

TIIVISTELMÄRAPORTTI (SUMMARY REPORT)

Pitkän kantaman hyperspektraalinen etämittausteknologia

Heikki Isotalo, Albert Manninen, Teemu Kääriäinen, Toni Laurila

Mittatekniikan keskus (MIKES), Tekniikantie 1, 02150 Espoo, puh. 0295 054 400

Tomi Parviainen

Puolustusvoimien teknillinen tutkimuslaitos (PVT), Paroistentie 20, 34110 Ylöjärvi

Scott Buchter, Miika Heiliö

Lasersec Systems Oy, Hirsalantie 11, 02420 Jorvas

Tiivistelmä

Hankkeessa tutkittiin kokeellisesti uudenlaisten superjatkumolasereiden käyttöä pitkän kantaman hyperspektraalisessa etämittauksessa. Hankkeen tavoitteena oli selvittää superjatkumolasereiden potentiaali kiinteiden kohteiden, kuten maalipinnat, kasvillisuus, muovit ja metallit, hyperspektraaliseen havaitsemiseen ja tunnistamiseen eri sääolosuhteissa ja suojasavun läpi. Hankkeessa toteutettiin superjatkumovalonlähteeseen perustuva etämittaustauslaitteisto, jolla onnistuttiin mittaamaan kiinteiden kohteiden heijastusspektrejä jopa 1500 m matkalta. Laitteistoon yhdistettiin etäisyysmittaus ja optiikka suunniteltiin monostaattiseksi ja automatisoiduksi, mikä mahdollisti optimoidut mittaukset eri mittaussuunnista. Peilioptisella lähettimellä saavutettiin lähi-infrapuna-alueen spektriset mittaukset koko 1000 nm – 2300 nm kaistalla kaikilla mittaussuunnilla. Laitteistolla testattiin myös peitesavun vaikutus mittauksiin ja kaupallisen hyperspektrikameran valaisua yökäytön mahdollistamiseksi. Hankkeessa selvitettiin myös mahdollisuutta käyttää laitteistoa kuvantaviin mittauksiin.

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 laajakaistaisten superjatkumolaserin käyttöä kiinteiden kohteiden sekä pistemäiseen hyperspektraaliseen mittaukseen että suuremman pinta-alan kuvaukseen. Heijastunut, laajakaistainen valo antaa paljon lisätietoa mitattavasta kohteesta, mikä sallii muun muassa kohteen tunnistamisen ja häirinnän.

Hankkeessa tutkittavan teknologian maanpuolustukselliset sovellukset ovat selkeät ja käsitettävät kohteiden havaitsemisen, tunnistamisen ja häirinnän. Esimerkiksi tarkka-ampujien havaitseminen ja etäisyydenmääritys maastossa onnistuu laserin takaisinheijastuksen perusteella. Tässä korostuu erityisesti valemaalien erottaminen kiikaritähäimien 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 räjähdeainemolekyylien, kemiallisten ja bioaseiden, mittaus ilmasta.

Superjatkumovalolla tarkoitetaan spektriltään hyvin voimakkaasti levennyttä valoa. Superjatkumo synnytetään tyyppillisesti 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 valmistetussa, voimakkaasti epälineaarisessa valokuidussa, kuten ns. fotonikidekuidussa, superjatkumo kattaa yleensä kaikki aallonpituudet näkyvän valon sinisestä 400 nm aallonpituudesta aina 2500 nm aallonpituuteen infrapuna (IR) -alueella. Valokuituja voidaan valmistaa myös erikoislaseista, jotka ovat läpinäkyviä infrapuna-alueella, jolloin superjatkumo voi yltää jopa 6000 nm saakka.

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. Kaupallisella superjatkumolähteellä vuonna 2007 tehdyssä tutkimuksessa on alustavasti arvioitu, että 600-900 nm aallonpituusalueella hyperspektraalisia LIDAR -mittauksia voidaan päivänvalossa tehdä enimmillään muutamien satojen metrien etäisyyksillä käyttäen useiden sekuntien mittausaika-koja per mittapiste. Fotonikidekuidulla on sittemmin kokeellisissa tutkimuksissa raportoitu 9 mikrojoulen pulssienergia, joka on riittänyt 150 metrin mittausetäisyyteen LIDAR sovelluksessa.

Kaupallisia superjatkumovalonlähteitä on ollut saatavilla runsaan viiden vuoden ajan. Kaupalliset laitteet ovat helppoja käyttää, mutta kalliiseen niin sanottuun fotonikidekuituun pohjautuvina ne ovat varsin arvokkaita laitteita (tyypillisesti 30 000 – 50 000 euroa) ja silti niiden valoteho (luokkaa 0.1-1 W) on riittämätön käytännöllisiin kenttämittauksiin yli 100 metrin etäisyyksillä. Erikoisrakenteinen, voimakkaasti epälineaarinen fotonikidekuitu maksaa useita satoja euroja metriltä ja voimakkaan superjatkumon synnyttäminen vaatii jopa muutamien kymmenien metrien pituisen kuidun. Fotonikidekuidun etuna on se, että sen dispersio-ominaisuudet (taitekertoimen aallonpituusriippuvuus) voidaan räätälöidä siten, että superjatkumo jatkuu voimakkaana yli koko näkyvän valon alueen, mikä on eduksi esimerkiksi mikroskopiassa. Tämän tutkimuksen mielenkiinnon kohteena on kuitenkin IR-alue 1000-2250 nm, joka antaa paljon hyödyllistä tietoa kohteen tunnistamiseksi. Infrapuna-alueen tehokkaan superjatkumon synnyttämiseen voidaan käyttää hyvin edullista, vain alle 0,5 EUR metriltä maksavaa valokuitua, kuten olemme jo osoittaneet. MAT 823 -hankkeessa demonstroidun valonlähteen tavoitellut valmistuskustannukset ovat luokkaa 8 000 euroa tai alle.

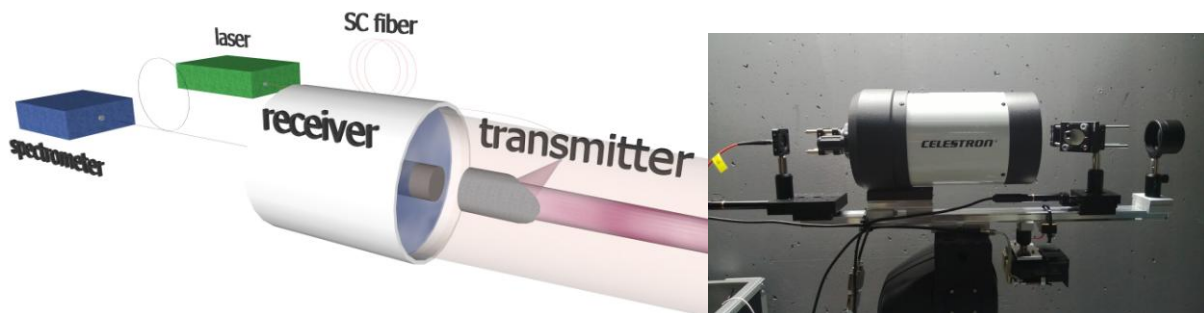
2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkimuksen tavoitteena oli demonstroida aktiivisen hyperspektraalisen mittausten menetelmän toimivuus yli kilometrin mittaussäällä. Tämän tavoitteen saavuttamiseksi laitteiston optinen kokonaisuus oli tavoitteena suunnitella ns. koaksiaaliseksi, jolloin lähtevä lasersäde on samalla optisella akselilla kuin signaalia keräävä teleskooppi. Koaksiaalisen kokonaisuuden tarkoituksena oli poistaa tarve säätää laitteiston suuntausta kohteen etäisyyden vaihtuessa. Kilometri-luokan mittaussääljen saavuttamiseksi laitteiston lähettävän ja keräävän optiikan fokuusointi oli tarkoitus automatisoida. Automaattisen fokuusoinnin toteuttamiseksi laitteistoon oli tavoitteena integroida etäisyydenmittaus. Lisäksi tutkimuksen yhtenä tavoitteena oli korvata linsseihin perustuva lähetinoptiikka peilipohjaisella, jolloin mahdolliset kromaattiset virheet saataisiin minimoitua varsinkin pitkällä mittaussäällä.

Kehitettävää laitteistoa oli tarkoitus käyttää sekä sisätesteissä muun muassa hyperspektirikameran valaisuun, että kenttätesteissä pitkän kantaman mittauksiin ja suojasavujen vaikutuksen selvittämiseen yhteistyössä Puolustusvoimien teknillisen tutkimuslaitoksen (PVTT) ja Lasersec Systems Oy:n kanssa.

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 kenttäkelpoiseksi. Merkittävämpänä parannuksena valonlähteeseen on tullut uusi valokuitukytkentä pumppulaserin ja superjatkumokuidun välille. Räätelöity kompakti kytkentä poisti tarpeen säätää kuitukytkentää laitteiston siirtojen ja ympäristöolosuhteiden muutosten jälkeen.



Kuva 1. Hyperspektaaliin mittauksiin käytetty laitteisto. Periaatekuvassa (vasen) näkyy pumppulaser (laser), superjatkumokuitu (SC fiber), paraboloidipeiliin perustuva lähetoptiikka (transmitter), heijastuneen valon keräävä teleskooppi (receiver) sekä infrapunaspektrometri (spectrometer).

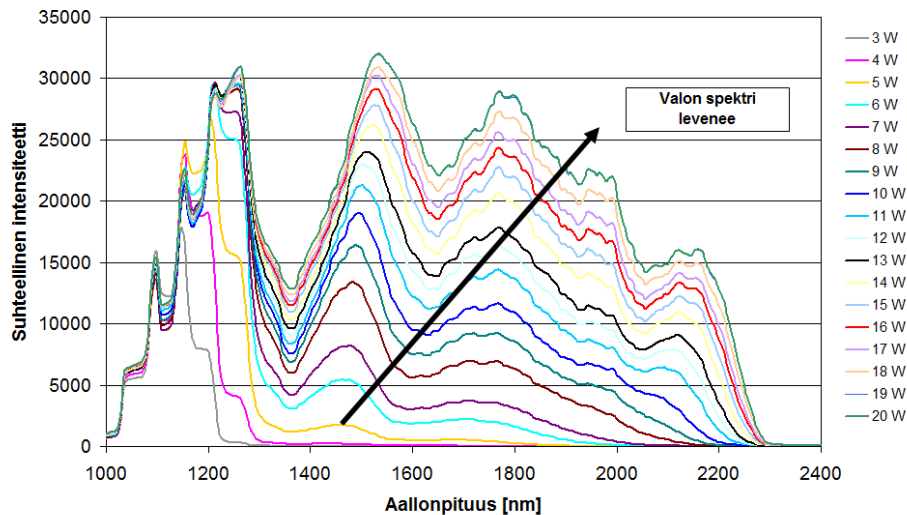
Laitteiston koaksiaaliseksi muutettu lähetin- ja vastaanotto-optiikka poistaa tarpeen säätää laitteiston suuntausta kohteen etäisyyden muuttuessa. Tämän lisäksi laitteistoon on liitetty kohteen etäisyyden mittaus. Etäisyydestiedon avulla sekä lähetin että vastaanotin fokusoidaan samaan pisteeseen optimaalisen signaalin saamiseksi. Etäisyyden mittaus ja fokusten säätö on täysin automatisoitu, jolloin laitteistolla on mahdollista tehdä skannaavat mittaukset laajan alueen kartoittamiseksi.

Laitteiston optiset osat on kiinnitetty optisen pöydän sijasta alumiinikiskoon, mikä tekee laitteistosta kevyen ja kompaktin. Tämän ansiosta laitteisto on voitu sijoittaa skannerin päälle, jolloin pistemittauksen sijaan on mahdollista tehdä kuvantavat mittaukset.

4. Tulokset ja pohdinta

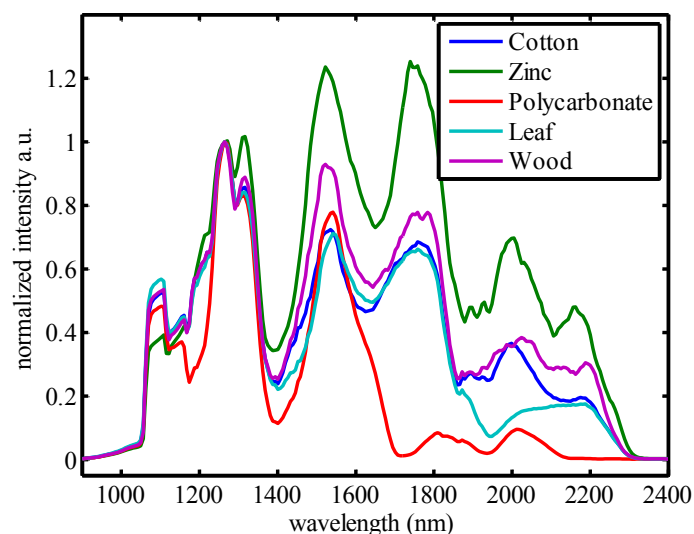
Jo aiemmassa MATINE-projektissa (MAT823) suunniteltu suuritehoinen superjatkumovalonlähde tuottaa laajan 1000-2300 nm spektrin infrapuna-alueelle, kuten näkyy kuvasta 2. Tässä hankkeessa kehitettiin kenttäkelpoinen optinen kytkentä pumppulaserin ja superjatkumokuidun välille. Perinteinen, MAT823 hankkeessa käytetty kolmisuuntainen säädin oli äärimmäisen tarkka, mutta vaati vakaan alustan ja stabiilit olosuhteet. Tässä työssä säädin korvattiin räätälöidyllä elementillä, joka pitää sisällään tarvittavan fokuointioptiikan. Sylinterisymmetrisen rakenteen vuoksi elementti on hyvin epäherkkä lämpötilan muutoksille ja värinälle, joten kestää kuljetukset ja kenttätetit ilman tarvetta

tehdä säätöjä.



Kuva 2. Superjatkumospektri pumpputehon funktiona.

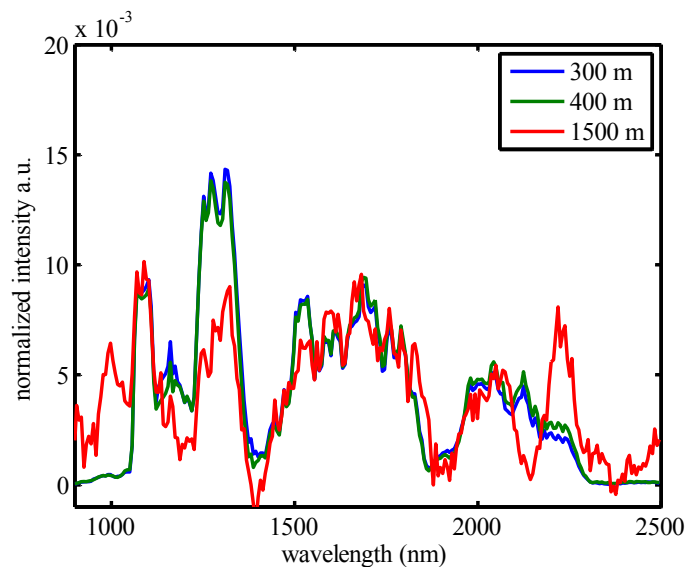
Testimittaukset hyperspektrilaitteistolla tehtiin MIKESin 40 m sisätestiradalla. Testikohteiksi valittiin mahdollisimman erilaiset materiaalit kuten puuvilla, sinkkilevy, muovi, kasvin lehti ja lakattu puu. Kuvassa 3 näkyy kyseisistä kohteista mitatut heijastusspektrit. Mittaukset tehtiin samalta matkalta ja samoissa olosuhteissa, jolloin ilmakehän veden absorptio vaikuttaa kaikkiin spektreihin yhtä paljon. Kuvan 3 spektrit on normalisoitu 1250 nm:n arvolla, mikä vastaa spektrin maksimia useimmille mitatuille kohteille. Eri materiaalien spektrit eroavat toisistaan huomattavasti. Mittausten perusteella eri materiaalit pystytään tunnistamaan tästä suppeasta joukosta, kuitenkin kattavammat spektrikirjastot ovat tarpeen jos kohteen tunnistusta yritetään tehdä tuntemattomassa ympäristössä.



Kuva 3. Heijastusspektrit eri materiaaleille. Puuvilla (Cotton), sinkki (Zinc), muovi (Poly-

carbonate), koristevadelman lehti (Leaf) ja lakattu koivuviilu (Wood) erottuvat selvästi toisistaan.

MIKESin sisäradan lisäksi laitteistoa testattiin myös kenttäolosuhteissa. Yli kilometrin mittausmatkan saavuttamiseksi laitteistoa testattiin Millog Oy:n mittaradalla. On tärkeä todeta että hankkeessa toteutettu laitteisto on silmäturvallinen Millog Oy:n mittaradan kaikilla mittausetäisyyksillä. Radan maalitauluina toimivat mustavalkoiseksi maalatut taulut, joita on sijoitettuna eri etäisyyksille. Tauluista mitatuista heijastusspektreistä, jotka näkyvät kuvassa 4, voimme nähdä että pinta-ala-normitetut spektrit ovat lähes identtiset 300 metrin ja 400 metrin etäisyyksiltä mitattuna. 1500 m mittausmatkalla ilmakehän veden absorptio aallonpituuksilla 1200 nm, 1400 nm ja 1900 nm leikkaa käytännössä kaiken valon vastaavilla aallonpituuskaistoilla. 1500 metrin etäisyydeltä mitatun spektrin signaali-kohina-suhde on huomattavasti pienempi kuin lyhyemmiltä etäisyyksiltä mitattujen spektrien, mikä selittyy sekä signaalin vaimenemisena matkan funktiona toiseen potenssiin että ilmakehän turbulenssien vaikutuksena. Turbulenssit poikkeuttavat säteen kulkua ja osan mittausajasta kohde oli käytännössä mittausalueen ulkopuolella. Kuitenkin, 1500nm matkalta mitattu spektri vastaa pääpiirteittäin lyhyemmiltä matkoilta mitattuja spektrejä.

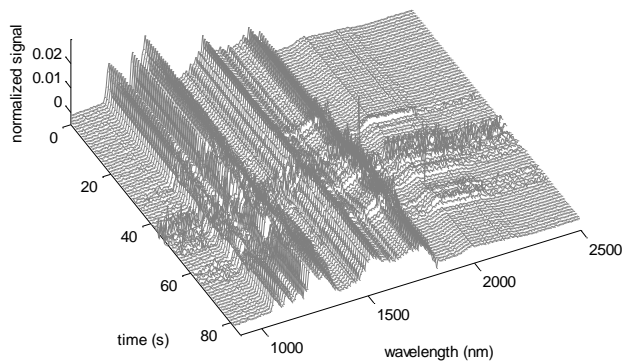


Kuva 4. Mustavalkoiseksi maalatun levyn heijastusspektrit eri mittausetäisyyksiltä.

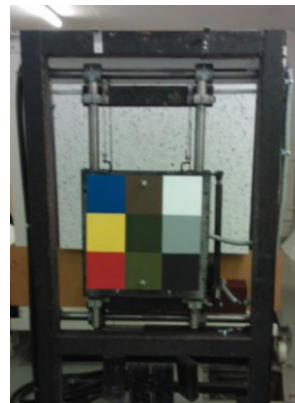
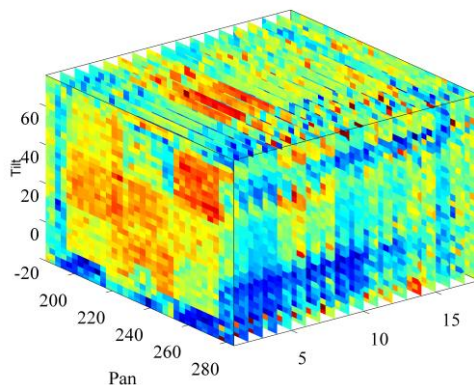
Hankkeessa tutkittiin suojasavun vaikutusta heijastusspektriin infrapuna-alueella. Mittaus tehtiin PVTTn mittaradalla 150 metrin etäisyydeltä kohteeksi valitusta valkoisesta standardiheijastimesta. Kuvassa 5 vasemmalla näkyy mitatut spektrit ajan funktiona. Osan ajasta peitesavu peittää kohteen täysin, mutta hyperspektraalisen laitteiston pitkät aallonpituudet läpäisevät savuverhon hyvin ja spektri on mitattavissa käytännössä koko peitesavun keston ajan. Pahimmillaan peitesavu huonontaa signaali-kohina-suhdetta, mutta ei estä kohteen mittausta.

Hankkeessa selvitettiin myös mahdollisuutta käyttää kehitettyä superjatkumovalonlähdettä kaupallisen hyperspektrikameran valaisuun. PVTTn sisäratatesteissä lähtevä säde laajennettiin valaisemaan hyperspektrikameralla kuvattavaa kohdetta. Testeissä valaisu onnistui, mikä tarkoittaa että laitteisto mahdollistaa kaupallisten hyperspektrikameroiden yökäytön. Saatuja tuloksia ei kuitenkaan julkaista tässä raportissa vaan ne ovat käytössä PVTTn sisällä.

Hankkeessa kehitetty kevyt ja suhteellisen kompakti laitteisto asennettiin skannausjalustalle skannaustestejä varten. Testeissä laitteiston suuntausta muutettiin pisteestä toiseen ja jokaisesta pisteestä nauhoitettiin taustaspektri ilman aktiivista valaisua sekä varsinainen spektri superjatkumovalaisun kanssa. Yhteensä 256 aallonpituudesta muodostuvat spektrit jaettiin 18 kaistaan kohteiden spektristen erojen selvittämiseksi. Kuvassa 6 näkyy 2D-skannattu kohde jaettuna spektrisiin kaistoihin. Eri maalit erottuvat toisistaan infrapuna-alueella, mutta näiden automaattinen tunnistaminen ja erottaminen vaatii kehittyneempien tunnistusalgoritmien kehittämistä ja vertailukirjastojen mittaamista. Tulokset kuitenkin osoittavat laitteiston soveltuvuuden skannaaviin mittauksiin.



Kuva 5. Valkoisen standardiheijastimen spektri ajan funktiona peitesavun läpi mitattuna. Mitattu kohde merkitty kuvaan punaisella.



Kuva 6. Skannattu hyperspektrimatriisi maalatuista kohteista. Spektri on jaettu 18 aallonpituuskaistaan. Skannaus leveys- (Pan) ja korkeussuunnassa (Tilt) paljastaa maalien spektriset erot. Kuvassa oikealla näkyy mitattu kohde.

Hankkeessa toteutettu hyperspektraalinen laitteisto näkyy kokonaisuudessaan kuvassa 7. Laitte on kompakti, kenttäkelpoinen, tietokoneohjattu ja automatisoitu. Jokaisesta mitattusta spektristä on automaattisesti vähennetty kohteesta mitattu taustaspektri. Lisäksi tarpeen mukaan etäisyystieto on mitattu ja laitteiston fokus säädetty automaattisesti.

5. Loppupäätelmät

Hankkeessa kehitettiin superjatkumovalonlähteeseen pohjautuva hyperspektraalinen etämittaustilteisto, jota onnistuneesti käytettiin sisä- ja kenttätesteissä kohteiden heijastusspektrien mittaamiseen. Laitteistolla pystyttiin mittaamaan kohteen spektrejä jopa 1500 metrin matkalta. Lisäksi hankkeessa selvitettiin tilteiston soveltuvuutta kaupallisen hyperspektrikameran valaisuun yökäytön mahdollistamiseksi. Testien mukaan valaisu toimii. Laitteistoa kehitettiin kompaktimmaksi ja kenttäkelloseksi, mikä mahdollisti myös skannaavat mittaukset. Alustavien testien mukaan tilteistolla on mahdollista tehdä kuvantavia hyperspekttrimittauksia.

Seuraavaksi päätavoitteena on kehittää tilteiston skannausta automaattiseksi ja keskittyä spektrien reaaliaikaiseen analyysiin ja kohteiden tunnistusalgoritmien kehittämiseen yhteistyössä Geodeettisen laitoksen, PVTTn ja Lasersec Systems Oy:n kanssa. Laitekehityksen puolella tavoitteena on kehittää tilteistoa akkukäyttöiseksi ja silmäturvalliseksi kaikilla etäisyyksillä, jolloin kenttätestejä voi toteuttaa PVTTn ja Millog Oy:n mittauskenttien ulkopuolellakin.

Tässä hankkeessa tehdyt 1.5 km mittaukset eivät olisi onnistuneet ilman Millog Oy:n Isto Nirosen ja Jyrki Pikkaraisen yhteistyötä. Projektin tekijät kiittävät edellä mainittuja pitkän mittaradan käytön mahdollistamisesta ja mittauksiin liittyvästä tuesta.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Tutkimustuloksista on viimeisteltävänä käsikirjoitus yhteistyössä MIKESin, PVTTn ja Lasersec Systems Oy:n kanssa. Tavoitteena on tieteellinen julkaisu arvostetussa kansainvälisessä vertaisarvioidussa optiikan alan julkaisusarjassa. Teemu Kääriäinen valmisteleo tutkimuksesta diplomityötä. Lisäksi tutkimustuloksia on esitelty kansainvälisesti ja kansallisesti konferensseissa.

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

7. Hankkeen seuraajan lausunto raportista

Espoossa 2.12.2013

Heikki Isotalo