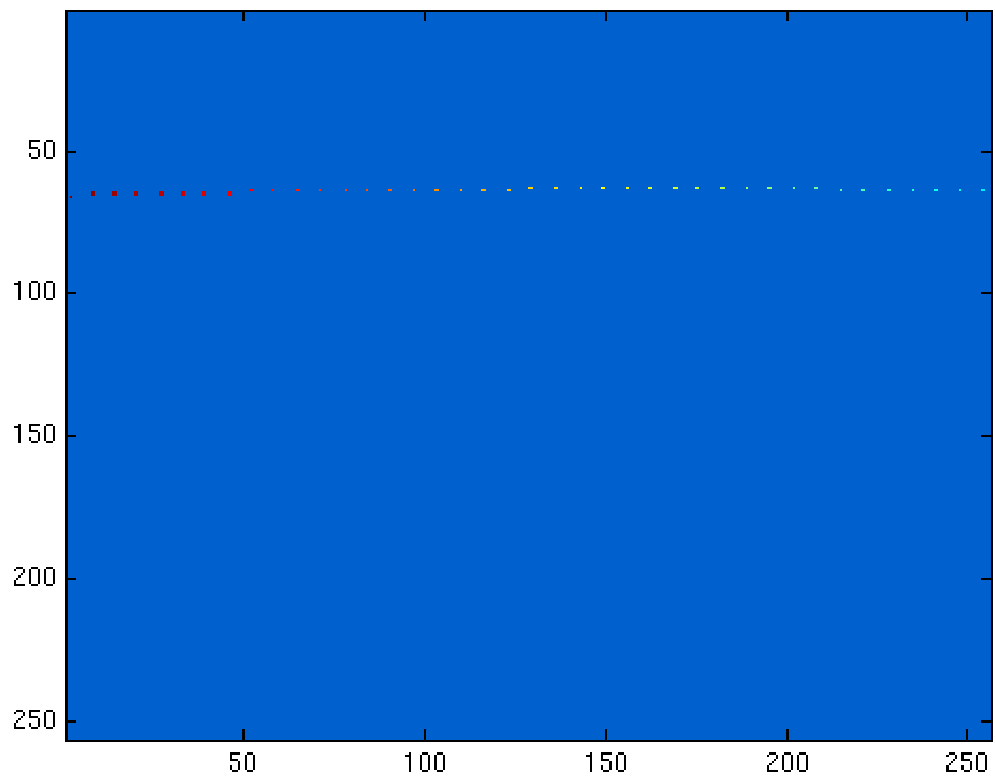
6.1 Mallin soveltuvuus

Tässä työssä esitetty malli on varsin karkea runko ilmavalvontakäytössä olevasta sensorijoukosta. Malli antaa mahdollisuudet vertailla erilaisia detektoreita idealisoituija kohteita vastaa abstrakteissa olosuhteissa. Se ei kuitenkaan nykyisessä muodossaan ole fyysikaalisesti erityisen tarkka malli, joten se ei sovellu sellaisenaan kovinkaan hyvin operatiiviseen simulointiin. Toisaalta se on pääosin varsin helposti muokattavissa tarkemmaksi. Mallin ehdottomasti suurin etu on sen keveys. Normaali ajo tavallisella pöytätietokoneella vie vain muutamia minuutteja. Tämä on ehdottomasti etu, jos halutaan tehdä yhtään laajempia parametriavaruuden kartoituksia osana normaalia työskentelyä.

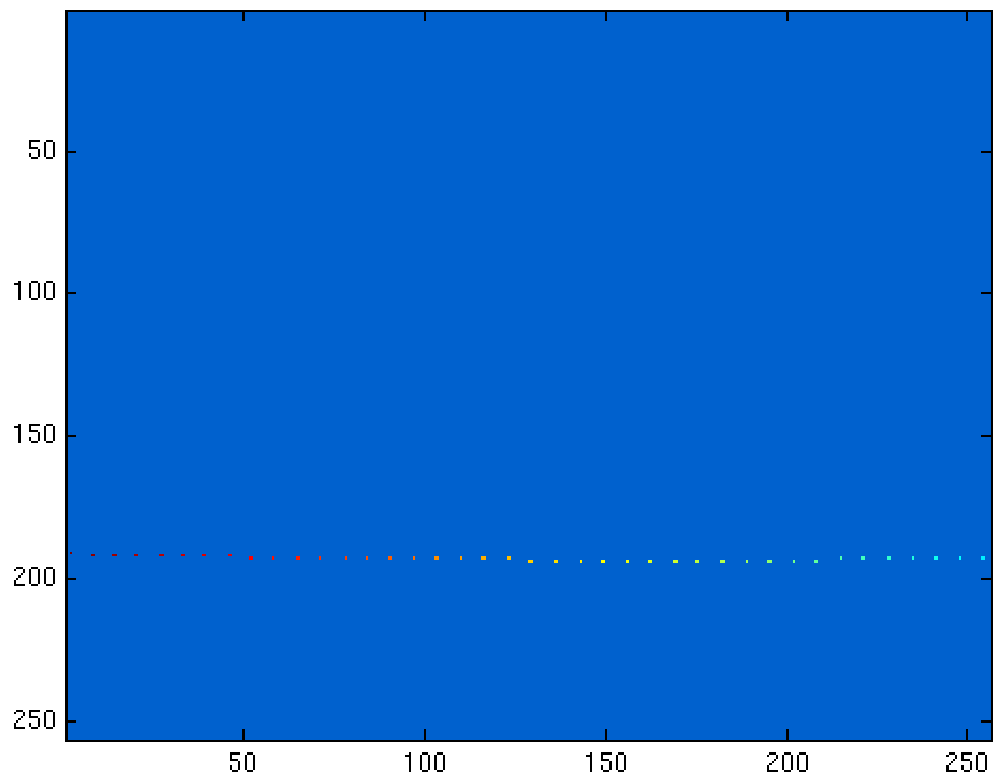
Esitellyn mallin avulla pystytään rajoitetusti analysoimaan detektorin



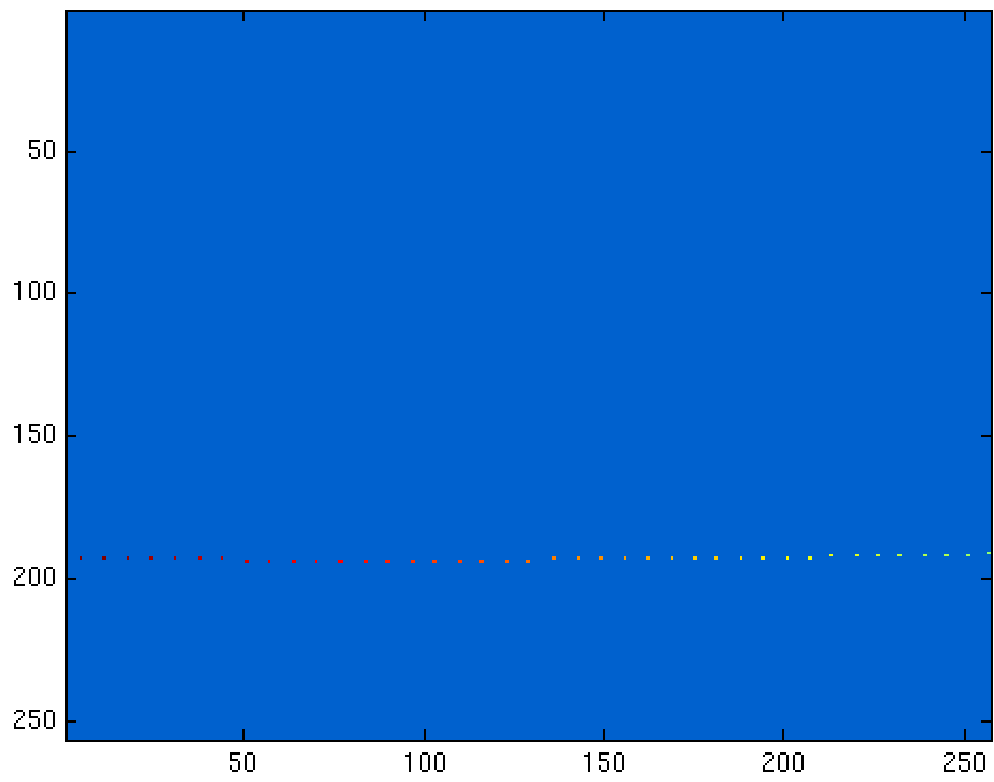
Kuva 11: Simulaation 2 tilanne, missä lentokone lentää y-akselia pitkin origon yläpuolelta paraabelin muotoisesti ja käytössä on 4 detektoria.



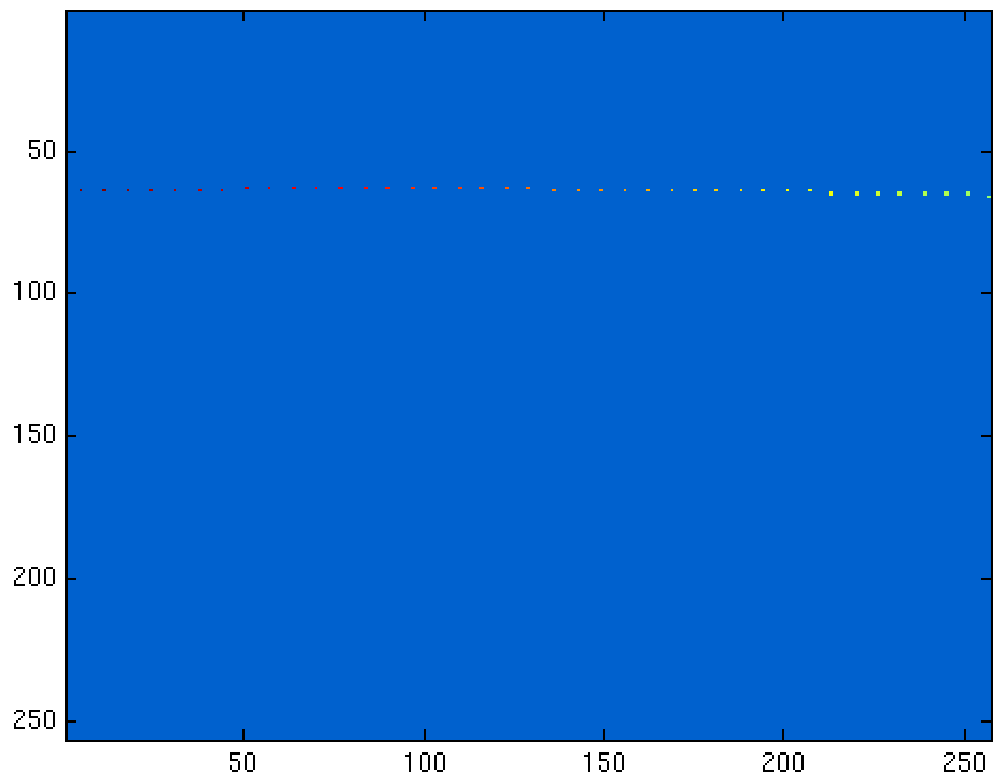
Kuva 12: Detektorin 1 havainnot simulaatiossa 2.



Kuva 13: Detektorin 2 havainnot simulaatiossa 2.



Kuva 14: Detektorin 3 havainnot simulaatiossa 2.



Kuva 15: Detektorin 4 havainnot simulaatiossa 2.

kykyä tehdä havainnot määrätystä kohteesta detektorin säilyttäessä katselusuuntansa. Työssä kokeiltiin myös miten muutama detektori yhdessä pystyvät toimimaan kohteen havaitsemiseksi. On selvää, että ainoastaan yhdellä detektorilla ei voida määrittää tarkasti kohteen paikkaa vaan tarvitaan vähintään kaksi detektoria, jotta voitaisiin edes teoriassa määrittää kohteen paikka. Kaksi detektoria on kuitenkin varsin heikko yhdistelmä määrittämään liikkuvan kohteen sijaintia lyhyelläkin aikavälillä mikäli detektorien katselusuuntaa ei muuteta. Pelkästään detektoreiden katselusuunnan dynaamisella käyttäytymisellä (esim. pyöriminen) ei saataisi tarkkoja tuloksia.

Kaikessa karuudessaan esitelty malli tarjoaakin mahdollisuuden selvittää perustaktiikoita sensorien yhteiskäytölle. Lievän hienosäädön jälkeen sen pitäisi toimia myös tällaisissa tehtävissä varsin hyvin.

6.2 Kehitysmahdollisuuksia ja -tarpeita

Tässä työssä esitellyn mallin keskeisimpiä puutteita ovat kohteen idealisointi pisteeksi ja hieman kömpelö käytettävyys. Ensisijaisena kehityskohteenä tulisikin olla kohteen mallinnuksen kehittäminen. Pistemäisen, joskin määritellyn alaisen kohteen käsittelystä pitäisi pystyä siirtymään todellisiin avaruuskappaleisiin. Tärkeä muutoskohde on myös ilmakehän tausta-IR-säteilyn mallintaminen. Nyt malli olettaa, ettei taustasta saavu lainkaan säteilyä.

Kun nämä kaksi muutosta on saatu tehtyä simulaattorille voisi rakentaa kunnollisen käyttöliittymän. Käyttöliittymän suunnittelun yhteydessä myös joitan hieman hankalasti säädettäviä parametrejä, kuten pilvisyyttä voitaisiin tehdä helpommiksi muuttaa. Visualisoinnin ongelmat voitaisiin pyrkiä huomioimaan käyttöliittymän suunnittelussa nykyistä paremmin. Yksi isoimmista ongelmista visualisoinnissa on se, ettei vastaanotetun signaalin vahvuus näy missään tulosteessa.

Toissijaisena kehityskohteenä voi pitää mallin fysikaalisen karkeuden poistamista. Muun muassa ilmakehän ja pilvien vaikutukseen säteilyn etenemiseen voidaan rakentaa paljon hienovaraisempia malleja. Samoin käytetty ideaalinen optiikka voitaisiin mallintaa uudelleen sellaiseksi, joka vastaa enemmän todellisuudessa käytettyjä laitteita. Tämä pätee myös detektoriin, jonka

kohinatason voisi mallintaa stokastisesti nyt käytössä olevan deterministisen kynnysarvon sijasta. Tämän on kuitenkin merkittävästi laajempi ongelma, joka liittyy signaalinkäsittelyyn.

Operatiivisena simulaattorina mallia kannatta käyttää siihen asti, kunnes yllämainitut muutokset on saatu tehtyä, varsin rajallisesti. Niiden kannalta olisi kuitenkin syytä ottaa joukko tekijöitä huomioon. Jotta saavutettaisiin hyviä tuloksia havainnoinnin mielessä, olisi detektoreista rakennettava eräänlainen detektoriverkko yhden detektorin vankan mallin ympärille. Tällaisen useasta detektorista muodostuvan verkon optimaalinen rakentaminen vaatii kuitenkin runsaasti työtä ja verkon hyödyllisyys riippuu luonnollisesti kohteena olevan kappaleen liikeradasta, nopeudesta jne. On myös selvää, että detektoriverkon rakentamisesta seuraa monitavoitteinen optimointiongelma, koska detektoreiden lukumäärä ei voi olla mielivaltaisen suuri, jos otetaan huomioon esim. resurssirajoitukset sekä käytännön toteuttaminen. Lisäksi on detektoreiden käyttötarkoitukseen liittyy erilaisia preferenssejä.

Malliin olisi myös hyvä integroida yksinkertainen “sensoriverkkokäyttöliittymä”, jolla detektoreita voisi sijoitella haluttuihin paikkoihin ja niiden ominaisuuksia voisi säätää. Tällöin simuloinnit olisi huomattavasti nopeampaa toteuttaa mikä parantaisi huomattavasti käyttäjäystävällisyyttä ja saattaisi helpottaa mm. optimaalisen detektoriverkon rakentamista. Lisäksi malliin voisi rakentaa palikan, joka muuttaisi detektoreiden havainnot konkreettisiksi tilanteiksi “oikeaan” koordinaatistoon. Toisin sanoen visualisoinnin kannalta olisi olennaista pystyä piirtämään detektorien havainnoista havaitun kohteen mahdolliset paikat kunakin ajanhetkenä.

Sensoriverkon kunnollinen mallintaminen vaatisi kuitenkin sensorien välisen viestinnän mallintamista, mikä puolestaan edellyttää osaltaan signaalinkäsittelyn määrittämistä. Näiden toteuttamien on kuitenkin vasta melko kaukainen tavoite tämän mallin jatkokehittelyn kannalta.

Viitteet

- Chandrasekhar, S: Radiative Transfer. Dover, 1960.
- Hamamatsu: Characteristics and Use of Infrared Sensors, http://sales.hamamatsu.com/assets/applications/SSD/Characteristics_and_use_of_infrared_detectors.pdf
- Kaufman, Y.J: The Atmospheric Effect on Remote Sensing and Its Correction. Teoksessa Asrar, G. (ed.): Theory and Applications of Optical Remote Sensing. Wiley, 1989.
- Mansfield, M., O'Sullivan, C: Understanding Physics. Wiley, 1998.
- Raytek 3i series, http://www.raytek-europe.com/tools/free_form_content/view.html?phase=show&id=1077795078&tool_id=38&cat_id=2.2.6
- Rdf corporation: Simplified Heat Flow Measurement: Construction and Principles of Operation, http://www.rdfcorp.com/anotes/pa-hfs/pa-hfs_02.shtml
- Schanda, E: Physical Fundamentals of Remote Sensing. Springer, 1986.
- Teledyne Scientific & Imaging - IR Sensors, http://www.rsc.rockwell.com/infrared_sensors/index.html
- Uotila, J: Uncooled Infrared Imaging Sensors. Teoksessa Jormakka, J. ja Rissanen A: State-of-the-art in Sensors. PvTT, 2006.
- Weichel, H: Laser Beam Propagation in the Atmosphere. Sarjassa Tutorial Texts in Optical Engineering, vol. TT 3. SPIE, 1990.
- Wilson, J.S. (ed.): Sensor Handbook. Newnes, 2005.