



## TIIVISTELMÄRAPORTTI (SUMMARY REPORT)

Hyperspektraalinen etämittausteknologia kohteiden havaitsemiseen, tunnistamiseen ja häirintään

**Heikki Isotalo, Toni Laurila, Teemu Kääriäinen, Albert Manninen**  
**Mittatekniikan keskus (MIKES), Tekniikantie 1, 02150 Espoo, puh. (Isotalo) 029 5054 400**  
**Tomi Parviainen**  
**Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos (PVTT), Paroistentie 20, 34110 Ylöjärvi**

### Tiivistelmä

Tutkimushankkeessa selvitettiin kokeellisesti uudenlaisen laser-valonlähteen, superjatkumolaserin, käyttöä hyperspektraalisessa etämittauksessa. Hankkeen tavoitteena oli selvittää superjatkumolasereiden soveltuvuus kiinteiden kohteiden, kuten tarkka-ampujan kiikarin, hyperspektraaliseen havaitsemiseen, tunnistamiseen ja häirintään. Hankkeessa rakennettiin kaupalliseen 20 watin tehoiseen kuitulaseriin ja optiseen kuituun perustuva superjatkumovalonlähde, jolla saatiin aikaan 15 watin teho aallonpituuskaistalle 1000-2300 nm. Lisäksi suunniteltiin ja rakennettiin lähetin- ja vastaanotinoptiikka sekä spektrinen kohteesta heijastuneen valon ilmaisu.

Toteutetulla hyperspektrisellä mittalaitteella tehtiin koemittauksia ensin MIKESissä 50 metriä pitkällä sisämittaradalla. Lokakuussa 2012 toteutettiin mittauskampanja, jossa mittauksia tehtiin ulkona kenttäolosuhteissa yhteistyössä Puolustusvoimien teknillisen tutkimuslaitoksen (PVTT) kanssa. Ulkona tehdyissä kenttämittauksissa käytetty mittausetäisyys oli 250 metriä.

### 1. Johdanto

LIDAR -mittausperiaate (Light Detection And Ranging) on tunnettu, laserpulssin kulku-aikaan pohjautuva, etäisyydenmittausmenetelmä. Perinteisessä LIDAR-mittauksessa käytetään yksiväristä (monokromaattista) laser-valonlähdettä, jolla saadaan vain etäisyystieto kohteesta. Tässä hankkeessa tutkittiin spektrisesti laajakaistaisten superjatkumolaserin pulssien käyttöä kiinteiden kohteiden hyperspektraaliseen mittaukseen. Spektrisesti laajakaistainen valopulssi antaa sirotessaan tietoa valon kulkumatalla olevan ilmakehän kaasusta ja aerosoleista sekä siitä kiinteästä kohteesta, johon laserpulssi mahdollisesti osuu. Hyperspektraalisella LIDARilla voidaan siis mitata laserpulssin kantoetäisyydellä olevan ilmakehän kaasukoostumusta ja kiinteätä kohdetta, kuten puiden lehvästöä, sotilasajoneuvoja maastossa tai meren pintaa lentokoneesta käsin. Heijastuneen valon spektrinen analyysi auttaa puuston tai ajoneuvon tunnistamisessa tai merellä kelluvan öljylautan alkuperän jäljittämässä. Jos hyperspektrisen järjestelmän valonlähteen teho on suuri, kuten tässä työssä oli, niin tekniikkaa voidaan käyttää sekä auringon valossa että pimeässä (ns. aktiivinen valaisu).

Hankkeessa tutkittavan teknologian maanpuolustukselliset sovellukset ovat selkeät ja käsittävät kohteiden havaitsemisen, tunnistamisen ja häirinnän. Hyperspektraalisella etämittauksella voidaan havaita ja analysoida takaisinheijastusta kiinteistä kohteista sekä tutkia ilmassa olevia

Postiosoite	MATINE Puolustusministeriö PL 31 00131 HELSINKI	Sähköposti	matine@defmin.fi
Käyntiosoite	Eteläinen Makasiinikatu 8 00130 HELSINKI	WWW-sivut	www.defmin.fi/matine
Puhelinvaihe	(09) 16001	Y-tunnus	FI01460105
Pääsihteeri	(09) 160 88310	OVT-tunnus/verkkolaskuosoite Itellan operaattorivälittäjä-tunnus	003701460105 003710948874
Suunnittelusihteeri	(09) 160 88314	Verkkolaskuoperaattori	Itella Information Oy
Toimistos sihteeri	050 5555 837	Yhteyshenkilö/Itella	helpdesk@itella.net
Faksi kirjaamo	(09) 160 88244		



---

kaasumaisia molekyyliä, kuten räjähdeainemolekyyliä, ja aerosoleja. Laajakaistainen superjatkumo on omiaan kohteiden valaisuun hyperspektrikameralla kuvattaessa. Hyperspektrisellä etämittaustekniikalla on lisäksi erinomainen kaksikäyttömahdollisuus ja siviilisovellukset kattavat tärkeitä sovellusalueita kuten mineraalien ja kasvillisuuden kaukokartoituksen.

Superjatkumovalolla tarkoitetaan valokuidussa spektriltään hyvin voimakkaasti levennyttä valoa. Superjatkumo synnytetään tyypillisesti kytkemällä valokuituun suuritehoinen laserpulsси, joka virittää optisen kuidun epälineaarisia vasteita, kuten Raman-sironnan, taitekertoimen riippuvuuden laserpulssin tehosta sekä kuidussa lähes vaimenematta ja muotoaan muuttamatta etenevät laserpulssit, solitonit. Epälineaaristen vasteiden yhteisvaikutuksesta laserin alunperin kapeakaistainen spektri leviää voimakkaasti ja valokuidun ulostulossa nähdään superjatkumo. Lasista valmistetussa valokuidussa superjatkumo kattaa tyypillisesti kaikki aallonpituudet näkyvän valon sinisestä 400 nm aallonpituudesta aina 2500 nm aallonpituuteen infra-puna (IR) -alueella. Valokuituja voidaan valmistaa myös erikoislaseista, jotka ovat läpinäkyviä infra-puna-alueella, jolloin superjatkumo yltää jopa 6000 nm saakka.

Alustavissa tutkimuksissa on osoitettu, että kaupallisilla superjatkumolähteillä on mahdollista tehdä hyperspektraalisia LIDAR -mittauksia maksimissaan muutamien satojen metrien etäisyyksillä. Kaupalliset superjatkumovalonlähteet pohjautuvat voimakkaasti epälineaariseen valokuituun, niin sanottuun fotonikidekuituun. Fotonikidekuidun ydin on pienempi kuin normaalissa tietoliikennekäyttöön tarkoitettussa valokuidussa, minkä vuoksi valon intensiteetti kuidun sisällä saadaan suureksi, mikä puolestaan voimistaa kuidussa tapahtuvia epälineaarisia ilmiöitä ja leventää laserpulssin spektrin tehokkaammin laajaksi superjatkumoksi. Pienikokoinen fotonikidekuidun ydin on toisaalta haitta, koska pieneen ytimeen ei voida kytkeä voimakkaita laserpulseja ilman, että kuidun ydin vaurioituu. Fotonikidekuidulla on tutkimuksissa raportoitu 9 mikrojoulen pulssienergia, joka on riittänyt 150 metrin mittausetäisyyteen LIDAR-sovelluksessa.

---

## 2. Tutkimuksen tavoite

Hankkeen tarkoituksena oli tehdä kokeellinen selvitys (ns. feasibility study) superjatkumolaserin soveltuvuudesta hyperspektraalisiin etämittauksiin muutaman sadan metrin mittausetäisyydellä. Hankkeen tavoitteena oli suunnitella ja rakentaa hyperspektraalisiin etämittauksiin soveltuva, kaupallisia ratkaisuja suuritehoisempi ja edullisempi, superjatkumovalonlähde sekä toteuttaa mittausjärjestelmän vaatimat optiset järjestelmät. Mittausmenetelmän toimivuus oli tarkoitus todentaa sekä sisätiloissa tehtävillä suorituskyvyn määrittämisellä että kenttäolosuhteissa tehtävillä testeillä.

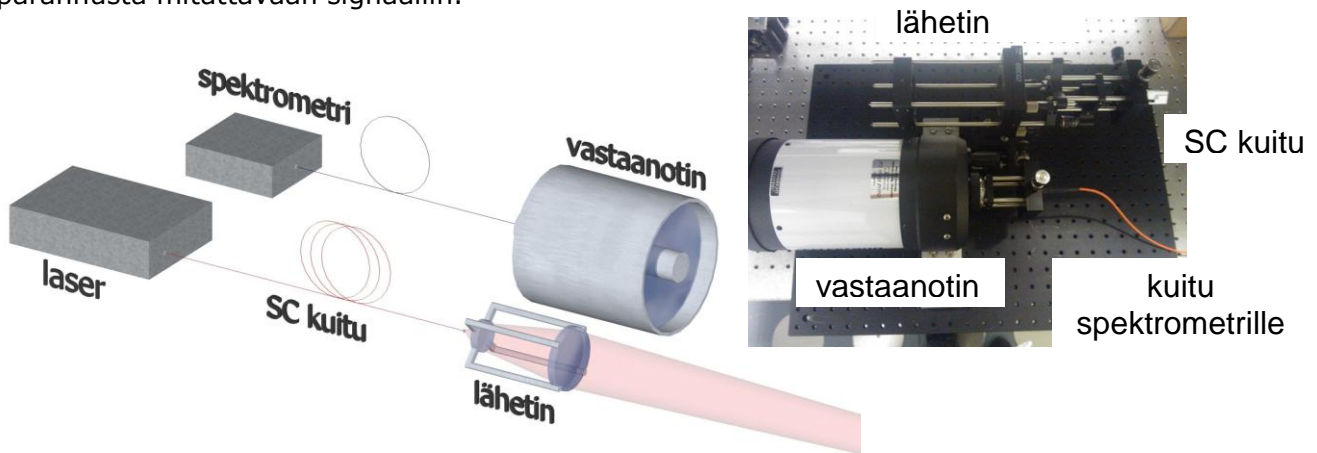
Superjatkumovalonlähde oli tarkoitus toteuttaa yhteistyössä Lasersec Systems Oy:n kanssa. Lisäksi tavoitteena oli testata järjestelmän soveltuvuus kenttämittauksiin ja sotilaallisiin mittauksiin yhteistyössä Puolustusvoimien teknillisen tutkimuslaitoksen (PVTT) kanssa.

## 3. Aineisto ja menetelmät

Hankkeessa suunniteltiin ja toteutettiin kaupallisia lähteitä edullisempi ja silti suuritehoisempi superjatkumolähde. Laserlähteeksi hankittiin kaupallinen 20 watin tehoinen ja 1064 nm aal-

lonpituudella toimiva kuitulaser. Hankkeessa ei käytetty superjatkumon synnyttämiseen suhteellisen kallista fotonikidekuitua, joka saattaa maksaa jopa 1000 euroa metriltä, vaan tavallista, edullista alle 1 euron metriltä maksavaa lasivalokuitua.

Projektissa kehitetyn laitteiston (kuva 1) lähetoptiikaksi valittiin kahteen akromaattiseen linssiin perustuva säteen laajennin (beam expander), jolla superjatkumo laserpulssi fokuoitiin kohteeseen. Laajentimen jälkimmäinen linssi valittiin kaksituumaiseksi, kompromissi kompaktin koon ja fokuointiominaisuuksien väliltä. Fokusoimassa valoa pitkille etäisyyksille rajoittavana tekijänä säteen koolle kohteessa on säteen divergenssi, jonka suuruus riippuu lähtevän säteen koosta. Saavuttaakseen suurimman valon tehotiheyden kohteen päässä on edullista valita mahdollisimman suuri lähettävä optinen elementti, meidän tapauksessa linssi. Jo halkaisijaltaan 5 cm linssi on riittävä fokuoimaan superjatkumon aallonpituudet noin senttimetrin kokoiselle alalle 250 m etäisyydelle. Saavutettavaan rajaan vaikuttavat myös ilmakehän turbulenssit ja keräysoptiikan suuntauksen epävarmuus, joten tehokkaampi fokuointi ei välttämättä tuo parannusta mitattavaan signaaliin.



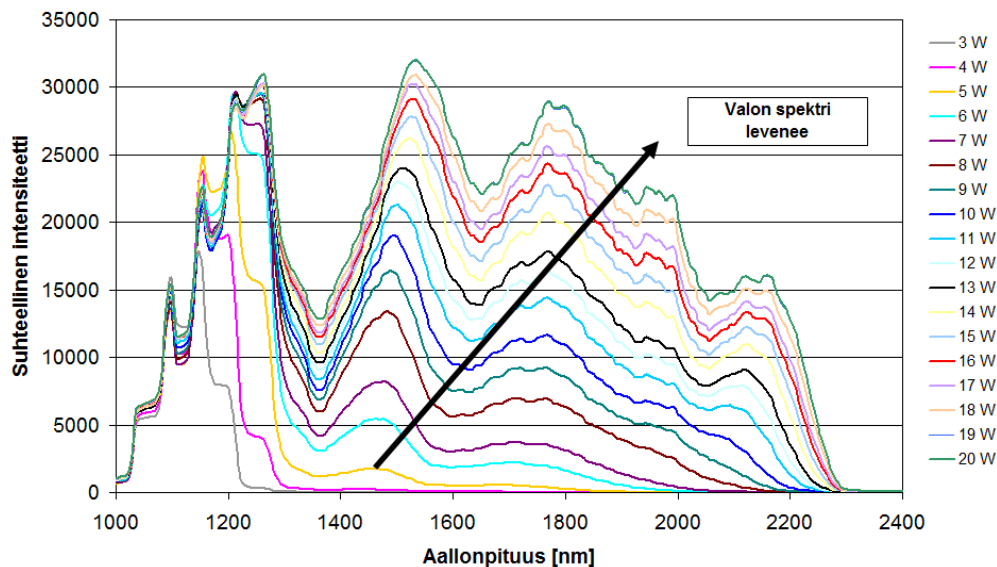
Kuva 1. Hyperspektrimittauksissa käytetty laitteisto.

Takaisinheijastunut signaali vaimenee suhteessa  $1/L^2$  etäisyyden  $L$  funktiona. Signaali saadaan kerättyä tehokkaammin pinta-alaltaan ison vastaanottimen avulla. Tämän ja akromaattisuuden takia keräysoptiikaksi valittiin peiliteleskooppi. Peiliteleskooppi kerää kaikki aallonpituudet samaan pisteeseen, johon asetettiin spektrisen ilmaisimen kuidun pää. Teleskoopin keräämä valo kerättiin vaihtoehtoisesti kolmelle eri ilmaisimelle: kaupallinen optinen spektrianalysointilaite, kaupallinen lähi-infrapuna-alueen spektrometri tai Fabry-Perot Interferometriin (FPI) pohjautuva, itse toteutettu ilmaisu. Kolmen eri ilmaisutavan avulla voitiin verrata kunkin tavan suorituskykyä tässä sovelluksessa.

VTT:llä kehitetty säädettävä FPI-suodin perustuu kahden heijastavan pinnan välissä tapahtuvaan interferenssi-ilmiöön. FPI-suotimen läpäisseen valon spektri määräytyy heijastavien pintojen välisestä etäisyydestä. FPI-suotimen hyvänä puolena on se, että valon ilmaisuun vaaditaan vain yksi ilmaisimien, mikä on huomattavasti halvempaa kuin kaupallisissa spektrometreissä olevat rivi-ilmaisimet. Haittapuolena säädettävällä FPI-suotimella on mittauksen kesto, kun läpäisykaista täytyy pyyhkäistä spektrin yli. Lisäksi spektrin erottelukyky on vaatimattomampi kuin käytetyillä kahdella muulla spektrometrillä. Myös FPI-suotimen korkeammat kertaluvut ovat päällekkäin laajakaistaisimpia spektrejä tarkastellessa.

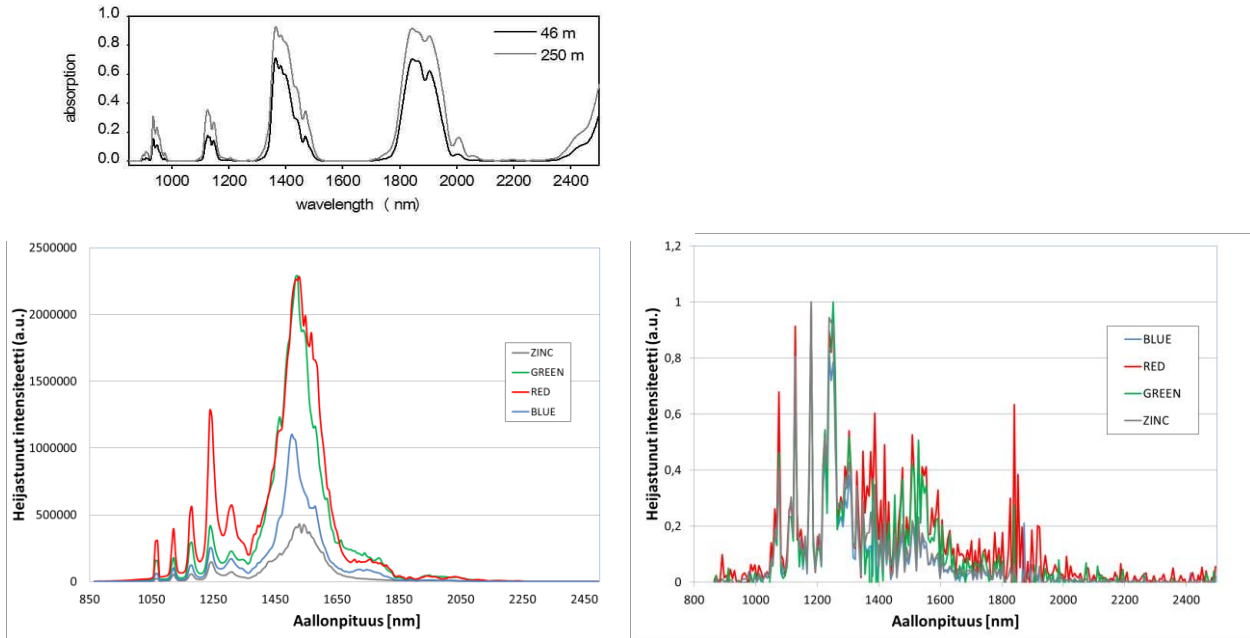
#### 4. Tulokset ja pohdinta

Projektin yhtenä tavoitteena oli kehittää tehokas, robusti, mutta edullinen superjatkumo valonlähde. Tähän tarkoitukseen valittiin kaupallinen 20 W kuitulaser pumppaamaan valokuitua. Kuvassa 2 on esitetty superjatkumon syntyminen pumpputehon funktiona. Kuvasta näkyy, että jo 3 W teho riittää siirtämään osan 1064 nm pumppulaserin tehosta pitemmille aallonpituuksille. Riittävän suurilla pumpputehoilla superjatkumospektri ylittää 2300 nm asti. 15 W pumpputehon jälkeen superjatkumo alkaa saturoitumaan eikä tehon lisäys tämän jälkeen juurikaan levennä spektriä. Tämä johtuu kuidun absorptiosta eli suurin osa lisätystä tehosta muuttuu lämmöksi kuidun sisällä.



Kuva 2. Superjatkumospektri pumpputehon funktiona.

Testimittaukset tehtiin MIKESin 50 m mittaradalla kontrolloiduissa sisäolosuhteissa. Testimittauksiin valittiin kolme metallimaalia: punainen, vihreä ja sininen. Neljäs pinta oli paljas galvanoitu metallilevy. Kooltaan noin 15 cm x 15 cm testinäytteet sijaitsivat 46.5 m etäisyydellä lähetin- ja vastaanotto-optiikasta ja säde fokuoitiin yhteen kohtaan kerrallaan. Kuvassa 3 on heijastuneet spektrit. Erot spektrien muodoilla infrapuna-alueella ovat melko pienet, koska maalit ovat suunniteltu näkyvän alueen aallonpituuksille (400-700 nm). Tarkempi tarkastelu paljastaa kuitenkin eri kaistojen väliset erot, esimerkiksi punaisen ja vihreän signaali on lähes yhtä voimakas 1500 nm kohdalla, kun taas 1300 nm kohdalla punaisen maalin heijastusspektri on moninkertainen vihreään nähden. Kaikille spektreille ominainen minimi 1400 nm kohdalla johtuu ilmakehän absorptiosta, joka on mallinnettu kuvassa 3. Valtaosa absorptiosta johtuu vesimolekyyleistä, joiden pitoisuus vaihtelee suuresti sään ja vuodenaikojen mukaan.



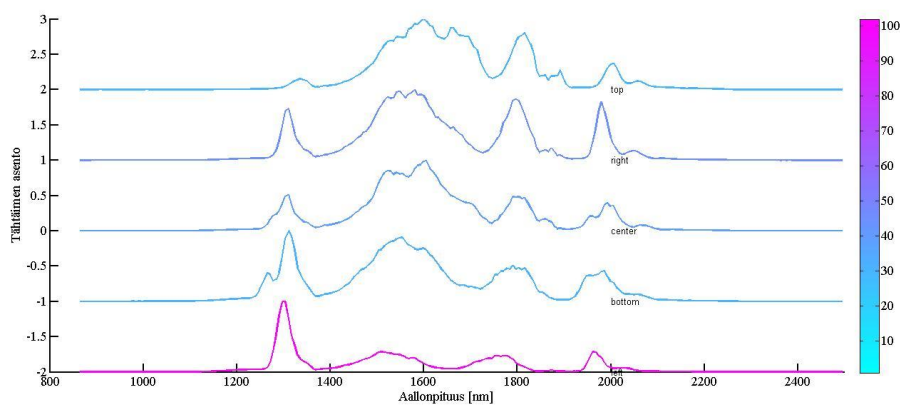
Kuva 3. Heijastusspektrit 46.5 m (vas.) ja 250 m (oik.) matkoilta. Ilmakehän absorptio (ylh.) mittaushetkellä vallitsevista olosuhteista. 250 m tulokset on normeerattu ilmakehän transmissiolla.

Samat värikohtiot mitattuna 250 m etäisyydeltä näkyvät kuvan 3 oikean puoleisesta kuvaajasta. Signaali-kohina suhde on lähes kaksi kertaluokkaa huonompi verrattuna 46.5 m mittaukseen, mutta spektrit erottuvat kuitenkin taustasta selkeästi. On huomioitavaa, että esitetyt spektrit on mitattu 500 ms valotusajalla, jolloin esimerkiksi pyyhkäisy laajemman alueen yli olisi mahdollinen muutamassa sekunnissa. Koska kiinteiden kohteiden spektriset vasteet ovat tyypillisesti hyvin laakeita, signaali-kohina suhdetta voisi parantaa keskiarvostamalla esimerkiksi 50 tai 100 nm spektrikaistat.

Toteutettu laitteisto on esitetty kuvassa 4 kenttäolosuhteissa. Laitteisto sijoitettiin katettuun perävaunuun suojaan sateelta. Lähtö- ja keräysoptiikka sekä aputähtäin suunnattiin 250 m päässä oleviin testinäytteisiin mittauksia varten. Värikohtiomittauksen jälkeen laitteisto suunnattiin kolmijalan päässä olevaan kiikaritähttäimeen, jonka kulmaa säädettiin mittauksen välissä. Kuvassa 5 on tähtäimestä heijastuneet spektrit, joiden voimakkuus ja muoto muuttuvat voimakkaasti eri kulumista mitattuna. Tähtäimen suuntaus tapahtui käsivaraisesti, jolloin esimerkiksi vasemmalle ja oikealle käännettynä todellinen kohtauskulma on voinut olla hieman eri. Verrattuna kuvan 3 väritauluihin kyseisen kiikaritähttäimen heijastus on todella voimakas, jolloin sen havaitseminen onnistuisi helposti lyhyemmälläkin valotusajalla tai pitemmältä etäisyydeltä.



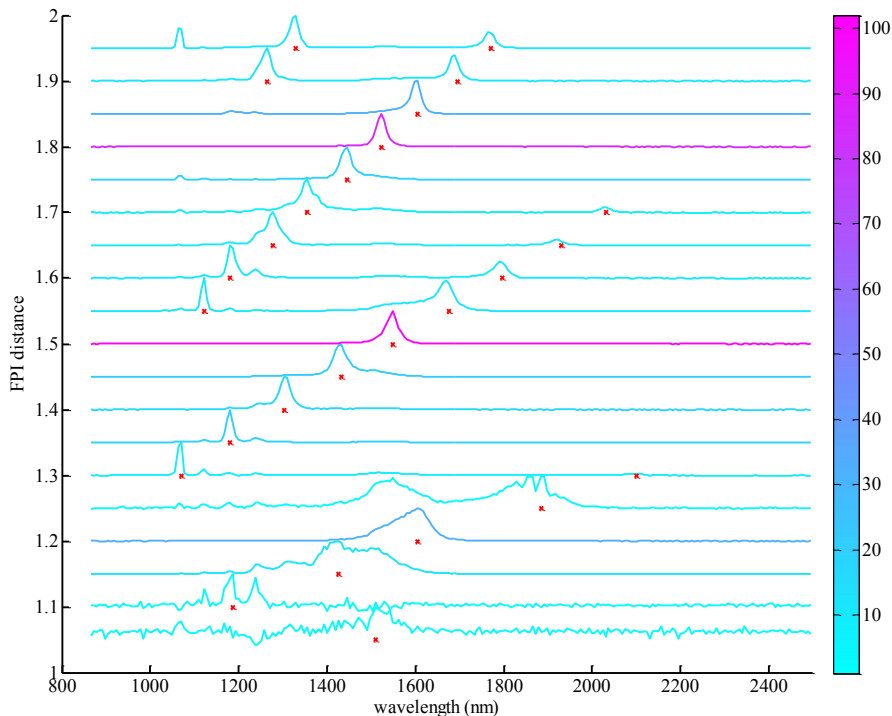
Kuva 4. Kenttätestit 250 m etäisyydeltä. Laitteisto oli sijoitettuna katettuun perävaunuun. Mitattavat kohtiot näkyvät oikeanpuoleisessa kuvassa.



Kuva 5. Kiikaritähäimestä eri kulmista mitatut heijastusspektrit. Etäisyys kohteeseen 250 m.

Kaupallisen spektrometrin lisäksi projektissa tutkittiin VTT:n kehittämän säädettävän FPI suotimen soveltuvuutta hyperspektraalisiin LIDAR-mittauksiin. FPI suodin läpäisee yhden spektrisen kaistan ja heijastaa muut aallonpituudet. Tämän vuoksi koko spektrin mittaaminen vaatii suotimen skannauksen spektrin yli. Kuvassa 6 näkyy pyyhkäisy sinisestä maalis-

ta heijastuneen spektrin yli, käyttäen kaupallista spektrometriä FPI suotimen jälkeen. Jokaista FPI:n etäisyyslukemaa (kuvan 6 pystyakseli) vastaa siis FPI:n läpäissyt spektri, jonka keskusaallonpituus ja kaistanleveys määräytyvät suotimen pintojen etäisyydestä. Kuvasta 6 nähdään, että pienillä FPI:n pintojen etäisyyksillä spektrin kaista on leveämpi, mikä edesauttaa paremman signaali-kohina suhteen saavuttamisessa. Lisäksi pienillä pintojen etäisyyksillä (<1.3) eri kertalukujen spektrit eivät ole päällekkäin, mikä mahdollistaa koko spektrin mittaamisen yksittäisellä detektorilla.



Kuva 6. Normalisoitu FPI:n pyyhkäisy sinisestä kohteesta. Data on spektreittäin normalisoitu maksimiarvoillaan, maksimiarvot kuitenkin värikoodattu. Kuvasta näkyy päästökaistojen keskukset (punaiset rastit). Pienillä pintojen etäisyyksillä (<1.25) päästökaista on laajempi eikä eri kertaluvut ole päällekkäin. Etäisyyksillä 1.3-1.65 toisen kertaluvun päästökaista on kapeampi, mutta kolmas kertaluku on päällekkäin >1.55 etäisyyksillä. Kolmas kertaluku on päällekkäin lähes koko ajan toisen (<1.7) tai neljännen (>1.85) kertaluvun kanssa.

Alun perin kenttämittauksia oli tarkoitus tehdä kahteen otteeseen mutta lasertoimittajalla oli katkos tuotannossa ja laserin saaminen viivästyi yli kahdella kuukaudella. Tämän vuoksi kenttätestejä voitiin tehdä vain yhden viikon aikana.

## 5. Loppupäätelmät

Hankeessa suunniteltiin ja toteutettiin menestyksellisesti uudenlaiseen superjatkumovalonlähteeseen pohjautuva hyperspektraalinen etämittalaitteen prototyyppi, jolla tehtiin kenttämittauksia aina 250 metrin etäisyydellä olevista testikohteista. Testien tulokset ovat lupaavia ja lähitulevaisuudessa tavoite on osoittaa menetelmän toimivuus muutamien kilometrien mittaustäisyydellä sekä tutkia lähetin- ja vastaanotinoptiikan aktiivisen säädön vaikutusta suorituskykyyn. Myös skannaava mittaus on seuraava luonnollinen kehityssaskel.



---

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

Tutkimustuloksista valmistellaan parhaillaan käsikirjoitusta yhteistyössä MIKESin, PVTTn ja Lasersec Systemsin kanssa. Tavoitteena on tieteellinen julkaisu arvostetussa kansainvälisessä vertaisarvioidussa optiikan alan julkaisusarjassa.