

## TIIVISTELMÄRAPORTTI (SUMMARY REPORT)

### Aktiivinen hyperspektraalinen etäkuvantamisteknologia: pitkän kantaman sovellus hahmontunnistukseen

Heikki Isotalo, Matleena Myntti, Teemu Kääriäinen, Albert Manninen

Mittatekniikan keskus (MIKES), Tekniikantie 1, 02150 Espoo, puh. 0295054400

**Tomi Parviainen**

Puolustusvoimien tutkimuslaitos (PVTUTKL), Paroistentie 20, 34110 Ylöjärvi

**Scott Buchter, Miika Helliö**

Lasersec Systems Oy, Hirsalantie 11, 02420 Jorvas

#### Tiivistelmä

Hankkeessa tutkittiin pitkän kantaman hyperspektimittauslaitteiston soveltuvuutta kolmiulot-teiseen kuvantamiseen infrapuna-alueella. Hankkeen tavoitteena oli yhteistyössä Geodeettisen laitoksen (GL) kanssa selvittää superjatkumovalonlähteeseen perustuvan laitteiston soveltuvuus kiinteiden kohteiden infrapuna (IR) alueen hyperspektraaliseen kuvantamiseen, tunnistamiseen ja häirintään eri sää-olosuhteissa pitkällä mittausetäisyyksillä. Rakennettua laitetta kehitettiin edelleen skannaavaksi, mikä mahdollisti 3D-mittaukset. Laitteen silmäturvallisuutta ja kenttäkelpoisuutta parannettiin sekä kehitettiin automaattiset ja reaaliaikaiset spektrintun-nistusalgoritmit kohteentunnistusta varten. Laitteistolla mitattiin erilaisia kohteita laboratorio- sekä kenttäolosuhteissa useassa mittauskampanjassa yhdessä GL:n kanssa

#### 1. Johdanto

LIDAR (Light Detection And Ranging) on tunnettu, laserpulssin kulku-aikaan pohjautuva etämittausten menetelmä. Perinteisessä LIDAR-mittauksessa käytetään yksiväristä (monokromaattista) laser-valonlähdettä, jolla saadaan vain etäisyystieto kohteesta. Tässä hankkeessa tutkitaan spektrisesti laajakaistaisen superjatkumolaserin käyttöä kiinteiden kohteiden sekä pistemäiseen hyperspektraaliseen mittaukseen että suuremman pinta-alan kuvaukseen. Heijastunut, laajakaistainen valo antaa paljon lisätietoa mitattavasta kohteesta.

Hankkeessa tutkittavan teknologian maanpuolustukselliset sovellukset ovat selkeät ja käsittävät kohteiden havaitsemisen, tunnistamisen ja häirinnän. Esimerkiksi tarkka-ampujen havaitseminen ja etäisyydenmääritys maastossa onnistuu laserin takaisinheijastuksen perusteella. Tässä korostuu erityisesti vaima-alueiden erottaminen kiikaritähäntäimien takaisinheijastuksista spektritiedon avulla. Lisäksi elektro-optisten laitteiden, kuten SWIR- ja InGaAs kamerat, tai tähytinlaitteiden häirintä onnistuu aallonpituusalueella 1000 - 2300 nm. Normaaleilla kapeakaistaisilla lasersuotimilla ei voi poistaa tällaisen häirinnän vaikutusta (vrt. dazzler-laserit). Yksi sovellus on kohteiden valaisu hyperspektrikameran yökäytön mahdollistamiseksi ja päiväkäytön tehostamiseksi. Kaasumaisten molekyylien, kuten räjähdainemolekyylien, kemiallisten ja bioaseiden, mittaus ilmasta.

Superjatkumovalolla tarkoitetaan spektriltään hyvin voimakkaasti levinnyttä valoa. Superjatkumo synnytetään tyypillisesti kytkemällä suuritehoinen laserpulssi valokuituun, jossa optisen kuidun epälineaariset vasteet, kuten Raman-sironta, taitekertoimen riippuvuus laserpulssin tehosta (Kerr-ilmiö) sekä solitonien synty, levittävät alun perin monokromaattisen laservalon yli 1000 nm leveäksi superjatkumoksi. Kvartsilasista valmiste-

tussa, voimakkaasti epälinearisessa valokuidussa, kuten ns. fotonikidekuidussa, superjatkumo kattaa yleensä kaikki aallonpituudet näkyvän valon sinisestä 400 nm aallonpituudesta aina 2500 nm aallonpituuteen infrapuna (IR) -alueella. Fotonikidekuidussa valoa johtavan ytimen halkaisija on ainoastaan noin 2 mikrometriä, minkä vuoksi valon intensiteetti kuidun sisällä saadaan suureksi, mikä puolestaan voimistaa kuidussa tapahtuvia epälineaarisia ilmiöitä ja leventää tehokkaasti laserpulssin spektrin laajaksi superjatkumoksi aina näkyvän valon alueelle.

Etämittausten kannalta pienikokoinen ydin on kuitenkin myös suuri haitta, koska pieneen ytimeen ei voida kytkeä voimakkaita laserpulseja ilman, että kuidun ydin vaurioituu pysyvästi. Kaupallisten superjatkumo valonlähteiden valoteho on riittämätön käytännöllisiin kenttämittauksiin yli 100 metrin etäisyyksillä. Tässä työssä rakennettua superjatkumo valonlähdettä on aiemmin (Matine 2013, MAT833 hanke) onnistuneesti sovellettu 1500 metrin etämittauksiin. Lisäksi laitteistosta on tarkoitus tehdä silmäturvallinen. Räätilöimällä valonlähdettä on mahdollista saavuttaa silmäturvallinen toiminta ilman, että se haittaa laitteiston spektristä tehotehyyttä ja samalla sen mittausetäisyyttä.

Kohteen tunnistus tavallisesti perustuu kohteesta mitatun spektrin vertailuun aiemmin mitattuihin kirjastospektreihin. Spektrejä vertaillaan moniulotteisen analyysin avulla, jossa spektreistä valitaan tunnusomaiset piirteet, kuten esimerkiksi spektristen kaistojen integroidut signaalit, joita verrataan kirjastospektrien vastaaviin arvoihin. Kukin valittu kaista tai piirre vastaa vertailussa yhtä ulottuvuutta. Tutkimuksessa käytetyllä laitteistolla on mahdollista jaotella spektri jopa 256 kaistaan, mikä on epäkäytännöllistä reaaliaikaisen tunnistuksen kannalta. Optimaalisen kaistajaon ja tunnistusalgoritmin valinta on edellytyksenä käytännölliselle ja reaaliaikaiselle etämittausteknologialle. Tässä työssä vertaillaan viittä spektrintunnistusalgoritmia sekä lukuisia kaistanjako- ja keskiarvoitusyhdistelmiä.

## 2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

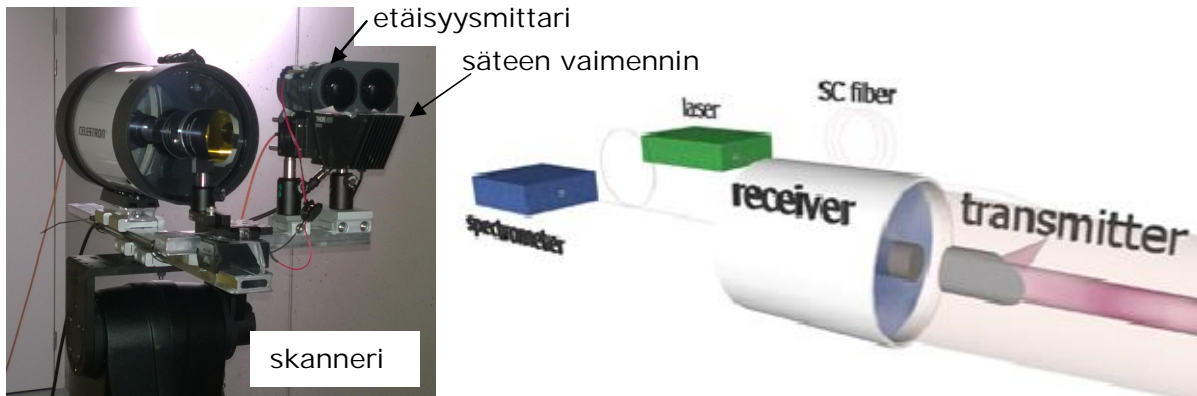
Tutkimuksen tavoitteena oli demonstroida silmäturvallisen, aktiivisen hyperspektrisen mittausten menetelmän toimivuus skannaavissa mittauksissa automaattisen spektrintunnistuksen kanssa. Silmäturvallisuuden saavuttamiseksi optimoitiin valonlähteen spektriä taseisemmaksi sekä rajoitettiin lyhyet aallonpituudet. Lisäksi hankittiin skanneri, joka mahdollisti mittausten tekemisen piste pisteeltä laajemmalla alueella. Automatoitu 2D skannaus sekä integroitu etäisyyden mittaaminen mahdollistavat 3D-pintojen kuvantamisen. Jokaiselle mittauspisteelle tehdyn spektrintunnistuksen avulla voidaan visualisoida sekä kohteen muoto, että kohteen materiaali.

Kehitettävää laitteistoa oli tarkoitus käyttää sekä sisätesteissä muun muassa hyperspektrikameran valaisuun, että kenttätesteissä eri kohteiden mittauksiin yhteistyössä Puolustusvoimien tutkimuslaitoksen (PVTUTKL) kanssa. Lisäksi työn tavoitteena oli vertailla laitteiston suorituskykyä Geodeettisen laitoksen rinnakkaisprojektissa kehitettävän laitteiston kanssa. Tämän tavoitteen saavuttamiseksi järjestettiin useita yhteismittauksia sekä laboratorioissa, että kenttäolosuhteissa. GL yhteistyön tavoitteena oli myös tietojen jakaminen, mikä edesauttoi molempia osapuolia tutkimustavoitteidensa saavuttamisessa.

## 3. Aineisto ja menetelmät

Hankkeessa kehitetty laitteisto ja toimintakaavio on esitetty kuvassa 1. Hankkeessa jo aiemmin onnistuneesti demonstroitua, kaupallisia lähteitä merkittävästi suuritehoisempaa ja silti edullisempaa, kuitulaseriin pohjautuvaa superjatkumovalonlähdettä on edelleen kehitetty silmäturvalliseksi. Silmäturvallisuus saavutettiin kollimoimalla lähtevä säde sekä

leikkaamalla lähtevästä valosta lyhyet aallonpituudet. Lyhyet aallonpituudet (1000 nm – 1450 nm) sisältävät voimakkaat piikit pumppuaallonpituudella 1064 nm sekä voimakkaat Raman piikit. Nämä aallonpituudet leikattiin dikroisella säteenjakajalla niin että pitkät aallonpituudet heijastetaan lähteinpeilille ja lyhyet aallonpituudet etenevät säteen vaimentimelle. Superjatkumokuidun pituuden optimointi tasoitti käytettävää spektrikaistaa mittauksen luotettavuuden parantamiseksi. Silmäturvallisuus ei juurikaan vaikuta laitteiston mittaamatkaan, koska spektrinen tehoiheys hyödynnettävällä 1450 nm ylittävällä kaisalla pysyi samana kuin edellisvuoden 1500 metrin mittauksissa.



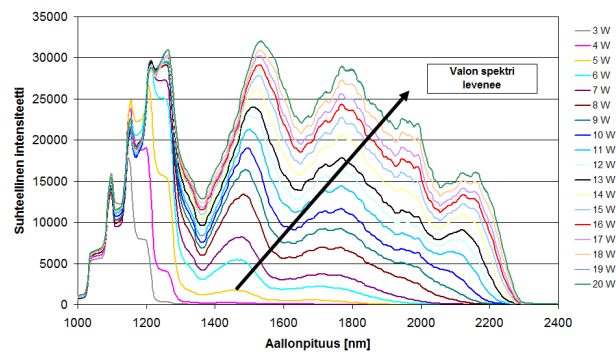
Kuva 1. Hyperspektaaliin mittauksiin käytetty laitteisto. Valokuvassa (vasen) näkyy etäisyysmittari, säteen vaimennin sekä skanneri. Periaatekuvassa (oikea) näkyy pumpplaser (laser), superjatkumokuitu (SC fiber), paraboloidipeiliin perustuva lähtinoptiikka (transmitter), heijastuneen valon keräävä teleskooppi (receiver) sekä infrapunaspektrometri (spectrometer).

Laitteistoa kehitettiin kenttäkelpoisemmaksi hankkimalla Uninterruptible Power Supply (UPS) teholähde, joka mahdollisti laitteiston käytön akkukäyttöisenä tai ulkopuolisen sähkögeneraattorin kanssa. Laitteisto on täysin automatisoitu, mukaan lukien synkronoitu skannaus, etäisyyden mittaus sekä spektrin mittaus laserin kanssa ja ilman (taustan vähennys). Automatisoinnin avulla laitteistolla on mahdollista tehdä skannaavat mittaukset laajan alueen kartoittamiseksi.

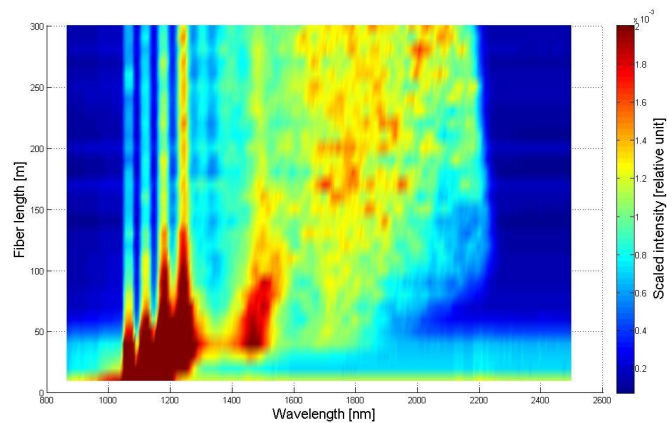
#### 4. Tulokset ja pohdinta

##### Superjatkumovalonlähde

Aiemmassa MATINE-projektissa (MAT833) toteutettu suuritehoinen superjatkumovalonlähde tuottaa laajan 1000-2300 nm spektrin infrapuna-alueelle, kuten näkyy kuvasta 2. Tässä hankkeessa superjatkumovalonlähde optimoitiin tasaisen infrapuna-alueen spektrikaistan saavuttamiseksi. Kuten käy ilmi kuvasta 3, käyttämällä pumpplaserilla kuidun vähimmäispituus on noin 200 metriä; lyhyemmällä kuidulla optinen teho painottuu lyhyemmille aallonpituuksille. Toisaalta kuidun sisäiset absorptiot rajoittavat ulostulotehoa yli 250 metrin kuidun pituuksilla. Silmäturvallisuuden ja lähteen käyttökelpoisuuden kannalta on edullista saada tasainen spektrinen tehoiheys yli 1450 nm aallonpituuksilla.



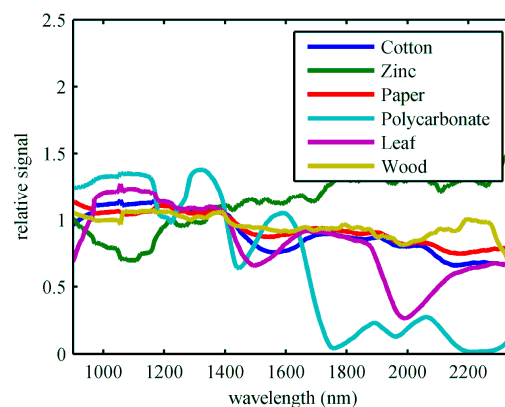
Kuva 2. Superjatkumovalonlähteen spektri laajenee pumpputehon kasvaessa.



Kuva 3. Spektrin kehitys superjatkumokuidun pituuden funktiona. Silmäturvallisuuden takia aallonpituudet alle 1450 nm leikattiin pois ennen lähetinoptiikkaa.

### 3D hyperspektrimittaukset

Kuvassa 4 näkyy eri kohteista MAT833 hankkeessa mitatut heijastusspektrit. Spektrit on normalisoitu laajakaistaisen valkoreferenssin spektrillä, jolloin mittaukset ovat riippumattomia lähtevän valon spektrin muodosta. Kuvasta näkyy, että voimakkaimmat spektrin tunnuspiirteet ovat pitkällä aallonpituuksilla. Näin ollen, silmäturvallisuuden takia rajoitettu aallonpituuskaista (> 1450 nm) on käyttökelpoinen spektrien tunnistamiseen.



Kuva 4. Heijastusspektrit eri materiaaleille. Puuvilla (cotton), sinkki (zinc), muovi (polycarbonate), koristevadelman lehti (leaf) ja lakattu koivuviilu (wood), normeerattu valkoreferenssin spektrillä, erottuvat selvästi toisistaan.

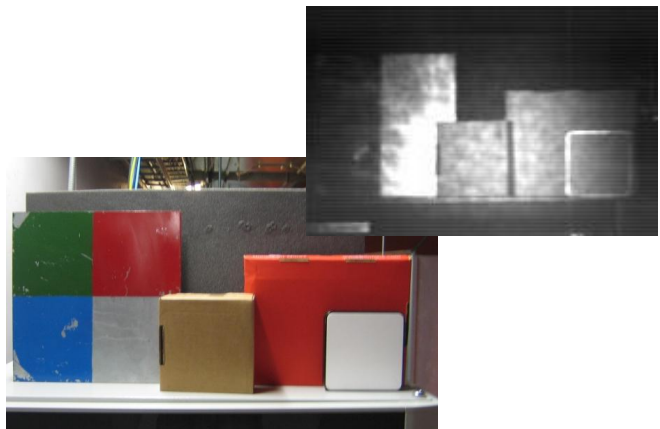
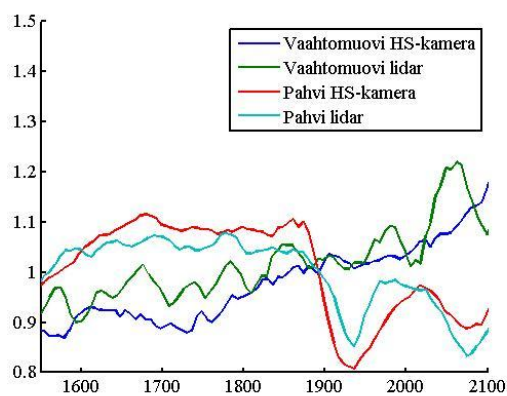
Esimerkki 3D skannauksesta on esitetty kuvassa 5, jossa vasemmalla olevassa valokuvassa näkyy koko alue kohteineen. Skannauksen hitauden vuoksi koko aluetta ei voitu skannata hienolla resoluutiolla, joten alue jaettiin pienempiin osiin. Oikealla kuvassa 5 näkyy männystä skannattu alue. IR spektri on jaettu kolmeen kanavaan, jotka on piirretty RGB - väreissä visualisoimista varten. Männyn runko ja oksat erottuvat tummanruskeina kellertävistä neulasista. Spektrisen informaation lisäksi jokainen mittapiste sisältää etäisyystiedon.



Kuva 5. 3D skannaus. Kenttämittauksissa mitatut kohteet (vasen) sekä skannattu ja näkyvälle aallonpituusalueelle visualisoitu 3D-pinta.

### Hyperspektrikameran valaisu

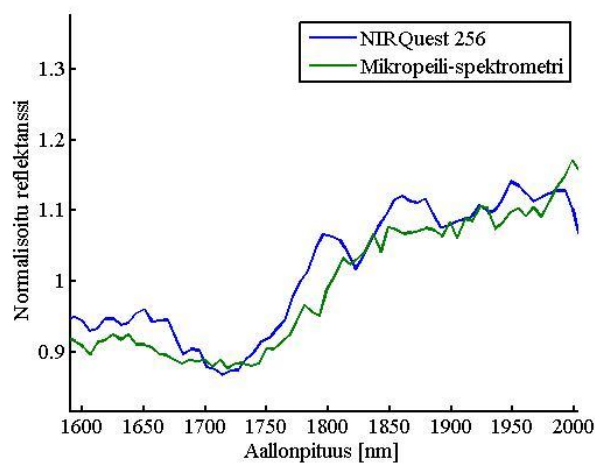
Hankkeessa tutkittiin myös superjatkumovalonlähteen käyttöä kaupallisen hyperspektrikameran valaisuun, sekä vertailtiin hyperspektrikameran mittaamia spektrejä kehitetyllä laitteistolla mitattuihin. Mikesin sisäratatesteissä lähtevä säde laajennettiin valaisemaan hyperspektrikameralla kuvattavaa kohdetta. Testeissä valaisu onnistui, mikä tarkoittaa että laitteisto mahdollistaa kaupallisten hyperspektrikameroiden yökäytön. Vertailumittaukset hyperspektrikameran ja kehitetyn laitteiston välillä on esitetty kuvassa 6. Kuvassa olevat testikohteet on valaistu superjatkumovalonlähteellä. Eri laitteilla mitatut spektrit eivät ole identtisiä, mutta tunnusomaiset piirteet eri kohteille ovat samankaltaisia.



Kuva 6. Hyperspektrikameran valaisu ja spektrien vertailu.

## Mikropeilispektrometri

Hankkeessa kehitettiin myös skannaavaan mikropeiliin perustuva kompakti ja edullinen spektrometri. Spektrometri käyttää diffraktiohilaa sekä kaupallista IR-ilmiasinta. Laitteen edullisuus perustuu yksittäiseen IR-pistedetektoriin, joka on huomattavasti edullisempi kuin IR-rividetektorit, joita käytetään kaupallisissa spektrometreissä. Tämä mahdollistaa noin kertoimella 10 edullisemman spektrometrin rakentamisen. Haittapuolena mikropeili-spektrometrissä on MEMS tekniikan alttius ulkoiselle tärinälle, mikä rajoittaa tekniikan käyttöä kenttäoloissa. Lisäksi spektrin mittaaminen mikropeilispektrometrillä on huomattavan hitaampaa kuin kaupallisella spektrometrillä, koska hilan hajottama spektri pitää pyyhkäistä detektorin yli. Missä kaupallinen spektrometri pystyy mittaamaan spektrin millisekunnissa, skannaava spektrometri vaatii noin 10 millisekuntia.

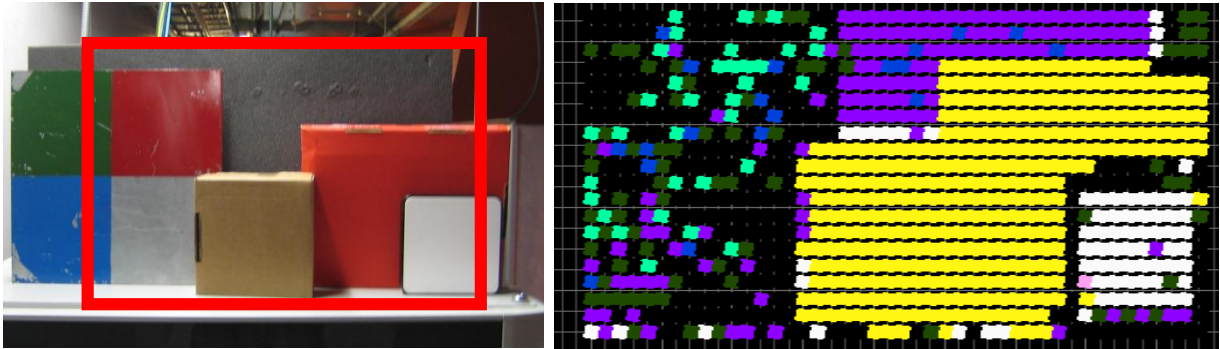


Kuva 6. Mikropeilispektrometrin ja kaupallisen IR-spektrometrin (NIRQuest 256) vertailu. Samaa spektriä on mitattu molemmilla spektrometreillä.

## Spektrin tunnistus

Hankkeessa oli tavoitteena kehittää automaattinen spektrintunnistusalgoritmi kohteen tunnistusta varten. Tämän tavoitteen saavuttamiseksi hyödynnettiin Geodeettisen laitoksen (MATINE rinnakkaishanke 2500M-0005) monivuotista kokemusta spektrintunnistuksesta. Kirjallisuudesta valittiin viisi tunnistusalgoritmia, joita testattiin sekä itse mitatuilla kirjastospektreillä, että NASA:n ASTER - tietokannan spektreillä. Algoritmit optimoitiin eri parametreilla kuten spektrikaistojen lukumäärällä ja leveydellä. Spektrien tunnistus automatisoitiin, joten laitteistolla voitiin tunnistaa spektrejä mittausten aikana reaaliajassa. Esimerkki skannatusta ja tunnistusalgoritmin läpi ajetusta kohteesta on kuvassa 7. Algoritmi erottaa toisistaan osan materiaaleista, mutta esimerkiksi sinkitty pinta ja maalatut metallilevyt jäävät algoritmilta tunnistamatta.

Tunnistuksen nopeuteen vaikuttavat tekijät kartoitettiin ja karakterisoitiin. Tärkeimpänä hidastavana tekijänä on kirjaston koko, eli kuinka moneen spektriin mitattua dataa verraataan. Käytetyillä muutaman kymmenen spektrin kirjastolla spektrintunnistus vie vain murto-osan spektrin mittaussajasta, joten kirjastojen kokoa voidaan kasvattaa entisestään vaikuttamatta mittausaikaan.



Kuva 7. Tunnistusalgoritmin läpi ajettu skannattu alue. Tunnistusalgoritmi erottaa pahvin, valkoreferenssin ja muovin hyvin luotettavasti, mutta sinkitty levy ja maalatut pinnat jäävät pääosin tunnistamatta.

## 5. Loppupäätelmät

Hankkeessa kehitettiin superjatkumovalonlähteeseen pohjautuva silmäturvallinen hyper-spektraalinen etämittauslaitteisto yhdessä Geodeettisen laitoksen, PVTUTKL:n ja Lasersec Systems Oy:n kanssa. Laitteistoa käytettiin sisä- ja kenttätesteissä kohteiden heijastus-spektrien mittaamiseen ja tunnistamiseen. Hankkeessa tehtiin tiivistä yhteistyötä Geodeettisen laitoksen kanssa (MATINE rinnakkaishanke) mm. jakamalla tietotaitoa sekä useilla yhteisillä mittauskampanjoilla.

Skannaavalla laitteistolla on integroidun etäisyysmittarin avulla mahdollista mitata 3D pintoja sekä tunnistaa kohteen materiaalit reaaliajassa. Lisäksi hankkeessa onnistuneesti testattiin laitteiston soveltuvuutta kaupallisen hyperspektrikameran valaisuun yökäytön mahdollistamiseksi.

Hankkeessa testattiin ja vertailtiin erilaisia spektrintunnistusalgoritmeja reaaliaikaista kohteentunnistusta varten. Reaaliaikainen spektrien tunnistus onnistuu muutaman kymmenen spektrin kirjastolla vaikuttamatta mittausnopeuteen. Kattavimpien, satojen tai tuhansien spektrien kirjastojen käyttö kuitenkin vaatii spektrien esiluokituksen.

Seuraavana kehitysaskelena tässä tutkimuksessa on laitteen koon pienentäminen sekä käyttö erilaisissa sovelluksissa. Monet sovellukset, kuten esimerkiksi sisätiloissa tapahtuvat mittaukset tai teollisuuden tuotantolinjoilla tehtävät mittaukset eivät vaadi kilometri-luokan kantamaa, jolloin lähetin- ja vastaanotto-optiikat voisi korvata yksinkertaisilla peileillä. Tämä pienentäisi laitteen kokoa "taskukokoiseksi". Tämän lisäksi ohjelmistoja pitää keventää tiettyyn sovellukseen sopivimman spektrintunnistusalgoritmin valinnalla ja tarvittavien spektrikirjastojen rajaamisella.

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

Edellisvuosien tutkimustuloksista on julkaistu Optics Express artikkeli yhteistyössä MIKE-Sin, PVTUTKL:n ja Lasersec Systems Oy:n kanssa. Tämän vuoden tulokset on myös tarkoitus julkaista arvostetussa kansainvälisessä vertaisarvioidussa optiikan alan julkaisusarjassa. Vuoden 2013 tutkimuksesta on valmistunut Teemu Kääriäisen diplomityöt. Matleena Myntti viimeistelee diplomityötään tämän hankkeen tuloksista. Lisäksi tutkimustuloksia on esitelty kansainvälisesti ja kansallisesti konferensseissa.

A. Manninen, T. Kääriäinen, T. Parviainen, S. Buchter, M. Heiliö, and T. Laurila, "Long distance active hyperspectral sensing using high-power near-infrared supercontinuum light source," Optics Express 22, 7172-7177 (2014)

A. Manninen, T. Kääriäinen, T. Parviainen, S. Buchter, M. Heiliö and T. Laurila, "Long



---

Range Active Hyperspectral Target Identification Using Near-IR Supercontinuum Light Source," CLEO Europe 12-16.05.2013, Munich, Germany

A. Manninen, T. Kääriäinen, T. Parviainen, S. Buchter, M. Heiliö and T. Laurila, "Active hyperspectral target identification at distances up to 250 m using infrared supercontinuum light source," Optics Days 20-21.05.2013, Espoo, Finland