

Miina Rautiainen, Pauline Stenberg, Janne Heiskanen, Matti Mõttus, Lauri Korhonen, Jouni Peltoniemi, Juha Suomalainen, Sanna Kaasalainen ja Terhikki Manninen

Metsän kaukokartoituksen perustutkimus?

Johdanto

”Satelliitista voidaan tarkistaa kuinka paljon metsä kasvaa.” ”Arvioidaan ilmastonmuutos satelliittikuvista!” ”Nykyäänhän *kaiken* näkee satelliittikuvista.” Täytyy todeta, että on itsetuntoa hivelevää olla kaukokartoitustutkija, kun tällaisia lausahduksia kantaatuu korviin. Mitäpä me emme satelliittikuvista saisi irti?

Toisaalta on huolestuttavaa havaita, että usein yleisön odotukset kaukokartoituksella saatavasta ympäristötiedon määrästä ja luotettavuudesta sekä tiedon tuottamisen helppoudesta eivät vastaa ollenkaan sitä, mitä kaukohavainnoista (eli maanpäällisen tarkastelukohteen heijastamasta sähkömagneettisesta säteilystä) on ylipäättänsä mahdollista tulkita. (Rajamme tarkastelun ulkopuolelle termisen alueen havainnot.) Usein tulkitulta luonnonvaratiedolta odotetaan esimerkiksi parempaa spatiaalista resoluutiota kuin mitä tämän hetkisten tulkintamallien ja teknologian avulla on mahdollista saavuttaa. Yleistä epävarmuutta maallikoille aiheuttaa se, että he eivät tiedä millaisiin kysymyksiin kaukokartoituksella voidaan todellisuudessa vastata.

Erityisesti sekaannusta seuraa (jopa metsäihmisten joukossa) siitä, että ei osata erottaa kaukohavainnoista tulkittavia ns. biofysikaalisia ja muita muuttujia. Biofysikaalisilla muuttujilla tarkoitetaan niitä muuttujia, jotka suoraan vaikuttavat sähkömagneettisen säteilyn käyttäytymiseen kasvustossa ja voidaan näin ollen suoraan mitata (tai arvioida) kaukokuvilta. Näitä ovat

esimerkiksi kasvillisuuden absorboima fotosynteettisesti aktiivinen säteily, lehtialaindeksi ja kasvuston klorofyllipitoisuus. Toisen ryhmän muodostavat muuttujat, jotka korreloivat vahvasti biofysikaalisten muuttujien kanssa – metsän optisessa kaukokartoituksessa puuston runkotilavuus on tavallisin esimerkki tästä ryhmästä. Kolmas ryhmä eli hybridimuuttujat sen sijaan eivät ole suoraan mitattavia, vaan muodostuvat useista biofysikaalisista ja muista muuttujista. Tyypillinen esimerkki hybridimuuttujasta on maankäyttö- tai metsätyyppiluokitus.

Yllättävän yleinen ja väärä käsitys on myös, että kaukokartoitus ja paikkatietojärjestelmät (GIS) ovat sama asia. Kaukokartoituksen perustutkimuksen piirissä työskentelevät eivät välttämättä ole mitään ”gissi-ihmisiä”, eivätkä paikkatietojärjestelmien asiantuntijat kaukokartoittajia. Kyseessä on kaksi toisiaan tukevaa, mutta itsenäistä tieteenalaa tai menetelmäryhmää. On mahdollista, että sekaannuksen yhtenä syynä on suomenkielinen termi ”kaukokartoitus”, joka ohjaa ajatukset karttoihin ja maanmittaukseen. Kaukokartoituksen sijasta olisikin kenties parempaa puhua kaukohavainnoinnista. Esimerkiksi englanniksi kaukokartoitus on ”remote sensing”, ruotsiksi ”fjärranalys”, viroksi ”kaugseire”, venäjäksi ”Дистанционное зондирование” ja ranskaksi ”télé-détection”. Yksikään näistä termeistä ei yhtä suorasti viittaa karttoihin kuin niiden suomenkielinen vastine. Toinen mahdollinen syy sekaannukseen on se, että tieteissä, joissa kaukokartoitusta sovelletaan (esimerkiksi metsätieteissä ja maantieteessä), kaukokartoitus

nähdään tyypillisesti vain yhtenä menetelmänä tuottaa paikkatietoa. Arviomme mukaan metsätieteissä on vain hyvin vähän kaukokartoittajia, jotka eivät tunne myös GIS-menetelmiä. Sen sijaan GIS:in parissa työskenteleviä, jotka eivät tunne kaukokartoitusta, on huomattavasti enemmän. Jos on taustaltaan metsätieteilijä tai maantieteilijä, ei välttämättä muista, että suurelle osalle kaukokartoittajista GIS on kuitenkin suhteellisen vieras ala, jolle ei heidän tekemässään säteilyfysiikkaan, ilmatieteeseen tai insinööritieteeseen liittyvässä kaukokartoituksen perustutkimuksessa ole välttämättä edes tarvetta.

Vaikka odotukset satelliittikuvista saatua tietoa kohtaan ovat korkealla, on samalla ristiriitaista huomata, että usein kaukokartoitus mielletään vain temaattisten karttojen tuottamiseksi, joskus myös alueellisten muutosten seurannaksi ilma- ja satelliittikuvilta. Valitettavan harvoin tunnetaan kaukokartoituksen perustutkimusta ja taustalla olevaa monimutkaista luonnontieteellistä ilmiötä, jonka selittäminen vaatii runsaasti säteilyfysiikkaan perustuvaa mallitustyötä lyhytaaltoisen säteilyn käyttäytymisestä kasvustossa sekä huolellisia maasto- ja laboratoriomittauksia metsän rakenteesta ja optisista ominaisuuksista. Satelliittikuvahan ei ole ”tavallinen kuva” eikä yleensä myöskään suoraan verrattavissa digitaalisten kameroiden ottamiin kuviin. Satelliittikuva on numeerinen matriisi, joka sisältää sarjan säteilymittauksia eri aallonpituuksilla. Satelliittinstrumentin tekemisissä mittauksissa katsotaan (tai mitataan) vierekkäisiä pisteitä maan pinnalta, jonka jälkeen mittauksista kootaan satelliittikuva liittämällä mittauksiin koordinaatit.

Tässä artikkelissa esittelemme metsän optisen kaukokartoituksen perustutkimuksen pääpiirteitä sekä luomme lyhyen katsauksen alan viimeaikaiseen tutkimukseen Suomessa. Tuloksekkaassa tutkimusyhteistyössä on ollut mukana Helsingin yliopiston, Geodeettisen laitoksen, Ilmatieteen laitoksen, Metsätutkimuslaitoksen, Joensuun yliopiston ja VTT:n tutkijoita ja opiskelijoita 2000-luvun alusta alkaen.

Mitä ovat metsän heijastusmallit?

Kasvillisuuden ja lyhytaaltoisen säteilyn vuorovai-
kutusten fysikaalisten perusteiden ymmärtäminen on tärkeää kaikille, jotka joutuvat tekemisiin nyky-

aikaisten kaukohavaintojen tulkinnan kanssa. Satelliitti- tai ilmakuvien numeeriseen tulkintaan sopivien menetelmien valinta ja erityisesti ongelmatilanteissa (tai toisilla maantieteellisillä alueilla) vaihtoehtoisten menetelmien kehittäminen sekä luotettava ja teoreettisesti perusteltu kaukohavaintojen tulkinta edellyttävät taustalla olevan fysikaalisen ilmiön ymmärtämistä. Mitä paremmin hallitsee alan fysikaalisia perusteita, sitä paremmat ovat myös valmiudet kehittää täysin uusia numeerisia tulkintamenetelmiä ja mittalaitteita. Lisäksi sähkömagneettisen säteilyn käyttäytyminen erilaisissa väliaineissa herättää runsaasti puhtaasti akateemista mielenkiintoa – uudet sovellukset tulevat aikanaan, ehkä jo pian.

Metsän kaukokartoituksessa on käytössä kolme menetelmäryhmää optisten satelliittikuvien numeeriseen tulkintaan: tilastolliset mallit, fysikaaliset heijastusmallit sekä edellisistä kehitetyt hybridimenetelmät. Menetelmäryhmät eivät ole kilpailevia – vaikka joskus sellainen kuva syntyy – vaan täydentävät toisiaan ja vastaavat hyvin erilaisiin tarpeisiin. Empiirisissä menetelmissä sovitetaan tilastollisia malleja satelliittikuvan eri kanavien heijastussuhteiden tai monikanavamuunnosten ja maastossa mitattujen tunnusten välille. Sovitettujen mallien avulla ennustetaan maastotunnuksia alueille, joilta on satelliittikuva mutta ei maastomittauksia. Fysikaalisten heijastusmallien avulla taas konstruoidaan matemaattisesti jonkin kohteen (esimerkiksi metsän) heijastuskäyttäytymistä sen kolmiulotteisen rakenteen ja optisten ominaisuuksien perusteella. Myös heijastusmallien avulla voi tehdä kaukohavaintojen tulkintaa – mallia täytyy vain käyttää väärinpäin eli invertoida.

Heijastusmalleja on yhtäläillä kehitetty esimerkiksi maaperälle, lumelle, ilmakehälle ja yksittäisille lehdille – metsätieto muodostaa vain pienen osan kaikesta siitä informaatiosta, jota kaukokartoituksen ja heijastusmallien avulla maapallon tilasta saadaan. Fysikaalisten heijastusmallien vahvuudet perustuvat siihen, että mallit nojaavat vahvasti säteilyfysiikan lakeihin. Näin ollen ne eivät ole satelliitti-instrumentista riippuvaisia ja toimivat kaikilla aallonpituusalueilla sekä kaikissa mittauskulmissa. Heijastusmallien heikkoutena taas voidaan pitää niiden aikaa vievää kehitystyötä ja, riippuen mallityypistä, tarkasteltavan kohteen rakennetta kuvaavia yksinkertaistavia oletuksia.

Koko metsän optinen kaukokartoitus, mukaan lukien heijastusmallit, perustuu fysiikasta tunnettuun säteilynsiirron teoriaan (Chandrasekhar 1950), jonka avulla kuvataan säteilyn kulkua kasvustossa ja kasvustosta ulos kohti satelliitti-instrumenttia. Yleisemmin säteilynsiirron yhtälö kuvaa sähkömagneettisen säteilyn käyttäytymistä väliaineessa, joka absorboi, sirottaa ja emittoi säteilyä. Yhtälö sitoo teoreettisesti toisiinsa kaikki kaukokartoituksen sovellusalat (mm. kasvillisuus, ilmakedä, lumi) ja -tekniikat. Yhtälö on laajasti käytössä kaukokartoituksen rinnakkaisilla aloilla esimerkiksi astronomiassa, optiikassa, meteorologiassa ja ydinfyysikassa. Säteilynsiirron yhtälöllä kuvataan fotonien määrän muutosta tarkasteltavan tilavuuden (kuten metsikön latvuston) sisällä. Yhtälölle ei yleensä ole analyttistä ratkaisua kolmiulotteisessa, heterogeenisessä väliaineessa, joten sen ratkaisemiseksi on kehitetty runsaasti numeerisia menetelmiä eri sovelluksia varten.

Metsän fysikaalisten heijastusmallien historian tärkeimpiä syntypaikkoja 1960-luvulla oli Tarton observatorio, jossa Akateemikko Juhan Ross ja hänen silloinen opiskelijansa (nykyinen professori) Tiit Nilson muotoilivat säteilynsiirron teorian ensimmäisinä maailmassa koskemaan kasvillisuutta (Ross ja Nilson 1968). Ensimmäiset heijastusmallit kehitettiin peltokasveille, sillä niiden kolmiulotteisen rakenteen ja optisten ominaisuuksien mittaaminen ja mallittaminen oli helpompaa kuin monikerroksisen metsän. Ensimmäiset realistiset ja käytäntöön sovellettavat metsän heijastusmallit tehtiin 1980-luvulla Tarton observatoriossa (Nilson ja Kuusk 1985, Nilson 1990) ja Bostonin yliopistossa (Li ja Strahler 1985) – toisistaan tietämättä kylmän sodan takia. Metsän heijastusmallien rinnalla kehitettiin runsaasti myös muille kasvillisuustyypeille sopivia heijastusmalleja. Vuonna 2000 heijastusmallien historiassa otettiin seuraava suuri askel, joka saavuttikin jo suuremman yleisön huomion: kasvillisuuden heijastusmallilla tehtiin ensimmäinen globaali, operatiivinen sovellus, kun NASA alkoi tuottaa viikoittain koko maapallon lehtialaindeksikarttaa MODIS-satelliittikuvista Bostonin yliopiston tutkijoiden kehittämän heijastusmallin (Knyazikhin ym. 1998) avulla. Toiminta jatkuu yhä, ja tuotetut aineistot ovat vapaasti kaikkien saatavilla.

Heijastusmallit metsäntutkimuksessa

Metsätieteilijä käyttää fysikaalisia heijastusmalleja selvittääkseen miten metsikön heijastussignaali syntyy, mitkä metsän rakennetta kuvaavat muuttujat ovat siinä keskeisimmässä rooleissa ja mitkä ovat teoreettiset 'raja-arvot' kaukomittauksista arvioitaville tunnuksille. Fysikaalisilla heijastusmalleilla tehtyä simulointityötä voidaankin pitää metsän kaukokartoituksen perustutkimuksena. Heijastusmallien inversio sen sijaan on jo soveltavaa tutkimusta.

Fysikaalista heijastusmallia voidaan käyttää kahdella tavalla: heijastussimulointeihin tai kaukohavaintojen tulkintaan inversiolla. Heijastussimuloinneissa tunnetaan metsän rakenne ja simuloidaan sen perusteella metsän heijastusominaisuudet vastaamaan tiettyjä auringon valaistus- ja sensorin katselukulmia. Mallin inversio eli kääntäminen vuorostaan tarkoittaa, että tunnetaan metsän heijastusominaisuudet (eli käytettävissä on esimerkiksi satelliittikuva alueesta) ja ratkaistaan tämän informaation perusteella metsän rakenteellisia tai biokemiallisia ominaisuuksia. Mallien inversio-tekniikoita on runsaasti, mutta on syytä muistaa, että inversio on ns. huonosti asetettu ongelma (engl. ill-posed problem), sillä monet metsän rakenteellisten ja biokemiallisten ominaisuuksien yhdistelmät voivat aiheuttaa samat heijastusominaisuudet. Yksiselitteistä ratkaisua inversio-ongelmaan ei siis ole.

Millaisia metsän heijastusmallit sitten käytännössä ovat? Metsille soveltuvat heijastusmallit voidaan jakaa seuraavaan kolmeen pääluokkaan: geometris-optisiin malleihin, samean väliaineen malleihin ja hybridimalleihin. Geometris-optisissa malleissa (esim. Li ja Strahler 1985, Chen ja Leblanc 1997) kasvusto koostuu kolmiulotteisista, läpinäkymättömistä kappaleista, kuten kartioista tai ellipsoideista, jotka on sijoitettu tietyn keskinäisen tilajärjestyksen mukaan kuvaamaan puiden latvuuksia. Näissä malleissa säteilyn kulku kasvustossa perustuu todennäköisyyksiin, joilla säteily heijastuu takaisin suoraan latvuskappaleen ulkopinnalta. Geometriset mallit soveltuvat parhaiten kuvaamaan harvojen kasvustojen heijastusta kun aurinko on korkealla, sillä silloin voidaan jättää huomioimatta kappaleiden keskinäinen varjostus sekä monisironna, jota todellisuudessa tapahtuu latvusten sisällä. Monisironnalla tarkoitetaan säteilyä, joka siroaa useamman kuin yhden kerran kasvustossa.

Toista fysikaalisten heijastusmallien ääripäätä edustavat samean väliaineen mallit (esim. Suits 1972, Ross 1981, Verhoef 1984, Kuusk 1995), joissa kasvuston syvyydellä ja latvusdimensioilla ei ole merkitystä, vaan koko metsikön latvuskerros mallitetaan yleensä joko lehtialaindeksin tai lehtialatiheyden avulla. Kasvustosta heijastunut säteily riippuu lehdille ja neulasille annetuista optisista ominaisuuksista sekä lehtiorientaatiosta, sillä yksittäisten puiden latvuksilla ei ole varsinaista geometrista muotoa, vaan ne sulautuvat yhdeksi latvuskerrokseksi. Tällaiset mallit kuvaavat parhaiten horisontaalisesti tiheää ja yhtenäistä latvuskerrosta.

Hybridimallit (esim. Nilson ja Peterson 1991, Ni ym. 1999, Kuusk ja Nilson 2000, Chen ja Leblanc 2001, Peddle ym. 2004) muodostavat kolmannen ja monimutkaisimman ryhmän metsikön fysikaalisista heijastusmalleista. Latvukset mallitetaan geometrisiksi kappaleiksi ja puiden tilajärjestys määrätään. Erona puhtaasti geometrisiin malleihin on kuitenkin se, että säteily voi kulkea ja sirota myös latvusten sisällä, jolloin monisironna on mahdollista. Monisironnalla on huomattava merkitys aallonpituuksilla, joilla lehtien sirontakerroin on suuri, kuten esimerkiksi lähi-infrapuna -alueella. Havumetsissä monisironnan merkitystä (esiintymistodennäköisyyttä) kasvattaa latvuston ryhmittäinen rakenne. Edellisiin mallityyppeihin verrattuna hybridimallit vaativat huomattavasti enemmän syöttötietoja, mutta toisaalta metsän rakenteesta tehtyjen yksinkertaisuuksien määrä on pienempi.

Fysikaalisilla heijastusmalleilla tehdyissä tutkimuksissa on osoitettu metsän latvuskerroksesta heijastuvaan säteilyyn vaikuttaviksi keskeisiksi rakenteellisiksi tekijöiksi metsän vihreän biomassan määrää ja tilajärjestystä kuvaavat muuttujat. Näitä ovat esimerkiksi lehtialaindeksi (kuvaava sirottavan aineen tiheyttä) ja latvuspeitto ja -syvyys (kuvaavat sirottavan aineen tilavuutta). Listaa voidaan kuitenkin pidentää, ja todeta, että tärkeimmät metsän heijastussuhteeseen vaikuttavat tekijät ovat latvuspeitto, latvusten muoto ja tilajärjestys, lehdet ja neulaset (niiden pinta-ala, tiheys, inkliinaatiokulmat, tilajärjestys ja optiset ominaisuudet) sekä rungot (tilajärjestys, runkojen pinta-ala ja optiset ominaisuudet). Tärkeä huomio on, että esimerkiksi runkotilavuus ei kuulu näiden biofysikaalisten muuttujien joukkoon optisessa kaukokartoituksessa! Runkotilavuuden

arviointi optisilta kuvilta kuitenkin onnistuu, jos se korreloi esimerkiksi latvuspeiton tai lehtialaindeksin kanssa. Mitattu signaali kuitenkin satureituu, kun latvuspeitto ei enää kasva vaikka runkotilavuus kasvaa.

Tärkeää on myös muistaa, että metsä ei ole vain puustoa. Maaston topografialla, senttimetritasosta kilometritasoon on myös vaikutuksensa, joita ei kovin pitkälle ole vielä mallitettu. Lisäksi paljas maaperä ja aluskasvillisuus voivat harvapuustoisissa metsissä dominoida heijastussignaalia, jolloin puustokerroksen ominaisuuksien arvioiminen kaukomittauksista on haasteellista. Tämän vuoksi yksi keskeisiä kaukokartoituksen perustutkimuksen osa-alueita onkin dokumentoida metsän eri elementtien (lehdet, neulaset, versot, rungot, aluskasvillisuus, maaperä) heijastusominaisuuksia huolellisilla maasto- ja laboratoriomittauksilla. Lisäksi on otettava huomioon, että myös ilmakehä vaikuttaa mitattuun heijastussignaaliin; se muuttaa säteilyn suuntajakaumaa ja spektriä. Ilmakehässä tapahtuvaan sirontaan vaikuttavat mm. säteilyn kulkema matka, aallonpituus ja sää. Vain osa metsästä lähteneestä säteilystä heijastuu satelliitti-instrumenttiin saakka ja muodostaa 'satelliittikuvan'.

Maasto- ja laboratoriomittaukset heijastusmallien kehitystyössä

Optisen kaukokartoituksen perustutkimuksessa tarvitaan erityisesti kahdenlaisia mittauksia: 1) mittauksia, joiden avulla kuvataan metsän vihreän latvuston rakenne ja 2) mittauksia, joiden avulla kuvataan metsän eri elementtien optiset ominaisuudet. Tavallisista inventointiaineistoista ei vielä saada luotettavaa tietoa metsän latvusrakenteesta esimerkiksi lehtialaindeksin tai latvuspeiton muodossa, eikä metsän eri elementtien optisten ominaisuuksien mittaaminenkaan ole laajalti tunnettu tieteenala. Näin ollen metsän heijastusmallien kanssa työskentelevien on perehdyttävä laajasti erilaisiin mittaustekniikoihin sekä hakeuduttava yhteistyöhön toisten alojen asiantuntijoiden kanssa.

Metsän vihreän latvuston rakenteen määrittämiseen on useita lähestymistapoja, joista yleisin ja teoreettisesti perustelluin on latvuston lehtialaindeksin ja aukkoisuuden mittaaminen. Koska merkittävä osa

metsiköstä heijastuneesta näkyvän valon alueen ja infrapuna-alueen säteilystä riippuu tutkimuskohteen vihreän biomassan määrästä eli lehtialaindeksistä, voidaan metsän heijastussuhde mallittaa esimerkiksi samean väliaineen malleilla lähes pelkän lehtialaindeksitiedon avulla. Pidemmälle kehitetyissä heijastusmalleissa otetaan huomioon myös latvuston aukkoisuus tai latvuspeitto, jonka kautta voidaan jakaa metsän heijastussuhde latvuserroksesta ja aluskasvillisuudesta muodostuneisiin osiin.

Havumetsien lehtialaindeksin (LAI:n) suora mittaaminen on mahdollista vain destruktiivisesti, jolloin kerätään kasvuston kaikki neulaset ja määritetään niiden pinta-ala. Lehtipuulle vaihtoehtona on myös karikkeen keräys. Destruktiivinen otanta ei kuitenkaan luonnollisesti sovellu metsien lehtialaindeksin (eikä muidenkaan tunnusten) muutosten seurantaan, joten on kehitetty epäsuoria menetelmiä lehtialaindeksin estimoimiseen. Lehtialaindeksiä on usein arvioitu allometrisillä biomassayhtälöillä, jotka perustuvat puun osien välisiin mittasuhteisiin (esim. Kaufman ja Troendle 1981, Marklund 1988). Näiden yhtälöiden rinnalla ovat laajassa käytössä optiset menetelmät, joissa LAI määritetään mittaamalla latvuston läpäisyyttä säteilyä (esim. Welles 1990, Chen 1996, Welles ja Cohen 1996) esimerkiksi LAI-2000 - tai TRAC-laitteella tai kalansilmäkuvista. Näillä menetelmillä saatu lehtialaindeksi perustuu ilmakehäfysiikasta tuttuun Beerin lakiin eli teoreettiseen riippuvuuteen, joka vallitsee latvuston läpäisseen säteilyn ja LAI:n sekä latvusrakenteen välillä (Monsi ja Saeki 1953). Optisten menetelmien ongelmana erityisesti havumetsien mittauksessa on kasvuston ryhmittyminen latvuksiin ja versoihin, mikä sotii Beerin lain taustalla olevan homogeenisen kasvuston oletuksen kanssa. Epähomogeenisuutta voidaan kvantitatiivisesti kuvata mm. kasvuston aukkojen kokojakaumalla (Chen ja Cihlar 1995). Tätä ominaisuutta käytetäänkin hyväksi TRAC-laitteen tuottamissa LAI-estimaateissa, joissa ryhmittyneisyyden vaikutuksia pyritään poistamaan. Havumetsien kohdalla erityisen haasteen aiheuttaa kuitenkin neulasten tiivis pakkautuminen versoihin. Koska optinen anturi 'näkee' versojen siluettialat eikä yksittäisiä neulasia, tuottavat nämä menetelmät usein liian pienen lehtialaindeksiarvion (Stenberg ym. 1994). Ryhmittymisilmiön korjaamiseen optisissa mittauksissa on esitetty laji- ja metsikkökoh-

taisia vakiokertoimia optisesti mitatun lehtialaindeksin muuntamiseen todelliseksi lehtialaindeksiksi (Stenberg 1996b) sekä algoritmeja, jotka perustuvat säteilymittauksien lisäksi myös metsikön rakenne-tietoihin (Nilson 1999).

Metsän latvuspeitto määritetään usein silmäväraisesti arvaamalla, mutta tarkempia tuloksia haluttaessa on otettava käyttöön vanha konsti: Cajanuksen putki (Sarvas 1953). Cajanuksen putkella voidaan täsmällisesti mitata onko jonkin pisteen päällä latvustoa, ja laatia siten "kartta" latvuston sijainnista koealalla esim. mittaamalla latvuston prosenttiosuus systemaattisesti sijoitetuilla arviointilinjoilla. Toisinaan hitaahko putkimittaus voidaan korvata esim. latvuksista pystysuunnassa otetuilla valokuvilla, joilta latvusten ja taivaan peittävä osuus voidaan määrittää kuvankäsittelyohjelmistojen avulla (Korhonen ym. 2006). Näin ei päästä aivan yhtä hyvään tarkkuuteen, mutta toisaalta kuvien sisältämää informaatiota voidaan mahdollisesti hyödyntää myös muihin tarkoituksiin. Tulevaisuudessa arvioita latvuspeitosta, latvuksen muodosta ja säteilyn etene- mistodennäköisyyksistä kasvustossa voidaan mahdollisesti tuottaa myös lasermittausmenetelmillä.

Metsän elementtien optisia ominaisuuksia kuvataan ns. kaksisuuntaisella heijastusfunktiolla (bidirectional reflectance distribution function, BRDF) eli valaistus- ja mittauskulmien funktiona. BRDF voidaan määrittää joko kenttä- tai laboratorio-olosuhteissa goniospektrometrillä eli heijastunutta säteilyä mitaavalla laitteella, joka samalla kirjaa tarkalleen sekä katselu- että valaistussuunnan. Katsoen kohdetta eri suunnista (eli eri atsimuutti- ja zenittikulmista) mitataan kohteen BRF (bidirectional reflectance factor) eri aallonpituuksilla. Käytännössä BRF:n mittaaminen tarkasti ei ole mahdollista vaan siihenkin sisältyy yksinkertaistavia oletuksia (Schaeppman-Strub ym. 2006). Goniospektrometreillä mitatut aineistot muodostavatkin keskeisimmän referenssiaineiston heijastusmallien kehitystyössä.

Esimerkki goniospektrometrillä on Geodeettisella laitoksella kehitetty FIGIFIGO (Finnish Geodetic Institute Field Goniospectrometer) (Suomalainen 2006) (kuva 1). FIGIFIGO on helppokäyttöinen ja kannettava laite (20 kg), jonka operoimiseen tarvitaan yleensä kaksi ihmistä. Laitteen kokoamisaika on 10 minuuttia ja yhden kohteen sirontaominaisuuksien mittaamiseen kuluu 10–30 minuuttia riip-



Kuva 1. FIGIFIGO-mittalaite Sodankylässä mittaamassa jäkälän suuntaisheijastusta (BRDF:ää).

puen tarkkuudesta. FIGIFIGO:lla voidaan tehdä mittauksia aallonpituusalueella 400–2300 nm niin ulkona auringonvalossa kuin sisällä 1000 W laboratoriolampun avulla. FIGIFIGO:a on käytetty hyvin monipuolisesti boreaalisen luonnon BRF:n mittaamiseen; tietokannassa on jo laaja valikoima erilaisia kenttä- ja pohjakerroksen aluskasvillisuuslajeja, lunta eri faaseissaan sekä paljaita maaperänäytteitä. FIGIFIGO:n lisäksi toinen kansainvälisesti tunnettu goniospektrometri on Euroopan komission Joint Research Centressä (Ispra, Italia) kehitetty EGO (Koechler ym. 1994).

Ajankohtaisia kysymyksiä

Fysikaaliset heijastusmallit ovat nousseet viimeisen viidentoista vuoden aikana kansainvälisesti runsaasti tutkituksi alaksi. Pääpaino metsän heijastusmallien käytössä on ollut herkkyysanalyysissä ja numeerisissa kokeissa, joissa on mm. selvitetty

erilaisten metsän rakenteellisten tekijöiden vaikutusta metsän heijastussuhteeseen. Heijastusmallien inversiota on myös käytetty suuralueiden kasvillisuuden lehtialaindeksin kartoituksessa, mutta muihin käyttötarkoituksiin heijastusmallien inversio ei kuitenkaan vielä ole yleistynyt. Perustutkimuksen lisäksi heijastusmallien tärkeä (ja usein unohdettu) sovelluskohde on uusien satelliitti-instrumenttien suunnittelutyö. Niin ilmakehän kuin kasvillisuudenkin heijastusmallien avulla tuotetaan teoreettisia laskelmia, joihin päätökset uusien satelliitti-instrumenttien mittauskanavista ja -kulmista (ja usein spatiaalisesta resoluutiostakin) usein perustuvat. Koska hyperspektriset ja monikulmaiset satelliittikuvat ovat yleistymässä, vaaditaan näiden aineistojen käsittelyyn entistä pitemmälle kehitettyjä tulkintamenetelmiä kuten fysikaalisia heijastusmalleja.

Heijastusmallit ovat myös ajankohtaisia uusien kaukokartoittajien koulutuksessa. Suomessa Metsätieteiden tutkijakoulun koordinoimilla erikoiskursseilla (2004, 2007) sekä Helsingin yliopiston

metsien inventoinnin opetuksessa (2008 alkaen) opiskelijat ovat voineet harjoitustöissään perehtyä heijastusmallien avulla metsän heijastussuhteeseen vaikuttaviin tekijöihin. Tämä on ollut yleinen kansainvälinen trendi yliopistoissa, joissa tähdätään kaukokartoituksen teoreettisen osaamisen tason kohottamiseen. Kaukokartoittajia on kansainvälisillä asiantuntija- ja tutkijamarkkinoilla jo runsaasti tarjolla joka lähtöön, minkä vuoksi vankka teoreettinen pohja on hyvä tapa erottautua muista.

Vaikka heijastusmalleja on jo otettu käyttöön monien ongelmien ratkaisemisessa, haasteita niiden kehitystyössä riittää jatkossakin. Mistä saadaan ennakkotiedot monimutkaisimpien mallien kehitystyöhön? Miten kuvata kolmiulotteinen ja ryhmittynyt latvus rakenne innovatiivisesti ja yksinkertaisesti mutta samalla tarkasti? Entä miten voisi tehostaa heijastusmallien inversiota?

Suomalainen tutkimusyhteistyö metsän fysikaalisten heijastusmallien kehittämisessä ja testaamisessa alkoi 2000-luvun alussa ja siihen on tähän mennessä osallistunut Helsingin yliopiston, Geodeettisen laitoksen, Ilmatieteen laitoksen, Metsäntutkimuslaitoksen, Joensuun yliopiston ja VTT:n tutkijoita ja opiskelijoita. Tärkeimpiä kansainvälisiä yhteistyökumppaneita ovat olleet Tarton observatorio ja Bostonin yliopisto. Yhteistyötä on tehty niin maasto- ja laboratoriomittausten kuin heijastusmallien teorian ja soveltamisen tiimoilta. On sovellettu uutta käsitettä – fotonin uudelleen törmäyksen todennäköisyyttä – metsän heijastusominaisuuksien mallittamiseen (Rautiainen ja Stenberg 2005a, Smolander ja Stenberg 2005, Rautiainen ym. 2007, Manninen ja Stenberg 2008, Stenberg ym. 2008) ja tutkittu käsitteen taustalla olevaa teoriaa (Huang ym. 2007, Stenberg 2007, Möttus 2007, Möttus ym. 2007, Möttus ja Stenberg 2008). On invertoitu heijastusmallia havumetsän lehtialan arvioimiseksi keskiresoluution satelliittikuvilta (Rautiainen ym. 2003, Rautiainen 2005). Lisäksi on kehitetty metsän latvuspeiton ja latvusmuodon mittausta- ja mallitusmenetelmiä (Rautiainen ja Stenberg 2005b, Ervasti 2006, Korhonen ym. 2006, Korhonen ym. 2007), jotka tukevat niin monipuolista metsien inventointia kuin myös heijastusmallien kehitystyötä. BRDF-mittauksia varten on rakennettu uusi maastokelpoinen goniometri (Suomalainen 2006) ja kerätty laaja tietokanta boreaalisten metsien aluskasvillisuuden heijastusominaisuuksista

(Peltoniemi ym. 2005, Kaasalainen ja Rautiainen 2005, Peltoniemi ym. 2008) sekä testattu uutta menetelmää yksittäisten neulasten takaisinsironnan mittaamiseksi laboratoriossa (Kaasalainen ja Rautiainen 2007). Parhaillaan työn alla on kerättyjen aineistojen ja uuden heijastusmallin soveltaminen mm. koko Suomen lehtialan kartoittamiseen. Tutkimusryhmiemme välinen yhteistyö jatkuu yhä, muodollisissa ja epämuodollisissa merkeissä, ja pitkäaikaisena tavoitteenamme on luoda tietokanta, johon integroidaan boreaalisen metsän rakennetta ja optisia ominaisuuksia koskevat mittaukset ja mallit.

Fysikaalisten heijastusmallien piirissä tehtävä yhteistyö on hyvin kansainvälistä. Tärkein kansainvälinen projekti mallien kehitystyössä on Euroopan komission vuodesta 1999 alkaen rahoittama kaikille avoin RAMI (RADIATION transfer Model Intercomparison) -projekti (Pinty ym. 2001, Pinty ym. 2004, Widlowski ym. 2007), jota koordinoidaan komission alaisesta Joint Research Centeristä Isprasta, Italiasta. Projektissa on tällä hetkellä asiantuntijaraadin lisäksi mukana 18 eri heijastusmallia eli heijastusmallin kehittänyttä tutkimusryhmää, jotka testaavat, korjaavat ja vertaavat keskenään kasvillisuuden heijastusmalleja.

Fysikaalisten heijastusmallien avulla tehdyn tutkimustyön aikana on metsien heijastuskäyttäytymisestä joskus paljastunut odottamattomia piirteitä ja oletettua monimutkaisempia syy-seuraus-yhteyksiä, joilla on huomattava merkitys käytännön sovelluksissa. On siis selvää, että ehdoton edellytys satelliittikuvien tulkintamenetelmien kehittämiselle sekä niiden luotettavalle soveltamiselle luonnonvarojen kartoituksessa on ymmärtämys taustalla olevasta ilmiöstä ja mitattujen spektrisignaalien syntyyn vaikuttavista fysikaalisista tekijöistä. Kaukokartoitus ei olekaan niin yksinkertaista (eikä yksipuolista) kuin ensimmäisten luonnonvarojen kartoitukseen 1970-luvulla laukaistujen satelliittien aikakautena vielä saatettiin uskoa. Fysikaaliset heijastusmallit ja niiden rinnalla tehdyt maasto- ja laboratoriomittaukset ovat tärkeä askel eteenpäin – satelliittitekniikan tai laitekehityksen merkitys voi olla vähäinen, mikäli kaukokartoitusta ei tunneta luonnontieteellisenä ilmiönä.

Se on vähän niin kuin havaitsisi ja mittaisi puiden kasvua, mutta ei olisi koskaan kuullut fotosynteesistä.

Kiitokset

Tutkimustamme ovat rahoittaneet vuodesta 2000 alkaen Suomen Akatemia, Helsingin yliopiston rahastot, Suomen Luonnonvarain Tutkimussäätiö, Tekes, Metsätieteiden tutkijakoulu ja EU Interreg.

Kirjallisuus

- Chandrasekhar, S. 1950. Radiative transfer. Oxford University Press, London, UK.
- Chen, J.M. 1996. Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands. *Agricultural and Forest Meteorology* 80: 135–163.
- & Cihlar, J. 1995. Plant canopy gap-size analysis theory for improving optical measurements of leaf-area index. *Applied Optics* 34: 6211–6222.
- & Leblanc S.G. 1997. A four-scale bidirectional reflectance model based on canopy architecture. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing* 35: 1316–1337.
- & Leblanc S.G. 2001. Multiple-scattering scheme useful for geometric optical modeling. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing* 39: 1061–1071.
- Ervasti, S. 2006. Latvusmalli kuuselle ja männylle: latvusmuodon ja -tilavuuden ennustaminen puustotunnuksista. *Metsänhoitotieteen pro gradu*, Helsingin yliopisto. 60 s.
- Huang, D., Knyazikhin, Y., Dickinson, R., Rautiainen, M., Stenberg, P., Disney, M., Lewis, P., Cescatti, A., Tian, Y., Verhoef, W., Martonchik, J. & Myneni, R. 2007. Canopy spectral invariants for remote sensing and model applications. *Remote Sensing of Environment* 106: 106–122.
- Kaasalainen, S. & Rautiainen, M. 2005. Hot spot reflectance signatures of common boreal lichens. *Journal of Geophysical Research* 110: D20, D20302.
- & Rautiainen, M. 2007. Backscattering measurements from single Scots pine needles. *Applied Optics* 46(22): 4916–4922.
- Kaufman, M.R. & Troendle, C.A. 1981. The relationship of leaf area and foliage biomass to sapwood conducting area in four subalpine forest tree species. *Forest Science* 27: 477–482.
- Knyazikhin Y, Martonchik J.V., Myneni R.B., Diner D.J. & Running S.W. 1998. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. *Journal of Geophysical Research* 103(D24): 32257–32276.
- Koehler, C., Hosgood, B., Andreoli, G., Schmuck, G., Verdebout, J. Pegoraro, A., Hill, J., Mehl, W., Roberts, D. & Smith, M. 1994. The European Optical Goniometric Facility – Technical Description and First Experiments on Spectral Unmixing. *Proceedings of IGARSS'94 (Pasadena, 8–12 August 1994)*: 2275–2377.
- Korhonen, L., Korhonen, K.T., Rautiainen, M. & Stenberg, P. 2006. Estimation of forest canopy cover: a comparison of field measurement techniques. *Silva Fennica* (40)4: 577–588.
- , Korhonen, K.T., Stenberg, P., Maltamo, M. & Rautiainen, M. 2007. Local models for canopy cover with beta regression. *Silva Fennica* 41(4): 671–685.
- Kuusk, A. 1995. A Markov chain model of canopy reflectance. *Agricultural and Forest Meteorology* 76: 221–236.
- & Nilson, T. 2000. A directional multispectral forest reflectance model. *Remote Sensing of Environment* 72: 244–252.
- Li, X. & Strahler, A.H. 1985. Geometric-optical modeling of a conifer forest canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 23: 705–721.
- Manninen, T. & Stenberg, P. 2008. Simulation of the effect of snow covered forest floor on the total forest albedo. *Julkaistavaksi lähetetty käsikirjoitus*.
- Marklund, L.G. 1988. Biomassfunktioner för tall, gran och björk i Sverige. *Sveriges lantbruksuniversitets rapporter* 45: 1–73.
- Monsi, M. & Saeki, T. 1953. Über den Lichtfactor in den Pflanzengesellschaften und seine bedeutung für die Stoff-production. *Japanese Journal of Botany* 14(1):22–52.
- Möttus, M. 2007. Photon recollision probability in discrete crown canopies. *Remote Sensing of Environment* 110(2): 176–185.
- & Stenberg, P. 2008. A simple parameterization of canopy reflectance using photon recollision probability. *Remote Sensing of Environment* 112: 1545–1551.
- , Stenberg, P. & Rautiainen, M. 2007. Photon recollision probability in heterogeneous forest canopies: compatibility with a hybrid GO model. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres* 112, D03104. doi: 10.1029/2006JD007445

- Ni, W., Li, X., Woodcock, C., Caetano, M. & Strahler, A. 1999. An analytical hybrid GORT model for bidirectional reflectance over discontinuous plant canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 37: 987–999.
- Nilson, T. 1999. Inversion of gap frequency data in forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology* 98–99: 437–448.
- & Peterson, U. 1991. A forest canopy reflectance model and a test case. *Remote Sensing of Environment* 37: 131–142.
- Peddle, D.R., Johnson, R.L., Cihlar, J. & Latifovic, R. 2004. Large area forest classification and biophysical parameter estimation using the 5-scale canopy reflectance model in multiple-forward-mode. *Remote Sensing of Environment* 89: 252–263.
- Peltoniemi, J., Kaasalainen, S., Näränen, J., Rautiainen, M., Stenberg, P., Smolander, H., Smolander, S. & Voipio, P. 2005. BRDF measurement of understory vegetation in pine forests: dwarf shrubs, lichen and moss. *Remote Sensing of Environment* 94: 343–354.
- , Suomalainen, J., Puttonen, E., Näränen, J. & Rautiainen, M. 2008. [Verkkojulkaisu]. Reflectance properties of selected arctic-boreal land cover types: field measurements and their application in remote sensing. *COSIS Biogeosciences Discussions*. Saatavissa: <http://www.biogeosciences-discuss.net/5/1069/2008/bgd-5-1069-2008.pdf>. [Viitattu: 28.03.2008].
- Pinty, B., Gobron, N., Widlowski, J-L., Gerstl, S., Verstraete, M., Antunes, M., Bacour, C., Gascon, F., Gastellu, J-P., Goel, N., Jacquemoud, S., North, N., Qin, W. & Thompson, R. 2001. Radiation Transfer Model Intercomparison (RAMI) Exercise. *Journal of Geophysical Research* 106: 11937–11956.
- , Widlowski, J-L., Taberner, M., Gobron, N., Verstraete, M., Disney, M., Gascon, F., Gastellu, J-P., Jiang, L., Kuusk, A., Lewis, P., Li, X., Ni-Meister, W., Nilson, T., North, P., Qin, W., Su, L., Tang, S., Thompson, R., Verhoef, W., Wang, H., Wang, J., Yan, G. & Zang, H. 2004. RAdiation transfer Model Intercomparison (RAMI) exercise: Results from the second phase. *Journal of Geophysical Research* 109: D06210: doi: 10.1029/2003JD004252.
- Rautiainen, M. 2005. Retrieval of leaf area index for a coniferous forest by inverting a forest reflectance model. *Remote Sensing of Environment* 99: 295–303.
- & Stenberg, P. 2005a. Application of photon recollision probability in simulating coniferous canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment* 96: 98–107.
- & Stenberg, P. 2005b. Simplified tree crown model using standard forest mensuration data for Scots pine. *Agricultural and Forest Meteorology* 128: 123–129.
- , Stenberg, P., Nilson, T., Kuusk, A. & Smolander, H. 2003. Application of a forest reflectance model in estimating leaf area index of Scots pine stands using Landsat 7 ETM reflectance data. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29: 314–323.
- , Suomalainen, J., Möttöus, M., Stenberg, P., Voipio, P., Peltoniemi, J. & Manninen, T. 2007. Coupling forest canopy and understory reflectance in the Arctic latitudes of Finland. *Remote Sensing of Environment* 110: 332–343.
- Ross, J. 1981. The radiation regime and architecture of plant stands. Kluwer Academic Publishers, Hague, Alankomaat. 391 s.
- Ross, J.K. & Nilson, T.A. 1968. A mathematical model of radiation regime of the plant cover. *Actinometry and Atmospheric Optics*: 263–281. [Venäjänkielinen julkaisu].
- Sarvas, R. 1953. Measurement of the crown closure of the stand. *Seloste: Puuston latvussyhteyden mittaaminen. Communicationes Instituti Forestales Fenniae* 41(6): 1–13.
- Schaepman-Strub G., Schaepman, M.E., Painter, T.H., Dangel, S. & Martonchik, J.V. 2006. Reflectance quantities in optical remote sensing – definitions and case studies. *Remote Sensing of Environment* 103: 27–42.
- Smolander, S. & Stenberg, P. 2005. Simple parameterizations for the radiation budget of uniform broadleaved and coniferous canopies. *Remote Sensing of Environment* 94: 355–363.
- Stenberg, P. 1996. Correcting LAI-2000 estimates for the clumping of needles in shoots of conifers. *Agricultural and Forest Meteorology* 79: 1–8.
- 2007. Simple analytical formula for calculating average photon recollision probability in vegetation canopies. *Remote Sensing of Environment* 109(2): 221–224.
- , Linder, S., Smolander, H. & Flower-Ellis, J. 1994. Performance of the LAI-2000 plant canopy analyzer in estimating leaf area index of some Scots pine stands. *Tree Physiology* 14: 981–995.
- , Rautiainen, M., Manninen, T., Voipio, P. & Möttöus, M. 2008. Boreal forest leaf area index from optical satellite images: model simulations and empirical

- analyses using data from central Finland. Boreal Environment Research. Hyväksytty julkaistavaksi.
- Suits, G. 1972. The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy. *Remote Sensing of Environment* 2: 117–125.
- Suomalainen, S. 2006. Multiangular Spectrometry and Optical Properties of Debris Covered Surfaces. *Fysiikan pro gradu*, Helsingin yliopisto. 63 s.
- Verhoef, W. 1984. Light Scattering by Leaf Layers with Application to Canopy Reflectance Modeling: The SAIL Model. *Remote Sensing of Environment* 16: 125–141.
- Welles, J.M. 1990. Some indirect methods of estimating canopy structure. *Remote Sensing Reviews* 5:31–43.
- & Cohen, S. 1996. Canopy structure measurement by gap fraction analysis using commercial instrumentation. *Journal of Experimental Botany* 47: 1335–1342.
- Widlowski, J.-L., Taberner, M., Pinty, B., Bruniquel-Pinel, V., Disney, M., Fernandes, R., Gastellu-Etchegorry, J.-P., Gobron, N., Kuusk, A., Lavergne, T., Leblanc, S., Lewis, P., Martin, E., Möttus, M., North, P.J.R., Qin, W., Robustelli, M., Rochdi, N., Ruiloba, R., Soler, C., Thompson, R., Verhoef, W., Verstraete, M.M. & Xie, D. 2007. The third RAdiation transfer Model Intercomparison (RAMI) exercise: Documenting progress in canopy reflectance modelling. *Journal of Geophysical Research* 112, D09111. doi: 10.1029/2006JD007821.

■ MMT, dosentti Miina Rautiainen, Tarton observatorio, ilmakehäfysiikan osasto / Helsingin yliopisto, metsävarojen käytön laitos; prof. Pauline Stenberg, Helsingin yliopisto, metsävarojen käytön laitos; FT Janne Heiskanen, Ruotsin maatalousyliopisto (SLU), metsävarojen käytön laitos; PhD Matti Möttus, Tarton observatorio, ilmakehäfysiikan osasto / Helsingin yliopisto, metsävarojen käytön laitos; MMM Lauri Korhonen, Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta; FT, dosentti Jouni Peltoniemi, FM Juha Suomalainen, FT, dosentti Sanna Kaasalainen, Geodeettinen laitos, kaukokartoituksen ja fotogrammetrian osasto; TkT Terhikki Manninen, Ilmatieteen laitos. Sähköposti miina.rautiainen@helsinki.fi