

## TIIVISTELMÄRAPORTTI (SUMMARY REPORT)

# AKTIIVINEN HYPERSPEKTRAALINEN ETÄKUVANTAMISTEKNOLOGIA: PITKÄN KANTAMAN SOVELLUS HAHMONTUNNISTUKSEEN

**Sanna Kaasalainen, Olli Nevalainen, Teemu Hakala, Eetu Puttonen, Mika Karjalainen**  
Paikkatietokeskus FGI  
[sanna.kaasalainen@nls.fi](mailto:sanna.kaasalainen@nls.fi)

### Tiivistelmä

Tutkimus toteutettiin Geodeettisen laitoksen (GL) ja Mittatekniikan keskuksen (MIKES) yhteishankkeena, jossa yhdistettiin hyperspektrilidarin tutkimusryhmien osaamista maanpuolustuksellisesti tärkeällä osaamisalueella. Tutkimuksessa mitattiin erilaisia naamiomateriaaleja, kuten naamiomaaleja ja -verkkoja ja vertailtiin näiden tunnistettavuutta. Lisäksi kehitettiin automaattista hahmontunnista käyttämällä ohjaamattomia ja ohjattuja hahmontunnistusmenetelmiä, joka mahdollisti kohteiden automaattisen erottelun. GL:n hyperspektrilidarin kenttämittauskelpoisuutta ja mittausetäisyyttä parannettiin modulaarisella rakenteella ja uusilla optisilla ratkaisulla. Yhteistyö MIKES:in kanssa edisti merkittävästi näitä tavoitteita, erityisesti laitteen optiikan kehittämisen osalta. Tässä raportissa esitetään ensimmäisiä 3-ulotteisia hyperspektraalisia pistepilviä 50 metrin mittausetäisyydeltä sekä automaattisen kohteentunnistusalgoritmin tuloksia.

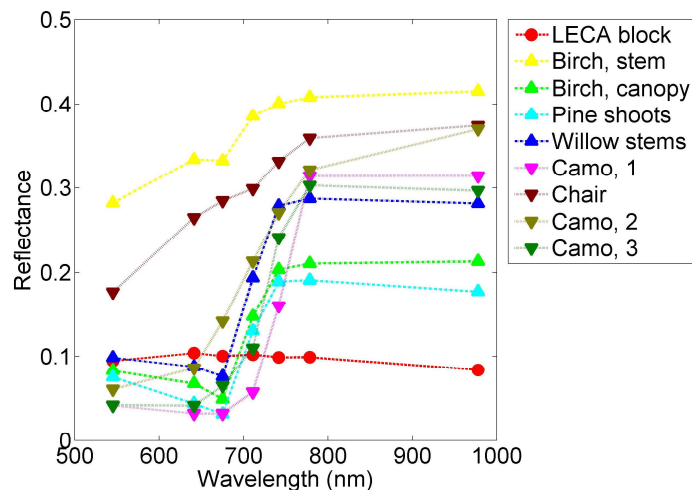
## 1. Johdanto

Hyperspektraalisessa laserkeilauksessa yhdistyy kaksi eri etämittausteknologiaa: kuvaava spektroskopia ja 3-ulotteinen laserkeilaus. Geodeettinen laitos (GL) on kehittänyt hyperspektrilidar-laitteistoaan vuodesta 2010 lähtien keskittyen lähialueen (alle 20 metriä) keilaaviin mittauksiin ja erityisesti hyperspektrilidarin tuottaman datan automaattiseen tulointaan ja käsittelyyn. Mittatekniikan keskus on keskittynyt pitkän kantaman hyperspektraalisen etäkuvantamislaitteiston kehittämiseen kattaen infrapuna (IR) spektrikaistan 2300 nm asti. Sekä GL:n että MIKES:in menetelmät perustuvat superjatkumolaser-teknologiaan (ks. esim. Manninen et al., 2014 [dx.doi.org/10.1364/OE.22.007172](https://doi.org/10.1364/OE.22.007172)).

GL:n hyperspektrilidar (HSL) tuottaa yhdistettyä 3D pistepilvi- ja spektritietoa 8 kanavalla, mikä mahdollistaa tehokkaan kohteentunnistuksen ja materiaalin analyysin, esimerkiksi lehtien ja neulasten typpi- tai klorofyllipitoisuuden seurannan kasvillisuudessa (ks. Nevalainen et al., 2014 [dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.08.018](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.08.018), Hakala et al., 2014 [www.biogeosciences-discuss.net/11/15019/2014/bgd-11-15019-2014.html](http://www.biogeosciences-discuss.net/11/15019/2014/bgd-11-15019-2014.html)). Multi- ja/tai hyperspektraalinen laserkeilaus on uusi teknologia, ja tällaisia laitteita on maailmalla vasta muutama, esim. kasvillisuuslidar Salford Canopy Analyzer (SALCA) (Gaulton et al., 2013 <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.01.001>), the Dual-Wavelength Echidna Lidar (DWEL) (Douglas et al., 2012 <http://dx.doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6352489>) ja säädettyään laseriin perustuva Multispectral canopy lidar (MSCL) (Woodhouse et al., 2011 <http://dx.doi.org/10.1109/LGRS.2011.2113312>). Materiaalitunnistukseen lähi-infrapuna-alueella on myös kehitetty konsepteja sotilas- ja teollisuussovelluksien näkökulmasta (esim. Powers & Davis, 2012 [http://dx.doi.org/10.1364/AO.51.001468](https://doi.org/10.1364/AO.51.001468)). Nämä kaikki kuitenkin mittaavat 2-4 aallonpituudella, joten GL:ssa kehitetty 8-kanavainen ratkaisu on toistaiseksi harvinainen.

Tämän tutkimushankkeen tarkoituksena on jatkokehittää GL:n hyperspektrilidaria sekä vuoden 2013 Matine-hankkeessa (MAT839) aloitettua kohteentunnistusmenetelmää. Vuonna 2013 kehitystavoitteena oli selvittää hyperspektrilidar-teknologian suorituskykyä

sotilaallisissa tehtävissä. 2013 tulosten perusteella esimerkkimateriaalit ovat erotettavissa luonnontaustasta HSL:lla mitatun spektrin perusteella (ks. kuva 1), erityisesti lähi-infrapun aallonpituuksilla (yli 780 nm). Kohteiden tunnistamista edisti erityisesti se, että laserkeilaindatan kolmiulotteisuus auttaa rajaamaan kohteiden kolmiulotteisen muodon. Nämä tulokset muodostivat lähtökohdan tässä raportissa esitettävälle vuoden 2014 hankkeelle.



Kuva 1. LECA-harkon, kasvillisuuden ja naamioverkkojen erottaminen helpottuu spektritiedon avulla. Kuva esittää vuoden 2013 tuloksia, joista on lähetetty myös artikkeli SPIE:n Optical Engineering-lehteen (Puttonen et al., 2014).

## 2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Vuoden 2014 projektissa oli tarkoituksena laajentaa HSL:n sovellettavuutta edelleen hahmontunnistuksen suuntaan. Hanke toteutettiin yhteisprojektina MIKES:in Aika, Taa-juus ja Spektroskopia - ryhmän kanssa paremman mittausetäisyyden ja laajemman IR-spektrialueen saavuttamiseksi esim. mittausaineistoja vertailemalla ja yhdistämällä. Uuden yhteistyöprojektin keskeisimmät osatavoitteet olivat:

1. Parantaa GL:n hyperspektrilidarin mittausetäisyyttä yhdistämällä MIKES:in osaamista pitkän kantaman laitteista, esim. mittaamalla samoja kohteita joko yhteisellä mittauskampanjalla tai yhdistämällä tulokset
2. Kehittää laitteiston tuottamalle mittausdatalle automaattisia ja tehokkaita prosessointialgoritmeja
3. Tutkia ja kehittää automaattisia hahmontunnistusmenetelmiä hyperspektrilidaridatalle, tavoitteena naamiomateriaalien ja naamioitujen kohteiden tunnistaminen luonnonkohteista

Tutkimussuunnitelmassa työ oli jaettu kolmeen työpakettiin:

Työpaketti 1: kohteentunnistus laboratoriossa ja ulkona

- Luonnonkohteiden ja naamiomateriaalien laserkeilaukset hyperspektrilidarilla GL:n laboratoriossa
- Datat käsittely ja analyysi, spektrikanavien optimointi

- Laitteen valmistelu ulkokäyttöön optiikkaa säätämällä ja uudelleenkalibroimalla

#### Työpaketti 2: kenttämittaukset

- Kenttämittaukset (ja yhteistyö MIKESIN kanssa).
  - Koejärjestelyt vertailumittauksina aiempien menetelmien kanssa (esim. pelkkää spektriä tai muotoa vastaan) tai esim. aikasarjoina
  - Tulosten vertailu MIKES:in laitteistojen kanssa
- Kantaman pidentämisen koetyöt
- Datan käsittely kehitetyillä hahmontunnistusmenetelmillä aloitetaan

#### Työpaketti 3: tulosten analyysi

- Kenttädatan käsittely ja analyysi GL:ssa, hahmontunnistusmenetelmän jatkokehitys ja tulokset
- Yhteenveto laitteen käytettävyydestä hahmontunnistukseen ja pitkän kantaman tuloksista
- Tutkimusseminaari, tiivistelmä- ja loppuraportointi sekä julkaisun kirjoittaminen

Hankkeen toteuttamiseksi suunniteltiin yhteisiä mittauskampanjoita MIKES:in ryhmän kanssa sekä sisä- että ulkotiloissa. Tavoitteeksi otettiin pidentää kantamaa aikaisemmasta 20 metristä 50 metriin. Lisäksi tehtiin yhteistyötä Puolustusvoimien Tutkimuslaitoksen (PVTUTKL) kanssa, joilta saimme lainaksi kohdemateriaalia ja optiikkaa. Toteutus jakautui laitekehitykseen, pidemmän kantaman mittauksiin ja algoritmikehitykseen. Kohteentunnistusalgoritmien kehitykseen oli käytettävissä 2013 projektista saatua mittausdataa, josta oli tarkoitus erotella naamiomateriaaleja luonnonkohteista automaattisesti.

### 3. Aineisto ja menetelmät

#### 3.1 Hahmontunnistus

Tavoitteena kohteentunnistuksessa oli mahdollisimman automaattinen ja nopea hahmontunnistusalgoritmi, joka hyödyntää sekä hyperspektrilidarin mittaamaa spektritietoa että mittauspisteiden 3D-jakaumaa (kohteiden geometriaa). Lisäksi algoritmin haluttiin toimivan mittausdatalle, joka on mitattu eri etäisyyksiltä tai eri spektrikanavilla. Näin ollen algoritmi olisi suoraan sovellettavissa pidemmän kantaman mittausdataan tai vaihtuneisiin sensoriasetuksiin.

2013 vuoden mittausdatan perusteella pystyttiin toteamaan, että pistepilven sisäinen hajonta on suurta ja pistekohtainen luokittelu on hankalaa, jolloin mittausdatan alueellista keskiarvoistusta tarvitaan (Puttonen et al., 2014). Tästä johtuen hahmontunnistusalgoritmissa pistepilvi jaetaan ensin erikokoisiin laatikoihin (suorakulmisiin särmiöihin) OctTree-algoritmin avulla. Pistepilven laatikoimisella pystytään kompressoimaan pistepilven tietomäärää, jolloin luokittelu yksinkertaistuu ja nopeutuu.

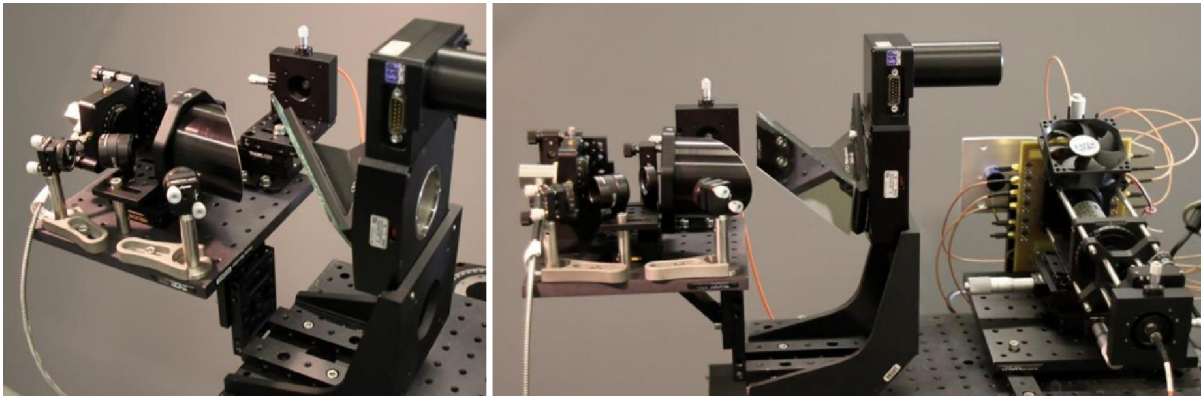
OctTree -algoritmi muodostaa alussa yhden ison laatikon, joka sisältää kaikki pistepilven pisteet. Jos laatikko ei täyty määrättyjä reunaehtoja, laatikko jaetaan kahdeksaan yhtä suureen laatikkoon. Muodostettujen laatikoiden jakamista jatketaan aina siihen asti kunnes joku reunaehdoista täyttyy. Algoritmiamme reunaehtona oli laatikon maksimikoko (1 m) ja minimikoko (0,1 m). Lisäksi yhtenä reunaehtona oli, että laatikon pisteiden spektrien täytyy korreloida keskenään riittävän voimakkaasti. Tällä pyrittiin siihen, että huomattava enemmistö laatikon sisältämistä pisteistä olisi spektritiedon perusteella samasta kohteesta. Laatikoiden muodostamisen jälkeen poistettiin tyhjät ja vähän pisteitä sisältävät laatikot (<50).

---

Laatikoiden ohjaamattomassa luokittelussa testattiin K-means- ja Gaussian Mixture Model –klusterointialgoritmeja. Laatikoiden luokitteluattributteina testattiin useita erilaisia laatikon pisteiden 3D-jakaumaan ja spektritietoon perustuvia attribuutteja. Laatikon pisteiden 3D-jakaumaan perustuvia attribuutteja olivat mm. pisteiden tasomaisuus ja suuntaisuus. Testattuja spektritietoon perustuvia attribuutteja oli mm. pisteiden spektrien keskiarvo, mediaani, kvantiilit ja varianssi sekä kasvillisuusindeksit.

### 3.2 Hyperspektrilidar ja mittausetäisyys

Hyperspektrilidarin jatkokehitys aloitettiin muuttamalla laitteen rakenne modulaariseksi (Kuva 2) siten, että skannausosa ja detektoriosa olivat erillisiä. 2-tuumainen off-axis parabolipeili korvattiin 3-tuumaisella peillillä, joka kohdistettiin kuituun, jota pitkin valo ohjautuu spektrografiin. Aiemmin peili oli kohdistettu suoraan spektrografiin. Samalla voitiin poistaa yksi peili, jonka kautta valo heijastui kahdesti (lähtiessä ja palatessa). Uusi optinen järjestely mahdollistaa paremman modulaarisuuden ja yksinkertaisemman mekaniikan. Modulaarisuudella parannettiin laitteen kenttäkäyttöä sekä muunneltavuutta kantaman pidentämisen testaamista varten, mahdollistaen mm. MIKES:n optiikan yhdistämisen GL:n detektoriin.



Kuva 2. HSL:n modulaarinen rakenne: vasemmalla skannausosa, jossa näkyvät parabolipeili ja pyörittimet. Oikeassa kuvassa skannausosan vieressä näkyy detektorimoduuli: takaisinheijastunut laservalo tulee kuitua pitkin spektrografiin, jonka takana ovat mittauskortit ja digitointielektroniikka.



Kuva 3. Yhteismittauksia MIKES:in mittausradalla ja GL:ssä. Kuvissa näkyy myös PVTUTKL:n teleskooppi, jolla kokeiltiin kantaman pidentystä.

Mittausetäisyyden (kantaman) parantamiseksi tehtiin mittauksia sekä MIKES:in 45 m mittausradalla, että maastossa GL:n alueella Masalassa (kuva 3). Kantaman pidentämiseksi testattiin erilaisia optisia järjestelyitä: aluksi testattiin erilaisia optiikoita, mm. MIKESin käytössä olevaa teleskooppia ja lähetysoptiikkaa. Lisäksi kokeiltiin kohinan pois-

---



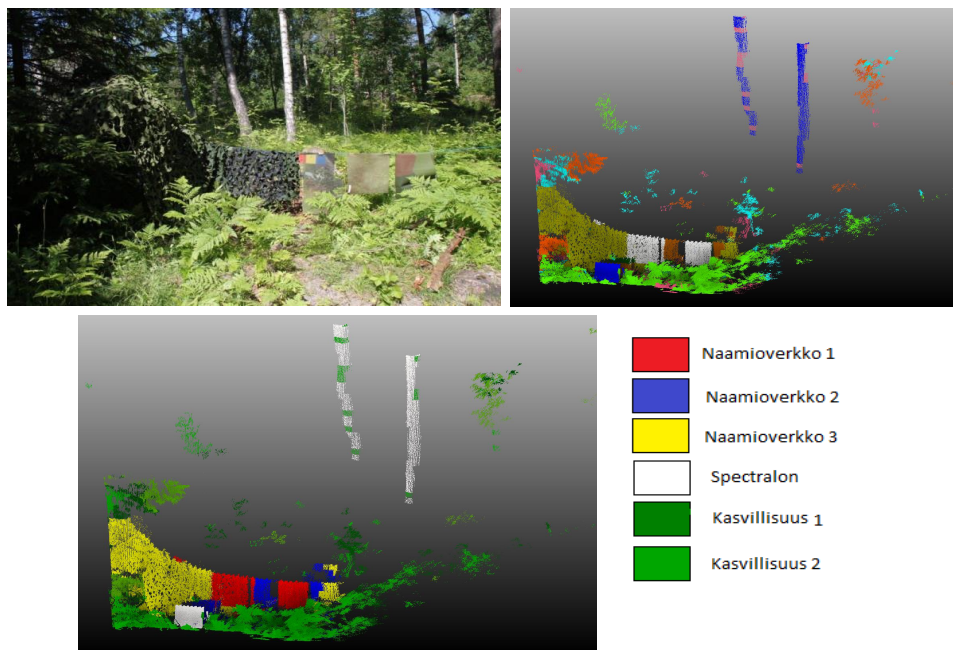
toa keskiarvoistamalla pistepilvidataa. Spektrografin korvattiin diffraktiohilalla ja hopea-parabolipeileistä koostuvalla omarakenteisella spektrografilla. Lisäksi diffraktiohila-konfiguraation optimoimiseksi hankittiin uusi optinen kuitu, jonka ytimen halkaisija on suurempi (400  $\mu\text{m}$ ) ja avauskulma kapeampi (0.39  $\rightarrow$  0.22 NA). Tällä pyrittiin mahdollistamaan tehokkaampi optinen kytkentä keräysoptiikan ja kuidun, sekä kuidun ja hilan välille.

Mittausmateriaaleina käytettiin luonnonkohteita ja samoja naamiomateriaaleja, joita käytettiin myös 2013, jolloin PVTT:ltä (nykyinen PVTUTKL) saatiin viisi erilaista näytettä Puolustusvoimien naamiointimateriaaleista.

#### 4. Tulokset ja pohdinta

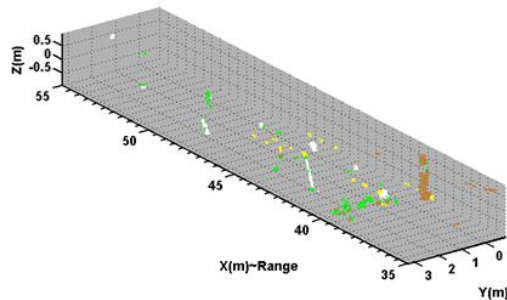
Kohteentunnistuksesta saavutetuista tuloksista on esimerkki kuvassa 4, josta nähdään, että hyperspektrilidarin pistepilvistä pystytään havaitsemaan erilaiset kohteet ja luokittelemaan ne automaattisesti. Pistepilvien spektrien sisäinen hajonta on suurta, joten kohteentunnistusta helpottivat pistepilven alueellinen keskiarvoistus ja pistedatan tiivistäminen jakamalla pistepilvi laatikoihin. Laatikointi on kehitetyn kohteentunnistuksen hitain vaihe, mutta esimerkiksi 861 000 pisteen pistepilvi (kuva 4) pystyttiin tiivistämään 724 laatikkoon, jolloin luokiteltavia kohteita on huomattavasti vähemmän ja luokittelu on erittäin nopeaa. Laatikoitu pistepilvi voitiin luokitella ohjaamattomasti spektritiedon ja pisteiden 3D-jakauman perusteella (ks. kuva 4). Testatuista ohjaamattomista luokittelijoista parhaimman tuloksen tuotti Gaussian Mixture Model -klusterointialgoritmi. Hyviksi spektritietoon perustuviksi luokitteluattribuuteiksi osoittautui laatikon pistekohtaisesti normalisoitujen spektrien mediaani, sekä takaisinheijastuksen voimakkuus. 3D-jakaumaan perustuvista attribuuteista hyväksi osoittautui pisteiden tasomaisuus.

Nyt kehitetty kohteentunnistusalgoritmi on suoraan sovellettavissa pidemmän kantaman mittauksiin, esimerkkinä kuvassa 5 oleva automaattisesti luokiteltu aineisto 50m etäisyydeltä mitatusta pistepilvestä.



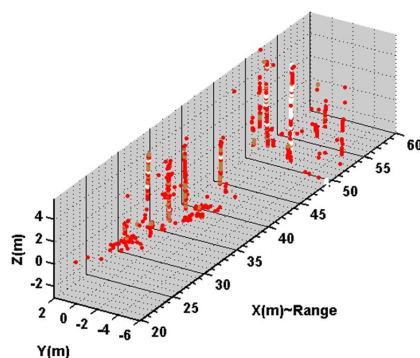
Kuva 4. Yllä: esimerkki pistepilven ohjaamattomasta luokittelusta (vasemmalla valokuva kohteista ja oikealla

luokiteltu pistepilvi), joka toimii kohteentunnistuksen perustana. Alla: luokkien yhdistäminen automaattisesti luokitellusta kuvasta on tässä tehty käsin.



Kuva 5. Testimittauksissa 50m etäisyydeltä mitatun keskiarvoistetun pistepilven kohteiden automaattinen luokittelu. Kohteina ovat puunrunkot, kasvillisuus, sekä erilaiset valkoiset referenssikohteet.

Pitkän kantaman tuloksista on esimerkki kuvassa 6. Kantaman pidentämisen kehitystyö osoittautui ennalta odotettua haastavammaksi, sillä MIKESin käytössä olevaa teleskooppia ja lähetysoptiikkaa hyödyntämällä ei saavutettu merkittävää parannusta mittausetäisyyteen. Useiden testimittauksien tuloksena kehitettiin konfiguraatio, jossa kaupallinen spektrografi korvattiin diffraktiohilalla ja hopea-parabolipeileistä koostuvalla omarakenteisella spektrografilla. Näin saavutettiin signaalin amplitudissa parannusta ja tuotettiin ensimmäiset pistepilvikuvat 50 metrin etäisyydeltä. Nykyisessä omarakenteisessa spektrografissa on spektraalisesti leveämmät kaistat, jolloin myös valonkeräyskyky on parempi spektraalisen resoluution kustannuksella, mutta resoluutio on edelleen riittävällä tasolla sotilassovelluksia ajatellen. Järjestelyn jatkotestauksessa on syytä kiinnittää huomiota mm. spektrografin säätämiseen aallonpituusalueen optimoimiseksi, sillä tässä esitetty demonstraatio ei ollut erityisesti suunniteltu mitään tiettyä sovellusta silmälläpitäen. Järjestely kuitenkin osoittaa, että optiikan parantaminen ja sen optimointi tuottaa tuloksia myös pidemmällä kantamalla. Tästä saatiin lisävahvistusta vaihtamalla vastaanotto-optiikan ja detektorin välille tehokkaampi optinen kuitu.



Kuva 6. Diffraktiohilan avulla mitatusta pistepilvestä 50m etäisyydellä eroteltuja puunrunkoja. Signaalia saatiin edelleen parannettua tehokkaamman valokuidun avulla, mikä mahdollistaa jatkokehityksen pidemmille kantamille.

Spektrografin lisäksi kokeiltiin uutta tehokkaampaa kuitua. Suurempihalkaisijainen ja kaapeamman avauskulman kuitu mahdollistaa tehokkaamman optisen kytkennän keräysoptiikan ja kuidun, sekä kuidun ja hilan välille. Lyhyellä kantamalla signaali parani n. 80-

---



100%. Myös pidemmän kantaman signaali parani, mutta tarkempi analyysi vaatii vielä lisämittauksia. Alustavissa tuloksissa lähtevän laserspotin ja vastaanottimen näkökentän koko 28 m etäisyydellä oli n. 30-35mm sekä 72 mm. Voitiin myös havaita, että nyt käytössä oleva offaxis parabolipeili tuottaa terävän näkökentän tuolle etäisyydelle, joten optinen konfiguraatio soveltuu hyvin myös pidemmän kantaman mittaukseen. Kuidun suurempi halkaisija myös suurentaa pinta-alaa kohteella, helpottaen kohdistusta.

## 5. Loppupäätelmät

Tutkimuksessa jatkokehitettiin GL:n hyperspektraalista laserkeilainta ja automaattista hahmontunnista ja kohteiden automaattista erottelua. HSL:n kenttämittauskelpoisuutta ja mittausetäisyyttä parannettiin modulaarisella rakenteella ja uusilla optisilla ratkaisuilla. Yhteistyö MIKES:in kanssa edisti merkittävästi näitä tavoitteita, erityisesti laitteen optiikan kehittämisen osalta. Näillä tuloksilla voitiin osoittaa hyperspektrilidarin käytettävyys automaattiseen hahmontunnistukseen ja pitkän kantaman mittaukseen. Molempien jatkokehitys vaatii vielä lisätyötä, mutta hankkeessa tehdyt kokeet ja analyysi osoittavat, että teknologian jatkokehittäminen sotilassovelluksiin mahdollistaa tehokkaan kohteentunnistuksen hyperspektraalisen 3-ulotteisen etämittauksen avulla.

Seuraavat suuremmat kehitysaskleet lidarin kehityksessä liittyvät detektorin, kuten digitoinnin tehostamiseen sekä lähtevän lasertehon kasvattamiseen. Nykyinen jäähdyttämätön detektori tuottaa huomattavasti kohinaa, mikä peittää alleen pieniä signaaleita. Käytämällä jäähdytettyä detektoria saataisiin signaalin kohinaa pienennettyä, jolloin voitaisiin käyttää alhaisempia jännitteitä mittaavaa digitointikorttia. Mahdollista on myös siirtyä nykyisestä lineaarisen vahvistuksen vyöryfotiodista (APD) yksittäisiä fotoneja havaitsevaan Silicon Photo Multiplier (SiPM) detektoriin. Kantaman edelleen pidentämiseksi (esim. satoihin metreihin) tulee myös selvittää, millaisilla ratkaisuilla kolmiulotteinen skannaus on vielä mahdollista. MIKES:issä kehitetty kuvantamisteknologia eroaa GL:n laitteista siten, ettei se tuota kohteen 3D-informaatiota, mutta toisaalta 2-ulotteinen pikselöity spektrikuvaus on mahdollinen myös pitkän kantaman sovelluksissa. GL:n nykyisen ratkaisun kaltainen laite, joka mittaa täyden aaltomuodon koko mittausetäisyydeltä suurella aikaresoluutiolla ei enää pidemmällä etäisyyksillä ole tarkoituksenmukaista, joten käytettävä edistyneempiä menetelmiä mittaustietojen analysoimiseen reaaliaikaisena. Nykyinen digitointilaitteisto sisältää FPGA piirin, jota paremmin hyödyntämällä tallennettavan mittaustietojen määrää voitaisiin pienentää. Lisäksi yksittäisen laserpulsstin takaisinheijastuksen mittaaminen on haasteellista järkevästi saavutettavissa olevilla lasertehoilla, joten jokaista mittauspistettä joudutaan keskiarvoistamaan kohinan suodattamiseksi. Kantaman pidentäminen saattaa vaatia laserpulsstien pidentämistä nykyisestä 1 ns pituudesta, mikä heikentäisi kohteiden erottumista syvyysuunnassa. Lisäksi laser spotin pinta-alan suurentuminen heikentäisi kohteiden erottumista vaaka- ja pystysuunnassa. Heikentynyt spatiaalinen resoluutio vaikeuttaisi etenkin pienien kohteiden havaitsemista, sekä pisteiden 3D-jakaumaan perustuvien luokittelumenetelmien käyttöä kohteentunnistuksessa. Kenttäkelpoinen ja optimoidusti toimiva pitkän kantaman laite vaatisi täten perustavanlaatuisen teknisen kehitystyön, mutta selvitys sen edellytyksistä on helppo tehdä tämän tutkimuksen pohjalta.

Tutkimuksen jatkosuositukseksi on kehitettävä edelleen hahmontunnistusta luokitteluparametrien ja -piirteiden automaattista valintaa varten, sekä luokiteltujen kohteiden identifioimista tunnettuihin kohteisiin. Nyt saadut tulokset mahdollistavat tämän kehityksen. Lisäksi nyt kehitetyt kohteentunnistusalgoritmit ovat suoraan sovellettavissa pitkän kantaman mittaukseen.

## 6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Vuoden 2013 hankkeen tuloksista on vertaisarvioitavana seuraava julkaisu:

Puttonen, E., Hakala, T., Nevalainen, O., Kaasalainen, S., Karjalainen, M., Krooks, A., and Anttila, K., 2014. Artificial target detection with a hyperspectral lidar over a 24 hour measurement. *Optical Engineering*, lähetetty käsikirjoitus.

Tässä julkaisussa kuvattiin erilaisten kohteiden erottamista spektrien avulla sekä niiden muutoksia 24 tunnin mittauksen aikana. Lisäksi vuonna 2014 on julkaistu (viimeinen näistä on vielä vertaisarvioinnissa) seuraavat julkaisut HSL:n kasvillisuussovelluksista, jotka myös liittyvät MATINE-hankkeen aiheeseen:

Nevalainen, O., Hakala, T., Suomalainen, J., Mäkipää, R., Peltoniemi, M., Krooks, A., and Kaasalainen, S., 2014. Fast and nondestructive method for leaf level chlorophyll estimation using hyperspectral LiDAR. *Agricultural and Forest Meteorology*, 198-199, 250-258. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.08.018>

Hakala, T., Nevalainen, O., Kaasalainen, S., and Mäkipää, R., 2014. Technical Note: Hyperspectral Lidar Time Series of Pine Canopy Physiological Parameters. *Biogeosciences Discuss.*, 11, 15019-15035 <http://dx.doi.org/10.5194/bgd-11-15019-2014>

---