

## TIIVISTELMÄRAPORTTI (SUMMARY REPORT)

# PITKÄN KANTAMAN AKTIIVINEN HYPERSPEKTRAALINEN LASER-KEILAUS

**Sanna Kaasalainen, Paikkatietokeskus/MML, Geodeetinrinne 2, 02430 Masala**  
**Olli Nevalainen, Paikkatietokeskus/MML**  
**Teemu Hakala, Paikkatietokeskus/MML**

Tiivistelmä: Tutkimuksen tavoitteena on tutkia ja laatia suosituksia hyperspektraalisen laserkeilaimen kantaman edelleen pidentämiseksi. Vuosina 2013-2014 päästiin n. 20-50 metrin etäisyyteen, ja kantaman edelleen pidentäminen vaatii suuria teknisiä ratkaisuja. Tutkimuksessa testattiin erilaisia vaihtoehtoja ja arvioitiin niiden vaikutusta hyperspektri-keilaimella saatavaan signaaliin ja sen käyttöön. Lisäksi hahmontunnistusta kehitettiin edelleen siten, että havaittujen kohteiden luokittelu tunnettuihin kohteisiin on automaattista ja tapahtuu spektrikirjastojen avulla. Hyperspektrilidarin signaalin parantamista on tutkittu mm. kokeilemalla erityyppisiä ilmaisimia sekä tutkimalla fokuoimisen vaikutusta signaaliin eri etäisyyksillä systemaattisella kalibroitimittauksella. Tuloksena esitetään suositukset kantaman pidentämiseksi n. 60 metristä 200 metriin.

## 1. Johdanto

Geodeettisessa laitoksessa (nykyinen Paikkatietokeskus) kehitetty hyperspektraalinen laserkeilain (HSL) perustuu superjatkumoteknologiaan. Lidarilla saadaan sekä spektri- että pistepilvidata yhdellä mittauksella samasta laitteesta. Mittaus tapahtuu lähettämällä suuritehoinen pulssi mitattavaan kohteeseen. Kohteesta sironnut valo erotellaan eri väreihin, joiden kirkkaus mitataan. Pulssin lentoajasta ja mitattujen värien kirkkaudesta muodostetaan hyperspektraalinen pistepilvi, jossa jokaista pistepilven pistettä vastaa spektri, joka ulottuu näkyvän valon alueelta lähi-infrapunaan. 8-kanavaisen lidarin prototyyppi saatiin valmiiksi operatiiviseen käyttöön syksyllä 2011. Tämän jälkeen on kehitetty erilaisia sovelluksia mm. kasvillisuus- lumi- ja mineraalimittauksiin<sup>1</sup>.

Hyperspektrilidarin soveltuvuutta sotilastarkoituksiin tutkittiin ensimmäisen kerran vuonna 2013 yhteistyössä PVTUTKL:in kanssa, jolloin tuloksena saatiin, että testatut esimerkkikohteet (esim. naamioverkot) olivat erotettavissa taustastaan spektrinsä perusteella, joten pystyttiin todentamaan luotettava kohdemateriaalien tunnistus<sup>2</sup>. Erottumisen oli selvintä infrapuna-aallonpituuksilla (>780 nm). Etuina tavalliseen hyperspektraalikuvantamiseen verrattuna olivat esim. parempi kyky havaita varjossa sijaitsevia kohteita sekä kohteiden 3-ulotteisen muodon rajaaminen pistepilven avulla. Tämän johdosta kätkeminen luonnolliseen taustaan vaikeutuu.

Kantaman (range) pidentämistä 20 metristä kokeiltiin ensimmäisen kerran vuonna 2014 yhteistyössä MIKES:in (nyk. VTT) kanssa, ja pidennystä saatiin n. 50 metriin optiikkaa ja elektroniikkaa kehittämällä. Lisäksi on kehitetty luokittelualgoritmeja kohteentunnistuk-

1 Nevalainen et al. 2014. Agric. Forest Meteor., 198-199, 250-258. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.08.018>.

Anttila et al. 2015. Cold Reg. Sci. Tech., 121, 52-59. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.10.005>

2 Puttonen et al. 2015. Optical Engineering, 54(1), 013105. <http://dx.doi.org/10.1117/1.OE.54.1.013105>

seen 3-ulotteisesta spektridatasta. Projektissa on myös kehitetty mittausaineiston automaattisia käsittelyalgoritmeja ja kohteentunnistusta, joiden avulla hyperspektraalisesta pistepilvestä pyritään automaattisesti löytämään ja luokittelemaan eri kohteita, kuten kasvillisuutta, naamiomateriaaleja ja epäorgaanisia kohteita. Nämä aikaisemmat tutkimukset olivat lähtökohtana tässä raportoitavalle vuoden 2015 tutkimushankkeelle.

## 2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Vuoden 2015 tutkimuksen keskeisimmät osatavoitteet olivat:

- Kehittää demonstraatio (proof-of-concept) pitkän kantaman keilausteknologiasta ja tuottaa ensimmäiset pitkän kantaman pistepilvet sekä konsepti spektriinformaation kalibroinnista
- Jatkokehittää datankäsittely- ja kohteentunnistusalgoritmeja pitkän kantaman sovelluksille
- Tuottaa ensimmäiset tulokset kohteiden erottamisesta pitkän kantaman pintamittauksessa (naamioverkko vs. luonnonkohteet) sekä suositukset ja tekninen suunnitelma laitteen jatkokehitykselle operatiiviseksi menetelmäksi.

Tarkoituksena oli testata erilaisia optisia konfiguraatioita ja pyrkiä löytämään optimaalinen laitteistokokoonpano jatkokehitystä varten. Lisäksi oli tavoitteena tuottaa pitkän kantaman konsepti hyperspektraalisesta laserkeilauksesta, jonka käyttöä sotilaalliseen maanpuolustukseen olisi tämän pohjalta mahdollista suunnitella ja kehittää.

Tutkimus jakautui kolmeen työpakettiin:

Työpaketti 1: testimittaukset Paikkatietokeskuksessa

1. Pyöritinmekanismin ja pitkän kantaman optiikan yhdistäminen ja testaus
2. Datan esikäsittely ja kalibrointi vuoden 2014 tulosten pohjalta
3. Alustavat testimittaukset sopivien demonstraatiokohteiden löytämiseksi

Työpaketti 2: kenttämittaukset PVTUTKL:n koealueella

1. Laitteen fokusointi ja kohteiden optimointi
2. Pistepilven mittaukset valituista demonstraatiokohteista
3. Datan käsittely ja analyysi

Työpaketti 3: suositukset jatkokehitykseen

1. Yhteenveto keilauskonseptista ja tuloksista
2. Suositukset jatkokehitykselle operatiivista laitetta varten
3. Tutkimusseminaari, tiivistelmä- ja loppuraportointi sekä julkaisun kirjoittaminen

Työpakettien toteutus poikkesi hieman suunnitellusta, sillä osoittautui, että Paikkatietokeskuksen takana oleva metsämaasto soveltui hyvin kaikkien kenttämittausten toteutuspaikaksi. Lisäksi kaikkea kantaman pidennykseen tarvittavaa laitteistoa ei saatu hankittua projektibudjetin puitteissa, joten osa jatkosuosituksista perustuu uusimmissa kenttämittauksissa saatuihin tuloksiin sekä yhteistyöhön ja keskusteluihin VTT:n (ent. MIKES) ja Tampereen Teknisen Yliopiston (TTY) optiikan asiantuntijoiden kanssa.

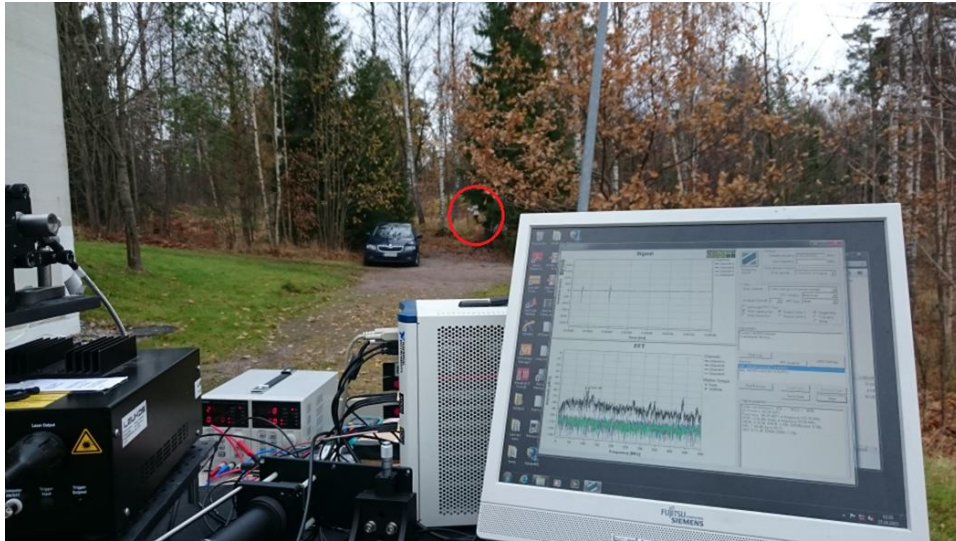
## 3. Aineisto ja menetelmät

### 3.1 Kantaman pidennyksen koetyöt

Tutkimuksessa kokeiltiin seuraavien teknisten parannusten vaikutusta pidemmältä kantamalta saatuun signaaliin:

- Optiikan fokusointi
- Uusi herkempi vyöryfotodiodi
- Valomonistinjatriisi (SiPM)

Koetöitä suoritettiin ensin laboratorio-olosuhteissa, jossa varmistettiin uusien komponenttien toimivuus. Tämän jälkeen siirryttiin Paikkatietokeskuksen takamaastoon, jossa mittauksia oli mahdollisuus suorittaa eri kantamilla (ks. kuva 1).



Kuva 1. Kenttämittauksia Paikkatietokeskuksen lähimaastossa. Lidar-laitteisto näkyy etualalla. Punainen ympyrä osoittaa n. 60 metrin etäisyydelle asetetun näytteen.

### 3.2 Kohteentunnistusalgoritmien jatkokehitys

Kohteentunnistusalgoritmin jatkokehityksessä toteutettiin seuraavat vaiheet:

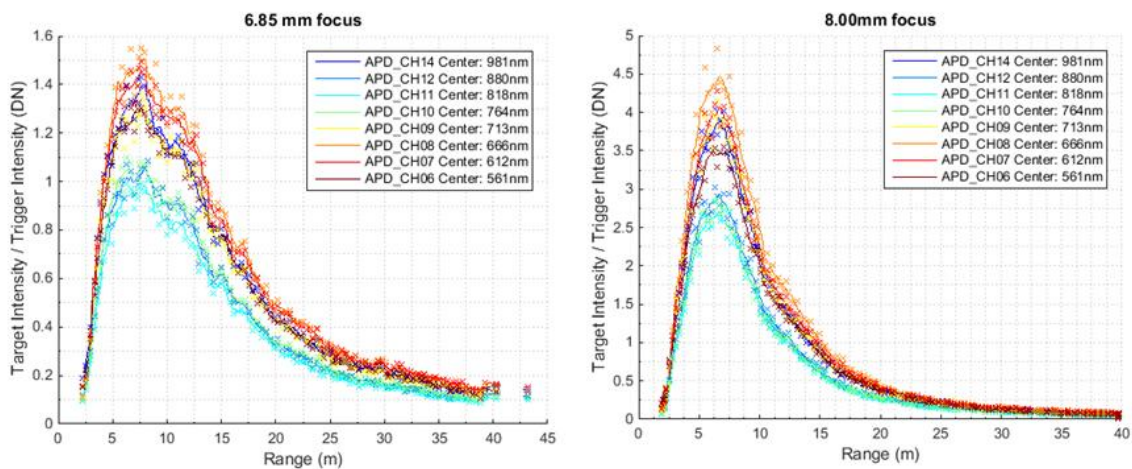
- Spektrikirjaston ('opetusdatan') luominen
- Eriolaisten piirteiden (spektritieto ja kohteenmuoto) testaaminen luokittelussa
- Eri luokittelualgoritmien testaaminen opetusdatan avulla (mm. nearest neighbours, luokittelupuu, neuroverkko)
- Pistekohtaisen luokittelun (piste kerrallaan) vertailu aluekohtaiseen luokitteluun

Kehitystyössä käytettiin vuonna 2013 mitattua hyperspektrilidar-dataa, jossa on hyvin edustettuina eri kohteita. Lisäksi vuosina 2013 ja 2014 tehtyjä mittaustietoja käytettiin opetusaineistona spektrikirjastojen luomiseksi.

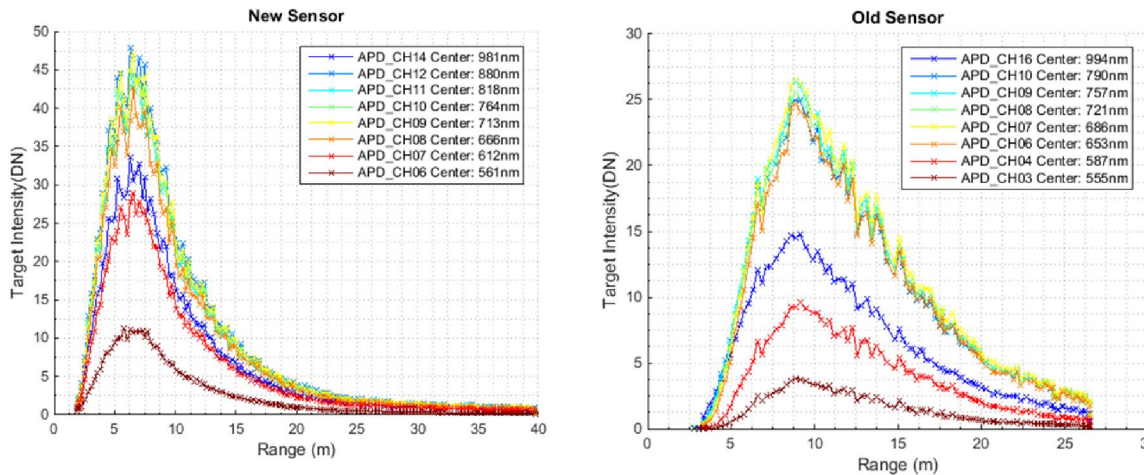
## 4. Tulokset ja pohdinta

### 4.1 Kantaman pidennys

Optiikan fokuointi vaikutti signaalin voimakkuuteen fokuointietäisyydellä. Esimerkki signaalin paranemisesta paremmalla fokuksella on kuvassa 2.



Kuva 2. Signaali ero Spectralon®-levystä tulleille paluupulssille eri fokuksilla. 8 metrin saadaan n. 3-kertainen signaali verrattuna 6.85 m fokuointiin. Paluupulssin intensiteetti on normalisoitu lähtevän pulssin intensiteetillä.

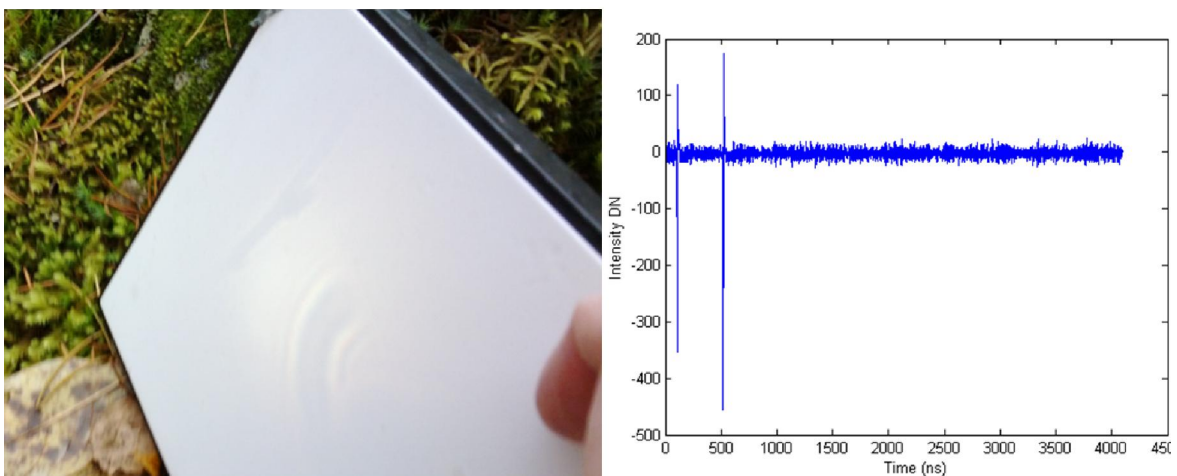


Kuva 3. Uuden herkemmän vyöryfotodiodin ja vanhan sensorin etäisyyskalibrointi: signaaliero Spectralonista tulleille paluupulsseille samanlaisilla fokuksilla.

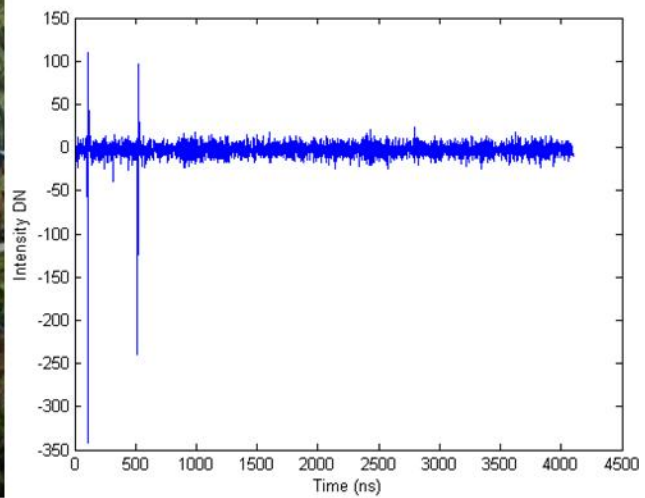
Korvaamalla nykyinen vyöryfotodiodi herkemmällä vyöryfotodiodilla (First sensor MOD501568) maksimisignaali parantui fokusointietäisyydellä jopa 75%. Esimerkki tulok-  
sista on kuvassa 3.

Nämä parannukset eivät kuitenkaan tuottaneet haluttuja tuloksia pidemmällä (> 50 m) kantamalla, joten lisäksi testattiin valomonistinmatriisia. Valomonistinputkea testattiin pistemäisellä mittauksella, eri etäisyyksiltä ja erilaisen spektrin omaavista kohteista. Näin saatiin tietoa signaalin voimakkuudesta eri mittauskantamilla. Koemittauksen yksinker-  
taistamiseksi korvattiin myös spektrografi suodattimella (Thorlabs FB600), jonka kaistan-  
leveys (FWHM) oli 40 nm. Näin saatiin tutkittua detektorin herkkyyttä heikommalla sig-  
naalilla, kuin laserpulssin integroitu kirkkaus.

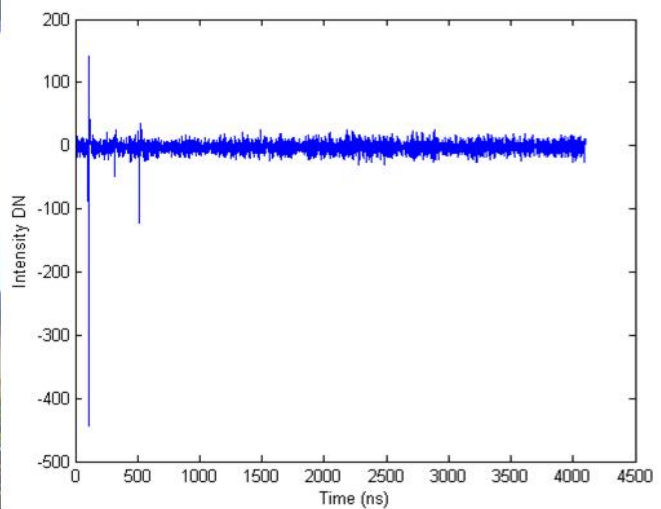
Valomonistin antaa paremman signaalin kuin tähänastiset kokeilut. Kuvissa 4-6 esitetään tuloksia erilaisille demonstraatiokohteille n. 62 metrin mittausetäisyydellä. Valonmonisti-  
meen perustuvan detektorin integroimien laitteistoon vaatii useammasta valonmonis-  
tinelementistä koostuvan elementtimatriisin hankkimista ja sen käyttämistä yhdessä  
spektrografiin kanssa.



Kuva 4. Spectralon-levyn antama signaali n. 62 m etäisyydellä. (Huom. että detektori toimii negatiivisella kiihdytysjännitteellä, jolloin signaalit ovat negatiivisia.) Ensimmäinen pulssi on ns. trigger-pulssi, ja seuraava (n. 500 ns kohdalla) tulee kohteesta.



Kuva 5. Vihreän lehden antama signaali n. 62 m etäisyydellä (vrt. kuva 4).



Kuva 6. Sammalnäytteen antama signaali n. 62 m etäisyydellä (vrt. kuva 4).

Tämän lisäksi kokeiltiin muitakin komponentteja, kuten signaalivahvistinta, mutta havaittiin myös kohinan kasvavan, jolloin signaalikohinasuhde ei parantunut. Kyseinen vahvistin oli lainassa toisesta laitteesta, joka on tarkoitettu toimimaan 20 GHz asti, eikä täten täysin soveltunut tähän tarkoitukseen. Testi vaikutti kuitenkin lupaavalta, joten signaalin esivahvistuselektronikkaan keskittymällä voidaan parantaa signaalia ja silti säilyttää hyvä signaali-kohinasuhde. On myös mahdollista käyttää perinteisempiä fotokatodiin perustuvia valonmonistimia, mutta niissä on omat ongelmansa, kuten vaurioherkkyys liian kirkkaalle valolle.

#### 4.2 Kohteentunnistus

Vuoden 2013-2014 mittausaineistoja hyödyntäen projektissa on myös kehitetty mittausaineiston automaattisia käsittelyalgoritmeja. Luomalla spektikirjasto ja opettetuja piste-pilven luokittelijoita. Spektikirjaston avulla opetetun luokittelijan käyttö mahdollistaa reaaliaikaisen luokittelun. Opetetun luokittelijan etuna on myös se, että luokittelun epävarmuudesta pystytään saamaan arvio, eli arvio siitä, kuinka todennäköisesti luokiteltu kohde kuuluu kyseiseen luokkaan. Tämän avulla pystytään myös tunnistamaan mahdolli-

set ennestään tuntemattomat kohteet, joilla luokittelun epävarmuus on suuri.

Spektrikirjastossa päädyttiin hyödyntämään vain pisteiden spektritietoa. Kohteiden muotoon perustuvien piirteet eivät toimineet kohteiden luokittelussa niin hyvin kuin oletettiin. Tämä johtuu pääasiassa HSL:n etäisyysresoluution epätarkkuudesta (n.5-10 cm), jolloin kohteiden muodon tulkinta etäisyysmittauksen suunnassa heikkenee. Etäisyysmittauksen tarkkuutta pysyttäisiin parantamaan vähentämällä sensorin kohinaa ja soimista ("ringing") tai kehittämällä signaalin jälkikäsitteilyä.

Spektrikirjastossa ja luokittelussa käytettiin seitsemällä kanavalla mitattuja kohteen spektrejä. Vuonna 2013-2014 laitteeseen oli kahdeksanneksi kanavaksi asennettu erillinen sensori mittaamaan 1300 nm aallonpituusalueella. Tämän kanavan mittaukset olivat kuitenkin niin kohinaisia, joten niitä ei kannattanut käyttää spektrikirjastossa ja luokittelussa. Opetusdatan avulla ja piirteiden valintamenetelmillä pystyttiin arvioimaan, että kaikkien seitsemän kanavan tiedon käyttäminen luokittelussa tuottaa parhaan luokittelutuloksen.

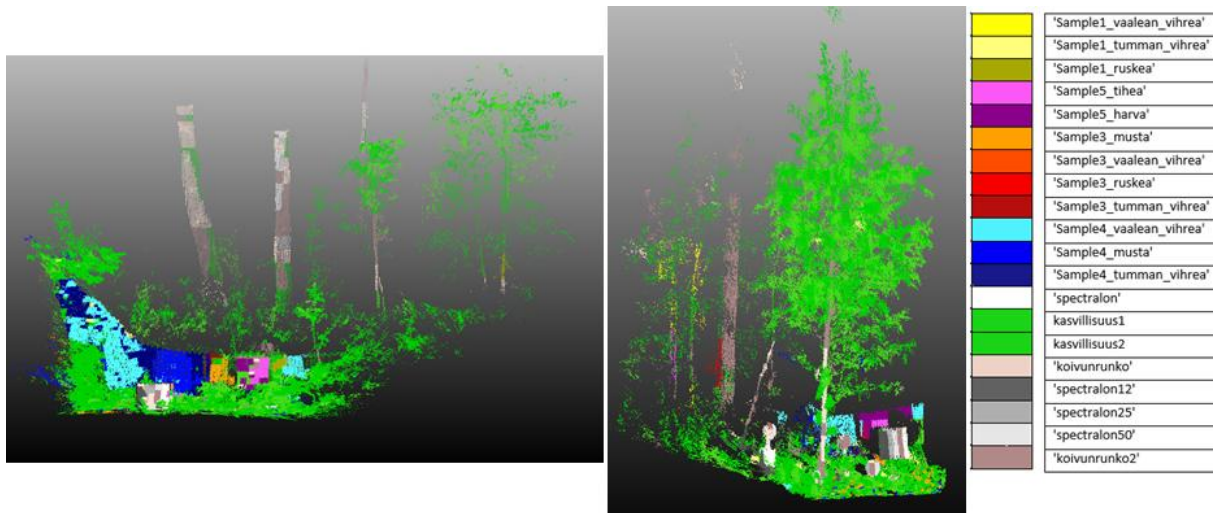
Luokittelussa testattiin diskriminanttianalyysi, k-lähimmän naapuri-, luokittelupuu- ja neuroverkkoluokittelua. Niiden tuottamat luokittelutarkkuudet opetusdatalle (80% spektrikirjastosta) ja opetusdatasta erotetulle testidatalle (20% spektrikirjastosta) on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Spektrikirjaston avulla opetettujen luokittelijoiden luokittelutarkkuus.

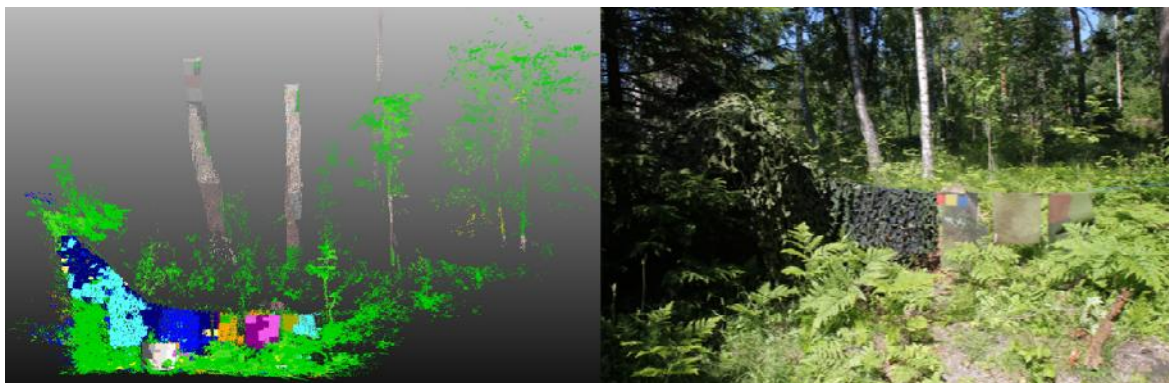
Luokittelija	Väärin luokittelu(%)	Oikein luokittelu(%)
diskriminanttianalyysi	11,49	88,51
k-lähin naapuri	7,62	92,38
luokittelupuu	9,60	90,40
neuroverkkoluokittelu	8,95	91,05

Opetettuja luokittelualgoritmeja testattiin erikseen kuvissa 7 ja 8 nähtävillä pistepilville, joiden mittauksia ei ole hyödynnetty luokittelijoiden opettamisessa. Kuvat osoittavat, että eri kohteiden luokittelu automaattisesti on tehokasta ja nopeaa. Kuvista voidaan nähdä, että eniten luokitteluvirhettä tapahtuu kohteilla joiden spektri on tasainen eli heijastus kaikilla aallonpituuksilla on lähes samanlaista (esim. valkoiset ja harmaat kohteet). Tämä voidaan nähdä esimerkiksi Spectralonin ja koivun rungkon sekoittumisena keskenään. Lisäksi väärin luokittelua tapahtuu mm. eri naamiomateriaalien välillä, jos niiden spektrit ovat hyvin samanlaisia.

Tutkimuksessa verrattiin sekä piste- että aluekohtaista luokittelua. Pistekohtainen luokittelu on nopeampaa, mutta siinä on vähemmän informaatiota kohteesta: pisteen pystyy luokittelemaan heti kun se on mitattu. Tällöin luokittelu perustuu pelkkään spektritietoon, koska yhdestä pisteestä ei saa kohteen geometriainformaatiota. Aluekohtaisessa luokittelussa täytyy ensin keilata koko alue tai kohde, jolle luokittelu halutaan tehdä. Lisäksi aluekohtaisessa luokittelussa voidaan hyödyntää kohteen geometriatietoja (muotoon perustuvia piirteitä). Aluekohtaisella menetelmällä voidaan myös keskiarvoistaa spektritietoa ja vähentää kohinaa. Lisäksi keskiarvoistamalla jokin alue, pystytään myös kompensoimaan esim. tulokulman tai muun vaihtelun vaikutusta luokitteluun.



Kuva 7. Kohteiden automaattinen luokittelu tunnettuihin spektrikirjaston kohteisiin: esimerkki luokittelupuun käytöstä.



Kuva 8. Kohteiden automaattinen luokittelu tunnettuihin spektrikirjaston kohteisiin: esimerkki K nearest neighbors (KNN) –menetelmästä. 940 000 pisteen luokittelu kesti tällä algoritmilla 30.8s (1 CPU: 3.4 Ghz). Valokuvasta puuttuu neliväri-Spectralon-paneeli, joka näkyy pistepilven etuosassa.

Tutkimushankkeen tulokset osoittavat, että erilaisilla optisilla ratkaisuilla voidaan kehittää toimiva pidemmän kantaman hyperspektraalinen laserkeilain. Näiden ratkaisujen valinta riippuu myös laitteen käyttökohteesta. Lisäksi automaattinen kohteentunnistus on tehokasta hyperspektraalista pistepilveä käyttäen ja se voidaan yhdistää lidarin tuottamien pistepilvien käsittelyyn. Sekä mittauksen että siihen yhdistetyn kohteentunnistamisen kehitys reaaliaikaiseksi toimivaksi laitteeksi on mahdollista näiden tulosten pohjalta, ja edellyttää optimointia käyttötarkoituksen mukaan sekä siihen sopivien uusien komponenttien hyödyntämistä.

## 5. Loppupäätelmät

Hankkeessa tutkittiin eri vaihtoehtoja hyperspektrilidarin kantaman edelleen pidentämiseksi. Tuloksena saatiin hyvä signaali n. 62 metrin kantamalla olemassa olevalla valonlähteellä (100mW superjatkumolaser). Kantaman edelleen pidentäminen vaatii suurempia muutoksia kuin tässä hankkeessa oli mahdollista, mutta tutkimus tuotti tärkeää perustietoa, jonka avulla pidemmän kantaman laite on mahdollista rakentaa. Suositukset jatkokehitykselle on esitetty tässä luvussa. Lisäksi hankkeessa kehitettiin automaattinen kohteentunnistus ja luokittelu hyperspektraalisille pistepilville. Etukäteen luodon spektrikir-



jaston avulla reaaliaikainen tunnistus on mahdollista, ja tätä menetelmää voidaan hyödyntää laitteen jatkokehityksessä.

#### Suositukset jatkokehitykselle

Kantamaa voi pidentää edelleen seuraavasti:

- Tehostamalla optiikkaa. Nykyinen lähtevän valon kollimaatio on suunniteltu käytettäväksi lyhyillä etäisyyksillä ja valo hajaantuu nopeasti etäisyyden kasvaessa. Sama pätee myös palaavan valon havainnointioptiikkaan. Optiikalla on mahdollista parantaa myös silmäturvallisuutta.
- Suuritehoisemmalla laserilla: kymmenkertaistamalla laserteho saadaan kantamaa pidennettyä suhteessa  $1/R^2$  (jossa R on mittausetäisyys) n. 3-kertaiseksi. 62 metrin kantamalle tämä tarkoittaa lisäystä n. 200 metrin mittausetäisyyteen. Suuritehoisia superjatkumolasereita myy mm. Fianium, mutta niiden hinta on n. 50k€, joten tässä hankkeessa ei ollut mahdollista hankkia uutta laseria.
- Silmäturvallisuuden parantamiseksi on mahdollista suodattaa ei-haluttuja kanavia pois. On myös mahdollista tehdä ns. multispektraalinen lidar, joka koostuu useammasta yhden aallonpituuden laserista, mutta tällöin menetetään mahdollisuus muuttaa spektrikanavia, mikä on edellytyksenä laitteen optimointiin tehokasta kohteentunnistusta varten erityyppisissä sovelluksissa.
- Jäähdyttämällä sensoria ja lisäämällä vahvistusta. Sensorin jäähdyttäminen pienentää signaali-kohina-suhdetta (S/N), jolloin vahvistimesta saatava lisäteho parantaa signaalia.
- Jos laserin pulssitiheys on riittävä, yksi vaihtoehto on keskiarvoistaa pulsseja, jolloin kohinaa saadaan pienennettyä. Tästä menetelmästä on hyötyä, jos esim. keilausnopeus on hitaampi kuin laserin pulssitiheys.

Lisäksi laitteen edelleen kehittäminen kenttäkäyttöön vaatii jatkuvasti 360° pyörivät pyörittimet ja jatkuvan datan tallentamisen ja optiikan sulkemisen kiinteään koteloon, joka suojaaa sitä kenttätilanteessa liialta ja komponenttien liikkumiselta.

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

Etäisyyskalibroinnista ja hahmontunnistuksesta on tekeillä 2 julkaisua tieteellisiin lehtiin.