

HÜPERSPEKTRAALSENSOORIKA RAKENDAMINE MILITAAROBJEKTIDE SIGNATUURIDE TUVASTAMISEKS JA VARJAMISEKS

Martin Jürise, Andres Udal, Jaanus Kaugerand



ÜLEVAADE. Peegeldunud valguse spektraalne jaotus üle lainepikkuste moodustab unikaalse signatuuri, mille abil saab eristada vaadeldavaid objekte. Hüperspektraalne kuvamine esindab uut modernset supersensortehnoloogiat, mis jäädvustab igale salvestatud pildi pikslile ka spektri üle nähtava valguse, ultraviolet- ja/või infrapunakiirguse lainela. Siinne artikkel tutvustab hüperspektraalkaamerate pakutavaid uusi võimeid, mis ületavad oluliselt inimsilma kolmevärvinägemisel põhinevat spektraalset eristusvõimet nähtava valguse suhteliselt kitsas lainepikkuste vahemikus 450–650 nm. Seetõttu ei ole inimsilmaga võimalik märgata näiteks loodusfooni tagasipeegeldumise järsku astet lainepikkusvahemikus 700–750 nm, mis on oluline nii militaarobjektide varjestamisel kui ka avastamisel.

Tehtud eksperimendid lainepikkuste vahemikus 400–1700 nm näitavad, et objektide peitmine ja moondamine on praegusel tehnoloogiaajastul muutumas järjest keerulisemaks ning selleks, et ajale mitte jalgu jääda, on vaja panustada vastavasse kaitsetehnoloogiasse. Eriti selgelt on seda näha, kui uurida Kaitseväes kasutatud värvide (NATO standardid 4360, 2836, 4698 + AEP 59–65) spektraalseid omadusi. Näiteks punase valguse ja infrapunakiirguse piirialas lainepikkuste 600–700 nm ümbruses on selliste värvidega kaetud sõidukid selgelt eristatavad, kuna värvides puuduvad sellised loodusfooni olulised biokeemilised komponendid nagu vesi ja klorofüll. Kokkuvõttes vajab Kaitsevägi paremaid varjestamismeetodeid, mis kaitseksid militaarobjekte hüperspektraalse vaatluse eest.

Võtmesõnad: *hüperspektraaltehnoloogia, spektraalne signatuur, loodusfoon, militaarobjektide varjamine, militaarobjektide tuvastamine*

Keywords: *hyperspectral technology, spectral signature, natural background, concealment of military objects, identification of military objects*

1. Sissejuhatus

Tänu inimese leidlikkusele ja nüüdisaegsetele sensorsüsteemidele saab tänapäeval üha lihtsamini erinevaid objekte nende unikaalse mustri järgi eristada. Inimeste identifitseerimiseks on võimalik kasutada näpujälgi, silma võrkkesta

mustrit või kõne helilaine spektrogramme, loomadel nina pealispinna mustrit, kabjalistel kabja mustrit, samuti häälsüste spektraalmustrit. Puudel kannavad infot aastarõngad, mille järgi saab isegi üksikuid puid teistest sama liigi esindajatest eristada. Tehisobjekte eristatakse nende helikarakteristikute, radarisignaali peegeldusrikluse ning tänapäeval juba ka inimsilmale nähtava ja nähtamatu elektromagnetkiirguse spektraalanalüüsi ehk hüperspektraalsignatuuri järgi. Käesolevas artiklis mõeldakse hüperspektraaltehnoloogia all vaatlusvälja kuvamist, mille puhul igale ruumilisele elemendile on võimalik välja tuua ka intensiivsuse spektraaljaotus lainepikkuste järgi.

Artikli rakenduslikuks eesmärgiks on kaitseotstarbeliste objektide (esmajärgkorras Kaitseväe sõidukite) hüperspektraalsignatuuride hindamine, et teha järeldusi paremaks objektide seireks, vaatluseks, avastamiseks, tuvastamiseks ja identifitseerimiseks. Ühtlasi tuuakse välja lahendused, kuidas objekte paremini varjata võimaliku hüperspektraalse jälgimise eest.

Artiklis on pööratud tähelepanu nähtava valguse ja lähiiinfrapunakiirguse piirkondadele 400–1700 nm ulatuses, kasutades kahte hüperspektraalkaamerat: vastavalt 400–900 nm ja 900–1700 nm diapasoonele. Kõige olulisemaid järeldusi on tehtud punase valguse piirkonna kohta. Erilist tähelepanu on pööratud loodusfooni tugeva tagasipeegelduse alale 700–1000 nm (Mishra 2017)¹. Läbivaks eesmärgiks on militaarsete tehisobjektide võrdlus looduskeskkonnaga.

2. Hüperspektraaltehnoloogia areng ja probleemid

Hüperspektraalkaamereid hakati välja töötama juba 1980. aastatel erinevate pindade peegeldusomaduste uurimiseks, kuid esialgu oli nende lahutusvõime väike ja mõõtmisulatus piiratud. Viimasel kümnendil on aga sarnaseid kaamereid hakatud arendama terves maailmas ning praeguseks kasutatakse hüperspektraalset vaatlustehnoloogiat väga paljudel aladel alates meditsiinist, agronoomiast, sõjandusest, mineraloogiast, bioloogiast, riigikaitsest ja keskkonnauuringutest kuni kosmosetehnoloogiini (Vagni 2007). Seega on hüperspektraalkaamerate kasutusala väga lai ning erinevate kaamerate spektraaltundlikkuse alad katavad nii nähtava valguse, ultraviolettpiirkonna (UV), lähiiinfrapuna- (*near-infrared*, NIR) kui ka kaugema infrapunakiirguse (*infrared*, IR) valguspeegelduse.

Militaarotstarbel on hüperspektraalkaamereid kasutatud juba alates eelmise sajandi lõpust (Vagni 2007). Oma kõrge hinna ja keeruka ehituse tõttu

¹ Autorite soovil kasutatakse selles artiklis tekstisisest viitamist.

olid hüperspektraalkaamerad kuni viimase ajani tsiviilmaailmale enamasti kättesaamatud. Hüperspektraaluuringute eelkäijaks olid alates 1980. aastast kasutusele võetud multispektraaluuringud, mille puhul registreeriti kogu vaateväli vaid piiratud arvu lainepikkuste jaoks. Teaduskirjanduses muutusid hüperspektraaluuringud märgatavaks 2001. aastal, uus suurem publikatsioonide laine sai alguse aga aastatel 2010–2011.

Samalaadsete kaameratega tehakse näiteks mereseiret, kus hüperspektraalkaameraid kasutatakse naftareostuse avastamiseks (Fingas 2014). Niisiis võib kaameraid kasutada saastetundliku keskkonna muutuste uurimisel, maastiku kaardistamisel või looduskatastroofide kahjustuste hindamisel. Kogutud maastikukujutiste arhiiv võimaldab võrrelda ja mõõta suurt hulka muutusi, mis on aset leidnud mingis huvipakkuvas piirkonnas (Lee 2015). Looduse skaneerimisel on võimalik kaamera abil tuvastada taimede klorofüllisisaldust ja seeläbi õhust seirata, kas vili on valmis, milline on metsa seisukord (Clevers 2012) või kas meres vohab vetikaid (Casal 2012).

Bioloogias ja keemias saab selliseid kaameraid kasutada ühe või teise aine hulga äratundmiseks (Studer 2012; Kamruzzaman 2012). Hüperspektraalkaameraga saab tuvastada ja eristada kõikvõimalikke materjale (Bue 2010) ja vedelikke, samuti seirata veereostust (Zang 2012) ning otsida metsa kadunud inimesi (Uto 2012). Kui helikopteriga üle metsa lennata, suudab hüperspektraalkaamera otsitava inimese looduse taustal riiete värvi järgi edukalt eristada. Kui on soov kindlaks teha, kas kaks väga sarnast ainet on identsed, siis tuleb need vaid kaameraga arvutisse skaneerida ja ekraanil on selgesti näha, kas tegemist on sama materjaliga või mitte. Tööstuses on võimalik teha kvaliteedikontrolli, võrrelda erinevate materjalide või vedelike omadusi (Dale 2013).

Ka sõjanduses kasutatakse hüperspektraaltehnoloogiat väga erinevatel eesmärkidel. Kuigi tuntuim kasutusala on hüperspektraalsete kujutiste kasutamine vastaste avastamiseks ja äratundmiseks (Lucey 2012; Schaum 2017), on hüperspektraalkaameraid NATO tegevustes kasutatud juba selle sajandi alguses väga paljudes valdkondades (Vagni 2007):

- 1) lahinguvälja seire ja info kogumine;
- 2) pettesüsteemide ja sihtmärkide eristamine;
- 3) vastase moondamismetoodika võime vähendamine;
- 4) eelhoiatuse saamine kaugmaarakettide kohta;
- 5) kosmoseseire teostamine;
- 6) massihävitusrelvade tuvastamine;
- 7) maamiinide tuvastamine.

Hiljutised hüperspektraalvaatlusega uuringud NATO-s aitavad tuvastada keemilisi, bioloogilisi ja radioaktiivseid ohte (Benoist 2016), tuvastada sihtmärke nüüdisaegsete analüütiliste meetoditega (Schaum 2017) ning korraldada isegi arvutiimitatsioone ehk nn tõsiseid mängu (*Serious Games*), mille eesmärk on koolitada sõdureid erinevate hüperspektraalsensorite kasutamise valdkonnas (Holmes 2016). Viimaseid ja suuremamahulisemaid ettevõtmisi hüperspektraaltehnoloogia valdkonnas käsitleb hetkel NATO STO SCI-295 töögrupp (Winkelmann 2017). Selle töögrupi eesmärk on standardida erinevate hüperspektraalsete taustade mõõtmine ja kategoriseerimine. Töögrupp on konstateerinud, et hetkel on tehisobjekte looduslikul taustal hüperspektraalkaamerate abil avastada liiga lihtne (Winkelmann 2017) ning on vaja luua ulatuslikud andmebaasid erinevates välitingimustes mõõdetud loodusliku tausta kohta. Samuti uuritakse võimalusi kasutada hüperspektraalkaameraid nii mehitatud kui ka mehitamata lennukitel (Rosario 2017; Benoist 2016).

Igas armees on palju erinevat tehnikat, varustust, objekte ja inimesi – kõik need vajavad kaitset ja varjatust. Seejuures tuleb arvestada, et lahinguvälja seiratakse pidevalt erinevate sensoritega, mis teeb olukorra veelgi raskemaks. Kuigi käesoleva artikliga seotud katsetuste käigus mõõdeti erinevaid objekte (telgid, vormirõivad, sõidukid, sõjalaevad, looduskeskkond eri aastaagadel jms), valiti siinkirjeldatud uuringute põhiteemaks hüperspektraalsignatuuride esmane vaatlus Kaitseväe sõidukite jaoks.

Tuleb tõdeda, et sensortehnoloogilise võimega seire-, avastus-, tuvastus- ja identifitseerimissüsteemide olemasolu nüüdisaegse sõduri varustuskomplektis ei tee sõdurile määratud lahinguülesannete täitmist lihtsamaks. Nüüdisaegsed süsteemid on keeruka ehitusega ja nende kasutamist on vaja põhjalikult õppida. Tihtilugu on see keerukam kui ühe või teise relva tundmaõppimine. Seetõttu tuleb nende süsteemide kasutuselevõtmisel ümber hinnata ja täiustada nii väljaõppekavasid kui ka operatiivplaanide koostamise aluseid. Iga riigi sõjatööstus püüab olla oma konkurentidest ja vastastest võimekam, mistõttu peab tehnoloogiliste vahendite kasutamise eest vastutav isik objektide varjamisel ja moondamisel tundma mitte ainult enda kasutatavat seadet, vaid ka vastase kasutatavaid uusi sensortehnoloogilisi süsteeme, nende tehnilis-taktikalisi andmeid ja tööpõhimõtteid ning seda, kuidas keskkonnategurid neid mõjutavad.

Kui nüüdisaegsed seire-, avastus-, tuvastus- ja identifitseerimissüsteemid on vägagi täpsed laboritingimustes, siis lahinguväljal välitingimustes häirivad neid järgmised keskkonnategurid:

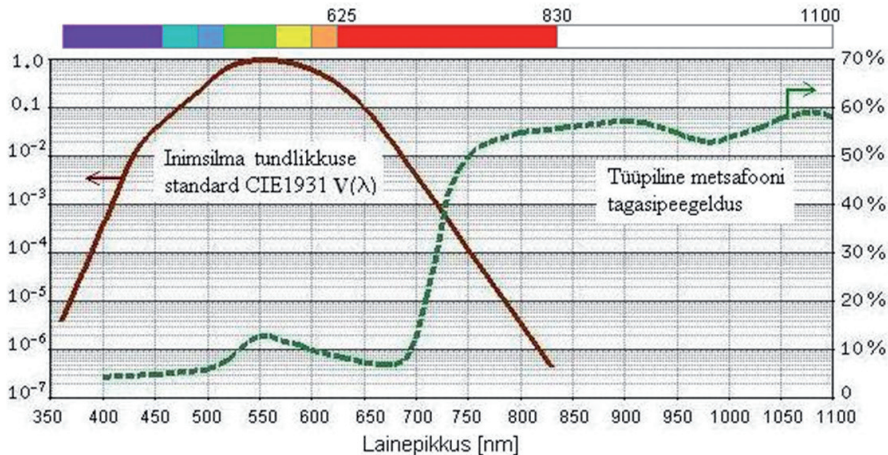
- 1) ilmastikutingimused (sh niiskuskahjustused);
- 2) optilised ja elektromagnetilised kaod, kõrvalekalded ja häiringud;
- 3) akustilised kaod ja hälbed;
- 4) keskkonnasaaste.

Mida täpsema ning keerukama ülesehitusega süsteemi kasutatakse, seda rohkemate keskkonnateguritega tuleb väljaõppel arvestada.

20. sajandil olid objektide varjamise, moondamise ning pettegevuse tuvastamiseks ja avastamiseks kasutatavad sensorsüsteemid enamasti kõrglahutusvõimega optilised sensorid, infrapunakaamerad ja passiivsed ning aktiivsed kaugseiresüsteemid (nt radarid). Käesoleva sajandi alguses on tuvastusvahendite kättesaadavus järsult kasvanud. Arvutitega täiendatud ehk küberfüüsikaliste sensorsüsteemide kasutuselevõtu tõttu on hüppeliselt kasvanud kättesaadava sensorinfo maht ja keerukus, mis on oluliselt raskendanud objektide varjamist ja eelkõige pettegevust. Paljud sensorsüsteemid on muutunud odavamaks, tavaliste binoklite kõrvale on ilmunud täpsemad ja võimekamad multi- ja hüperspektraalsed vaatlusseadmed ning kasutatavate radarsüsteemide kõrvale on tulnud kasutusse digiradarid. Objektide (ja ka inimeste) tuvastamise juures võimaldavad targad sensorsüsteemid näha täpsemat ristlõikekujutist ja kontuure. On võetud kasutusele soojus-, heli- ning valgus-signatuurid ja erinevad imitatsioonitarkvara lahendused, mis võimaldavad varjatud objekte lihtsamini tuvastada. Sellega seoses on tekkinud vajadus kohandada ümber sõjapidamiskunst (siinjuures ka varjamine, moondamine ja pettegevus). Tulevikusõdur ei pea oskama ennast mitte ainult puu või kivi taha ära peita, vaid peab ka teadma ja oskama kasutada erinevaid nutilahendusi, et ennast või objekti paremini vastase sensor- ja seiresüsteemide eest varjata. Selleks aga, et varjamine, moondamine ja pettegevus hästi õnnestu, tulebki teada, milliste seiresüsteemidega saab teda jälgida ja kuidas mõjutavad keskkonnatingimused sensorite võimet. Teades, milliste tuvastussüsteemidega sõdurit jälgitakse ja millised on keskkonnatingimused tema ümber, on võimalik ette valmistada selliseid petteobjekte ja -positsioone, mida on tänapäeva sensor- ja seirevahenditega raskem vaadelda, avastada, tuvastada ja ka identifitseerida.

Et täpsemalt liigitada siinkäsitletud nähtava ja lähiinfrapunakiirguse piirkondi, tuleb kõigepealt lähtuda inimesilma standardiseeritud tundlikkuse kõverast. Joonisel 1 on näidatud standardvaatleja silma tundlikkuse ala, mis paikneb spektri vahemikus 360–830 nm. Tehniliselt põhineb see vahemik standardil CIE1931 (Oleari & Simone 2015). See on ametlik nähtava valguse piirkond hea valgustuse korral, kui inimese silmas töötavad kolvikesed

(ingl *cones*). Öönägemise korral, kui valgustus on nõrk (täielik üleminek nn *scotopic*-piirkonnale $<0.001 \text{ cd/m}^2$ ehk ca 1% lumepinna peegeldusest täiskuu valguse korral), inimene värve ei näe ja töötavad kepikesed (ingl *rods*). Sel juhul tuleks kasutada standardit CIE1951 (Oleari & Simone 2015).

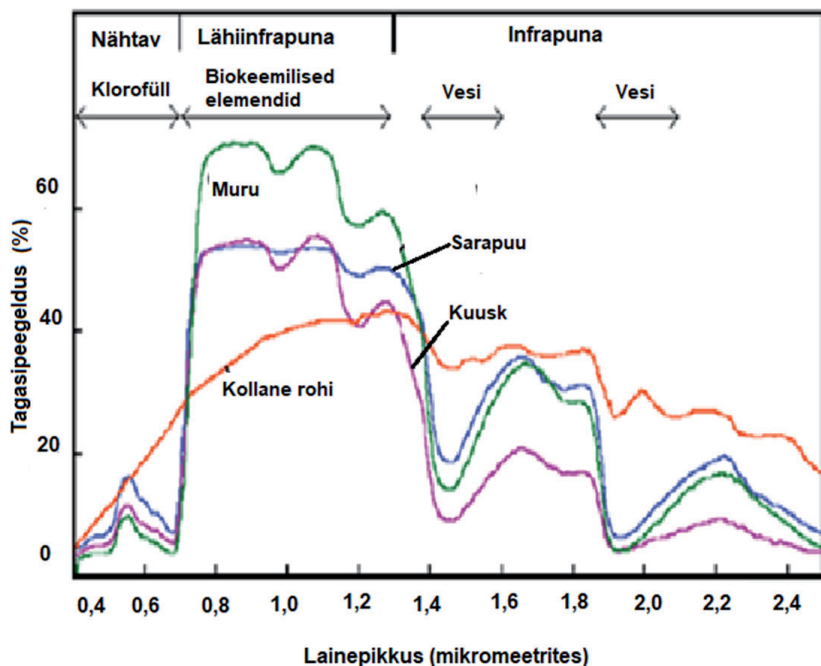


Joonis 1. Inimsilma tundlikkuse standard ja tüüpiline metsafooni tagasispeegeldus. Lisatud on ka standardsete põhivärvuste spektrialad. Joonis näitab, et punases alas inimsilma tundlikkus langeb 5 suurusjärku, kuid loodusliku tausta tagasispeegelduse signatuur teeb järsu hüppe üles. Tuleb rõhutada, et inimsilm ei tuvasta enam peaaegu üldse värvimuutusi punases lainepikkuste alas üle 625 nm, kus valgusspektreid eristada on võimalik vaid tehnoloogiliste abivahenditega, näiteks hüperspektraalkaameraga.

Joonise 1 selgituseks tuleb märkida, et vastavalt standardile CIE1931 on inimsilma kokkulepitud tundlikkuvahemik 360–830 nm (Oleari & Simone 2015). Joonist on täiendatud lähiinfrapunaalaga kuni 1100 nm. See piir on valitud seetõttu, et suhteliselt odavad ränil (keelutsoon 1.12 eV) põhinevad laialdaselt kasutatavad tänapäevased digikaamerad (fototundlikud elemendid CCD- või MOS-tehnoloogia alusel) võimaldavad ilma suuremate probleemideta jäädvustada just seda lähiinfrapunakiirguse ala (Magnan 2003).

Tegelikult on nägemiskõvera servaaladel tundlikkus väike: 1% tundlikkustasemel on reaalne inimsilmaga vaadeldav vahemik 430–680 nm. Vaid selles suhteliselt kitsas vahemikus näeb inimsilm värvide muutusi ehk suudab töötada spektromeetrina. Tuleb rõhutada, et pikematel lainepikkustel kui 625 nm näeb inimsilm kõiki värve punasena ja pikematel lainepikkustel kui ca 680 nm muutub punase tundlikkus väga nõrgaks, mille reaalses keskkonnas varjutab kergesti kollane, roheline või sinine valgus.

Loodusfooni ja metsafooni tagasipeegeldumisspektrite uuringutele on pühendatud palju teadustöid, mis on seotud metsa- ja põllumajanduse vajadustega (Pisek 2018). Joonisel 2 on esitatud mõned tüüpilised tagasipeegeldumisspektri näited leht- ja okasmetsa kohta (Campbell 2011). Militaarobjektide (sh sõidukite) varjestamise juures on esmatähtis jälgida kooskõla loodusfooniga. Loodusfoonis on kõige olulisem nii lehtmetsade kui ka okasmetsade puhul tagasipeegeldumise järsk kasv vahemikus 600 kuni 700 nm (vt joonised 1 ja 2). Selle inimsilma nõrga punasetundlikkuse tsoonis asuva loodusfooni 700 nm astme tajumisega on inimvaatlejal suured probleemid ning ilma abistavate lähiinfrapunakaamerateta on seda peaaegu võimatu tajuda. Samal ajal roheline värvuse piirkonnas paikneva suhteliselt tagasihoidliku tagasipeegeldumise tipu (joonis 2) detekteerib inimsilm väga edukalt. Siit võib järeldada, et vastavate seadmetega varustatud vaatleja võib suhteliselt lihtsalt kindlaks teha tehisobjekte, mis erinevad leht- ja okasmetsade loodusfoonist, just selle 700 nm astme ümbruses.



Joonis 2. Tüüpilised näited loodusfooni tagasipeegeldumisspektritest (Campbell 2011)

Üldistades võib öelda, et punase valguse ja lähiinfrapunakiirguse diapasoonis on inimvaatleja jaoks kolm kriitilist piirkonda:

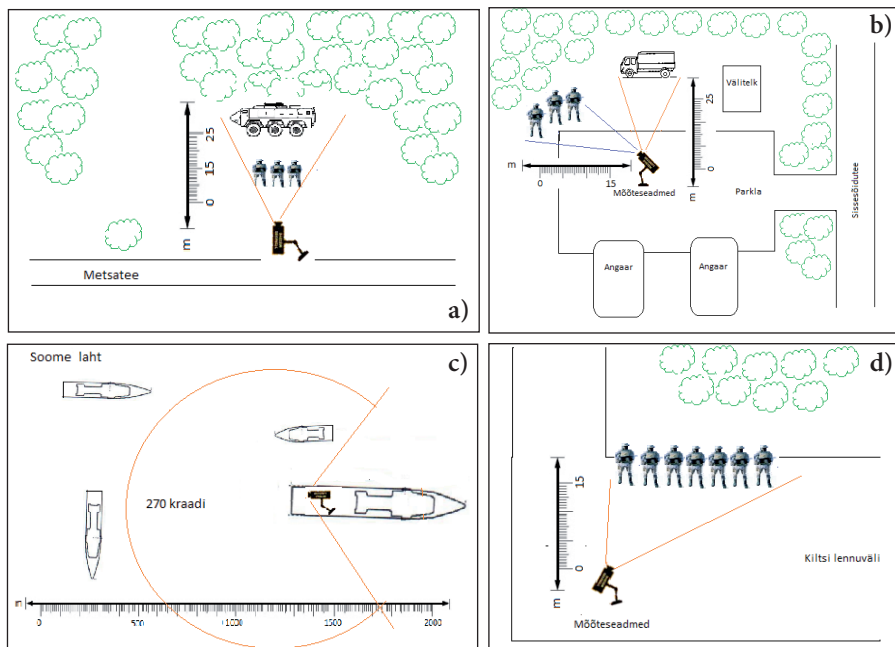
- a) piirkond 625 kuni 680 nm, milles vaatleja näeb kõiki lainepikkusi punasena;
- b) piirkond 680 kuni 830 nm, milles vaatleja näeb kõiki lainepikkusi punasena väga nõrgalt;
- c) piirkond 830 kuni 1100 nm, mida inimvaatleja ei näe, kuid nüüdisaegsed ränil põhinevad odavad laiatarbekaamerad võivad vaadelda suuremate probleemideta.

Järgnevalt vaatleme juba konkreetsemalt nähtava valguse ja lähiinfrapuna-piirkonda 400–1700 nm, kasutades firma Resonon hüperspektraalkaameraid Pika II ja Pika NIR. Teeme järeldusi loodusfooni ja tehisobjektide signatuuride ristumiskohtade kohta. Pöörame tähelepanu loodusfooni tagasipeegelduse 600–700 nm astmele, kus loodusfooni tagasipeegeldus algul klorofüllil ja biokeemilise koostise spetsiifika tõttu järsult kahaneb ja siis jälle kasvab vastupidiselt tehisobjektide tagasipeegeldusintensiivsusele, mis sujuvalt kahaneb. Niimoodi tekib iseloomulik ristumisala, mis võimaldab eristada tehisobjekte ümbritsevast looduskeskkonnast.

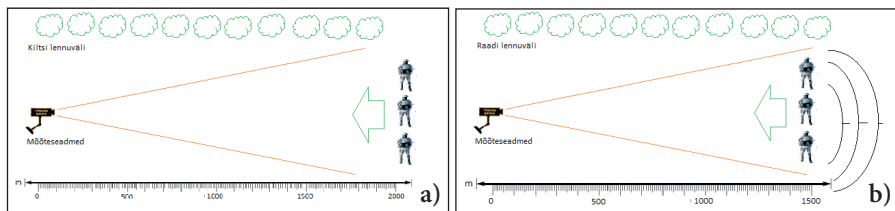
Joonise 2 täpsustuseks märgime, et tänu klorofüllile, biokeemilistele ühenditele ja veele on loodusfoonis igal taimel oma unikaalne signatuur, mis muutub taime eluaja jooksul ning mida mõjutavad aastaajad ja taimestiku seisund. Seega, erinevalt laborikeskkonnast erineb looduslik taust alati kas rohkem või vähem.

3. Kasutatud metoodika ja töövahendid

Aastatel 2015–2017 tehti koostöös Kaitsevæe, Kaitseliidu ja Tallinna Tehnikaülikooliga 10 välikatset erinevatel Kaitsevæe suurõppustel ja eriväljasõitudel, kus muutuva keskkonna tingimustes jälgiti kaitseotstarbelisi objekte hüperspektraalselt, lähiinfrapuna- ja öövaatluskaameratega, termokaameraga ja akustiliselt. Mõõtmiste eesmärgiks oli koguda andmeid, selgitada välja Kaitsevæe objektide signatuurid ja omadused ning leida parimad lahendused objektide varjamiseks. Erinevates testides tehti ülesvõtteid nii Kaitsevæe relvadest, vormiriietusest, tehnikast kui ka statsionaarsetest objektidest. Ühtlasi vaadeldi ka, kuidas pidevalt muutuvad keskkonnatingimused ühte või teist sensorit mõjutavad. Välisvaatluste skeemid on esitatud joonistel 3 ja 4.



Joonis 3. Kaitseväe kaitseotstarbeliste objektide välikatsete skeemid. Kaks ülemist osajoonist näitavad inimeste ja sõidukite vaatlust metsafooni taustal, osajoonis all vasakul ilmestab vaatlusi merel ja osajoonis all paremal inimesi lennuväljal metsa taustal.



Joonis 4. Liikuvate sõdurite vaatlused pikalt distantsilt (1500 ja 2000 m)

Katsetel jälgiti seisvaid objekte lühikeselt distantsilt (joonis 3a, b, d) ning liikuvaid Kaitseväe varustuses inimesi öösel ja päeval pikemalt distantsilt (joonis 4).

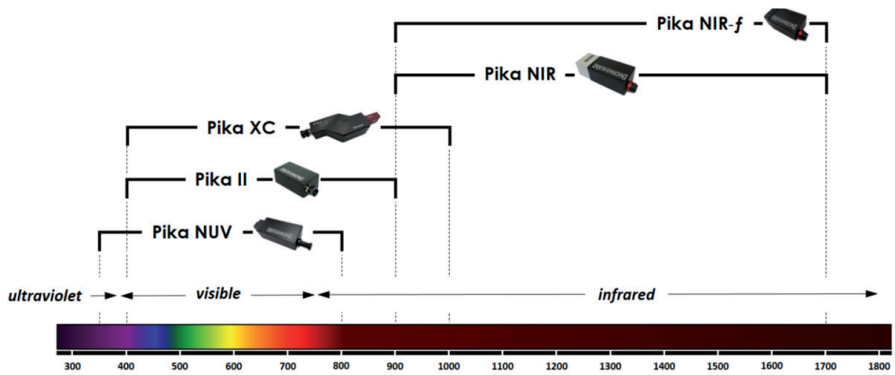
Tehtud katsed kinnitasid üldjoontes militaartöögruppide varasemaid tulemusi (Vagni 2007) ning tõid välja olulisi karakteristikuid objektide omaduste kohta, millest võib olla kasu nii uute sensorite väljatöötamisel kui ka elavjõu ja objektide varjamisel.

Katsete põhitöövahenditeks olid Resonon INC (<https://resonon.com/>) hüperspektraalkujutisi skaneerivad kaamerad PIKA II ja PIKA NIR. Resonon INC on välja töötanud mitmeid erineva võimega kaameraid. Nende hulgast on Tallinna Tehnikaülikool hankinud kaamerad Pika II ja Pika NIR, mille põhiandmed on esitatud joonistel 5 ja 6.

Kaamera	Spektraal- ulatus	Lainepikkus- väärtuste arv	Vertikaal- suunaliste pikslite arv	Horisontaalsuunas mõõtmiste arv sekundis
 Pika II	400–900 nm	240	640	145
 Pika NIR	900–1700 nm	145	320	180

Joonis 5. USA firma Resonon INC (<https://resonon.com/>) hüperspektraalkaamerate Pika II ja Pika NIR tehnilised põhiandmed

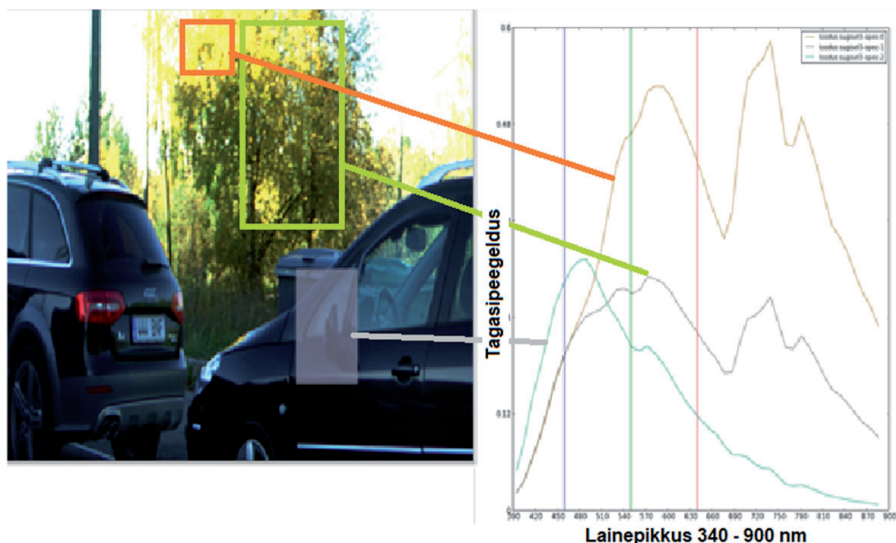
Pika II ja Pika NIR on kerged ja kompaktsed kaamerad, mida saab kasutada nii laboratoorseteks kui ka välimõõtmisteks (nii maapinnalt kui ka õhust). Resononi süsteemide lahendused on täielikult integreeritud ning ühendatud firma väljatöötatud tarkvara ja analüüsiprogrammidega.



Joonis 6. Firma Resonon INC (<https://resonon.com/>) kaamerate tööpiirkonnad lainepikkuste järgi

Hüperspektraalkaamera loob pildi, kus igal pikslil on täielik spektraalne teave. Piksel ehk pildielement on kujutise vähim kahemõõtmeline osa, mis kannab värvusinfot ja heledust. Pikslite ridade ja veergude kaupa korrastatud kahemõõtmeline kogum moodustab maatriksi ehk pikslimassiivi. Kaamerad mõõdavad vaatluspiirkonna iga piksli spektrit (Pika II 400–900 nm 240 lainepikkust ja Pika NIR 900–1700 nm 145 lainepikkust) ja kokkuvõtteks moodustub kolmemõõtmeline andmemassiiv, mida on võimalik analüüsida.

Kasutatud meetodika selgituseks on joonisel 7 esitatud hüperspektraalkaamera kujutis sõidukitest sügisese looduse taustal. Joonise parempoolne osa näitab graafikuid kolme signatuuriga, kus oranžiga tähistatud osa toob välja hästi valgustatud lehestiku keskmise spektri, kollase ruuduga märgitud osa lehtpuude keskmise spektri ja halli ruuduga tähistatud ala sõiduki signatuuri.



Joonis 7. Sõiduautode hüperspektraalkujutis sügisese looduse foonil. Kollase ristkülikuga on eristatud puude lehestiku ala, oranži ruuduga päikese käes olevad puulehed ja halli ristkülikuga osa sõidukist. Joonise parempoolne osa näitab väljavalitud kolme ala keskmisi tagasipeegeldumisspektreid. Keskmistamine toimub automaatselt Spektrononi tarkvara abil. Tarkvara lisatud sinine, roheline ja punane vertikaaljoon tähistavad vastavate värvide tüüpvaartusi vasakpoolse fotokujutise jaoks.

Joonisel 7 on hästi valgustatud lehestiku ja lehtpuudest fooni keskmise signatuuri kujud küllaltki sarnased, ainus erinevus on peegelduse intensiivsuses. Pildil oleva sõiduki signatuur on aga kogu ulatuses teistest eristatav. Kui

450 nm-ni sinises spektrialas suureneb sõiduki peegeldusintensiivsus samamoodi nagu ümbritsevate puude foon, siis alates lainepikkusest 500 nm langeb tagasipeegelduskõver kiiresti alla. Seega, kui kõik sõiduki pikslid keskmistada ja võrrelda looduskeskkonna pikslite keskmisega, on nendest moodustuvad signatuurid täiesti erinevad. Sellest järeldub, et kui on teada looduskeskkonna enda hüperspektraalsignatuur, siis selle taustal on tehisojekt selgelt eristatav. Kui täiendavalt on olemas andmebaas, kus tehisojektide signatuurid on talletatud, saab objekti ka hüperspektraalselt avastada, vaadelda, tuvastada ja identifitseerida.

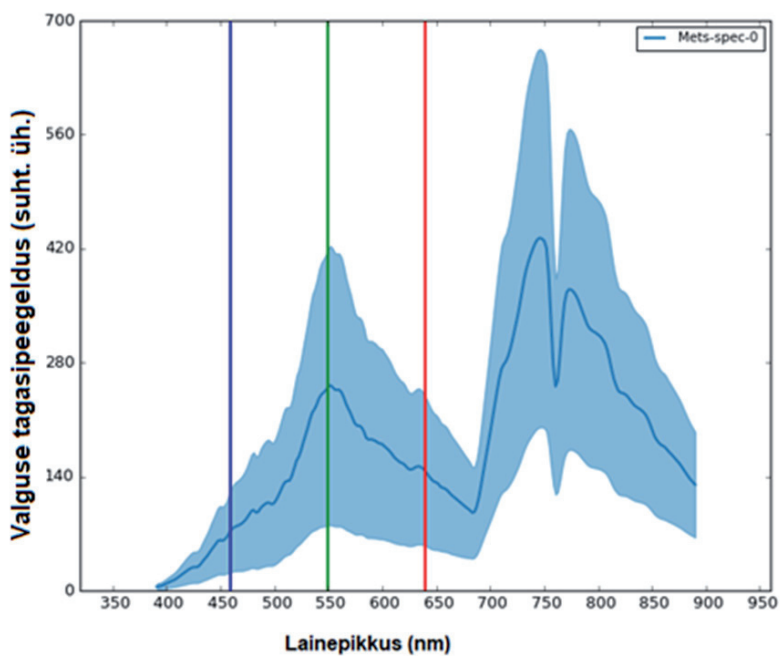
4. Kaitseväge sõidukite vaatluse tulemused

Joonisel 8 on näidatud Eestile iseloomulik metsafoon Kaitseväge keskpöügoonil. Näeme, et mõõdetud loodusfooni signatuur vastab eespool toodud joonistele 1 ja 2. Võrdlusnäitena on võimalik kasutada ka Resonon INC-i kodulehel (Resonon Downloads 2018) olevat hüperspektraalpilti USA Montana East Gallatini jõe looduskeskkonnast. Joonisel 8 esitatud loodusfooni üldsignatuur vastab küllalt hästi Resonon INC-i hüperspektraalpildile. Mõned erinevused tulenevad vaatleja geograafilisest asukohast, päikese asukohast taevast ning valguse intensiivsusest.

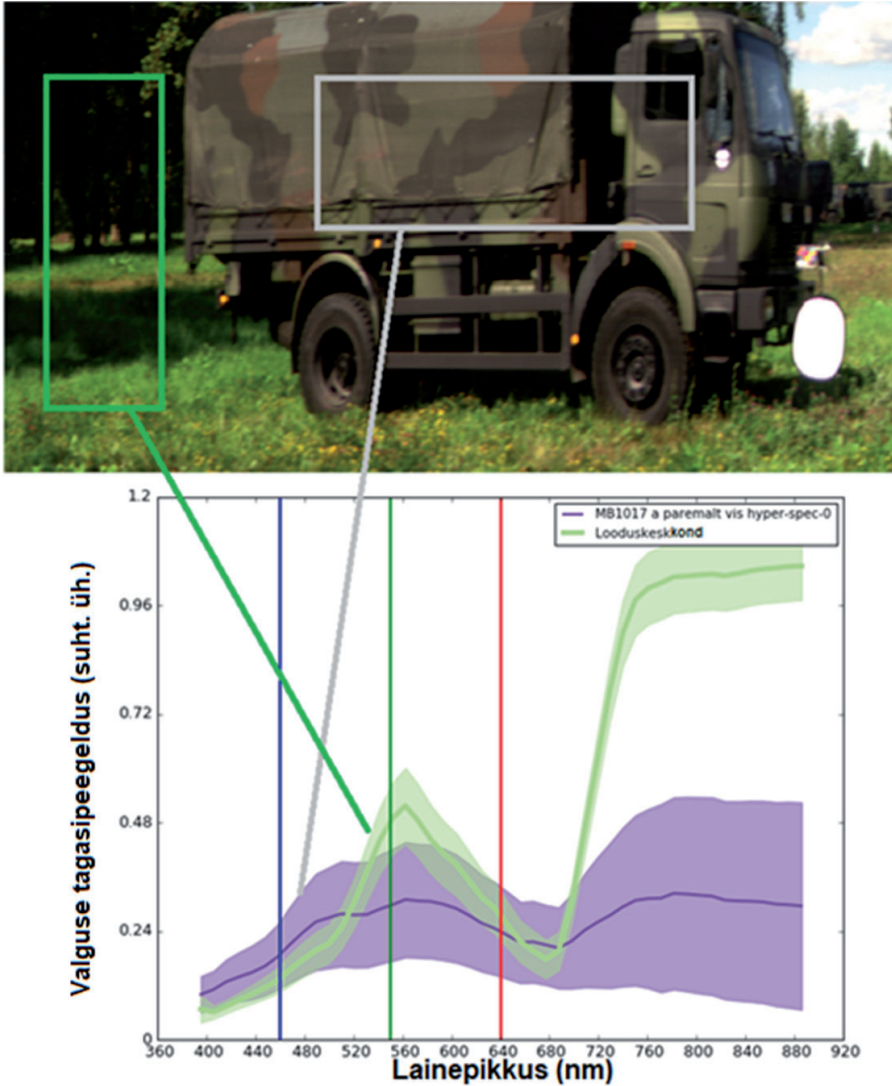
Joonisel 9 on analüüsitud kaitseotstarbelist objekti (veok Mercedes-Benz 1017A) looduskeskkonna taustal. Joonisel 10 on sama info esitatud teise sõiduki (Mercedes-Benz 250GB) kohta. Hüperspektraalvaatluse tulemuste alusel võib väita, et tehisojekti värvi nähtava valguse piirkonnas 600–700 nm saab selgelt eristada loodusfoonist, mille määrab taimestiku biokeemiline koostis (klorofüll).

Joonisel 10 on näidatud, kuidas kunstlike värvide abil koos hüperspektraaltehnoloogiliste abivahenditega saab esile tuua loodusfooni 700 nm hüppe, mida inimsilm ei näe.

Kõige kardinaalsem erinevus ilmneb punase värvi lainepikkuse alal 690 kuni 750 nm, kus looduskeskkonna heledusintensiivsus pärast langust järsult kasvab, aga sõiduki signatuur jätkub enam-vähem ühtlaselt mõõdetava ala lõpuni. Kui vastavas sagedusalas pole uuritava tehisojekti signatuuri varjamisega vaeva nähtud, suudab isegi vähe kogunud vaatleja tehisojekti hüperspektraalselt ülesvõttelt looduskeskkonna taustalt tuvastada. Paljud lisamõõtmised erinevate materjalide ja objektidega kinnitasid, et tehisojektid ei ole tõesti hüperspektraalselt mitte ainult loodusest eristatavad, vaid ka teoreetiliselt tuvastatavad, kui on ette valmistatud vastavate materjalide ja



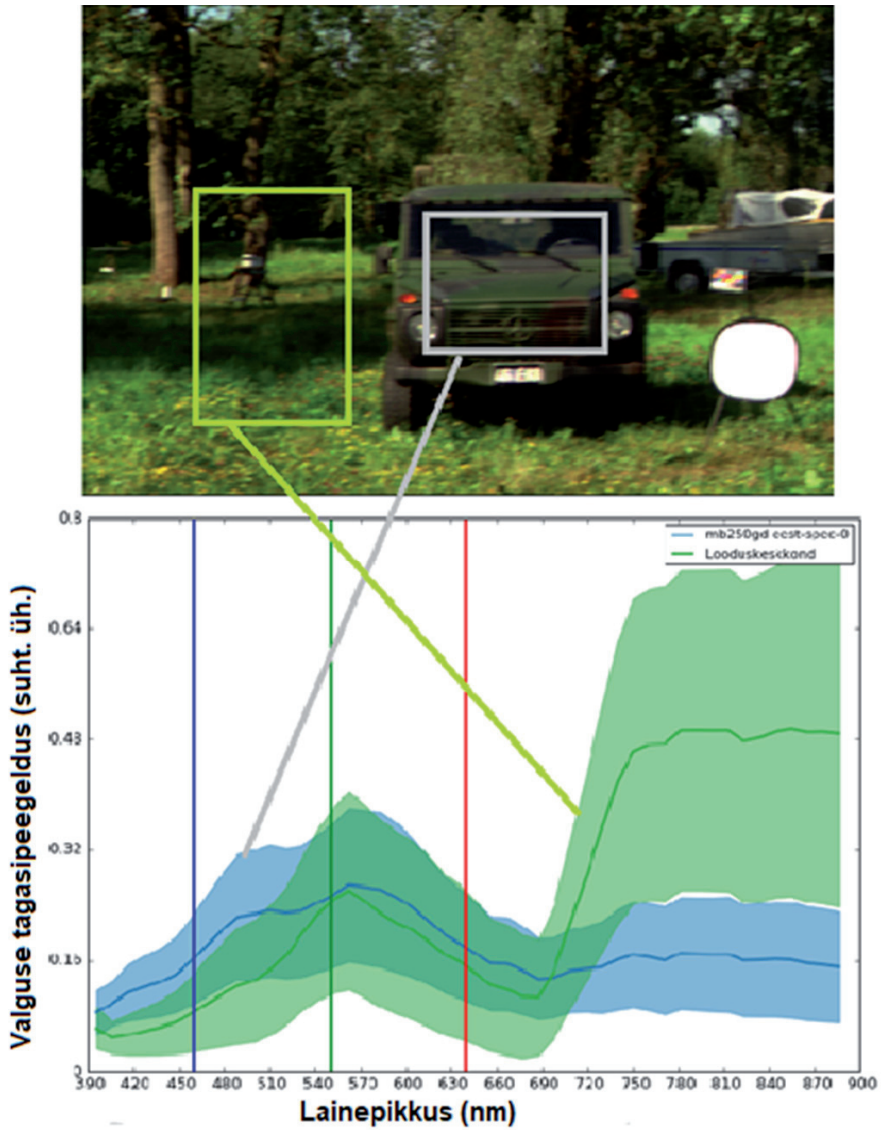
Joonis 8. Metsa kujutis Kaitseväge keskpõlvülgoonil (ülal) ja vastav metsa hüperspektraal-signatuur halli ristkülikuga tähistatud alalt (all). Joonise alumisel poolel on sinise joonega märgitud metsa keskmistatud signatuur ja heledam sinine ala kujutab erinevate pikslite hajuvuspiirkonda. Sinine, roheline ja punane vertikaaljoon tähistavad vastavate värvide tüüpväärtsi ülaltoodud fotokujutise jaoks.



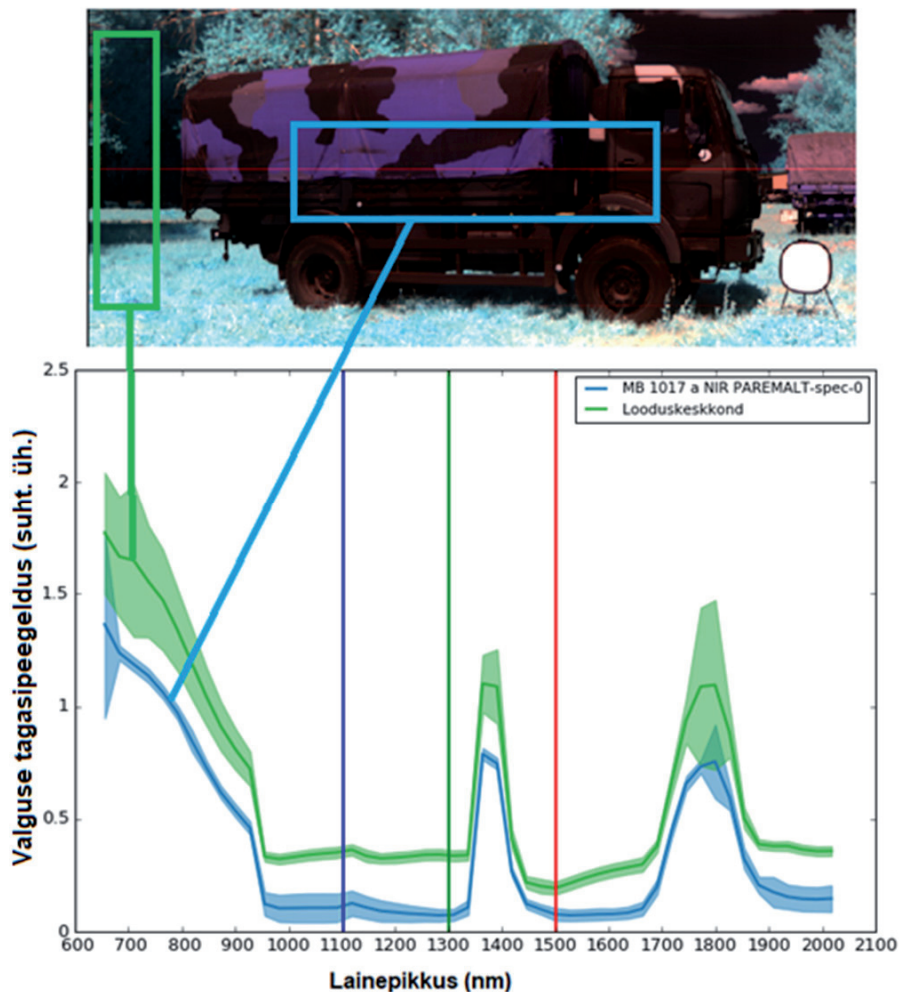
Joonis 9. Sõiduki MB1017A fotokujutis looduskeskkonnas (ülal) ja hüperspektraalsignatuurid äramärgitud piirkondade jaoks (all). Rohelise värviga on tähistatud looduskeskkonna ja sinise värviga sõiduki värvkatte hüperspektraalsignatuur. Näidatud on signatuuride keskväärtus ja pikslite hajumisala. Sinine, roheline ja punane vertikaaljoon tähistavad vastavate värvide tüüpväärtusi ülaltoodud fotokujutise jaoks.



Joonis 10. Infrapunadiapaseoni kunstlike värvide demonstratsioon. Kaitseväge veoki MB 1017 fotokujutis naturaalses värvides (sinine 460 nm, roheline 550 nm, punane 640 nm) ülal ja all sama veok kunstlikes värvides, kus kokkuleppeline punane on nihutatud 800 nm kohale. Nii on otseselt jälgitav loodusfooni 700 nm astme väga tugev ilmnenine kunstliku punase värvi kujul.



Joonis 11. Sõiduki MB 250GB fotokujutis looduskeskkonnas (ülal) ja hüperspektraalsignatuurid äramärgitud piirkondade jaoks (all). Rohelise värviga on välja toodud looduskeskkonna ja sinise värviga sõiduki värvkatte hüperspektraalsignatuur. Näidatud on signatuuride keskväärtus ja pikslite hajumisala. Sinine, roheline ja punane vertikaaljoon tähistavad vastavate värvide tüüpväärtsi ülaltoodud fotokujutise jaoks.



Joonis 12. Lähiiinfrapunakaameraga PIKA NIR kunstlikes värvides kujutatud sõiduki MB1017A fotokujutis looduskeskkonnas (ülal) ja hüperspektraalsignatuurid joonisel märgitud piirkondade jaoks (all). Rohelise värviga on tähistatud looduskeskkonna ja sinise värviga sõiduki värvkatte hüperspektraalsignatuur. Sinine, roheline ja punane vertikaaljoon tähistavad joonisel juba täiesti kunstlike kokkuleppeliste värvide lainepikkusi ülaltoodud fotokujutise jaoks.

objektide signatuuride andmebaas. Katsetused näitasid, et erinevus ei tulene mitte ainult värvide koostisest ja toonidest, vaid eelkõige asjaolust, et värvides puudub klorofüll ning vesi. Silmatorkav on tagasipeegelduse erinevus punases värvialas ligikaudu 700 nm juures, kus tänu klorofüllile ja vee olemasolule taimestiku tagasipeegeldus kasvab järsult ning ristub sõidukite värvispektriga, milles klorofüll puudub, mistõttu jääb tagasipeegelduse intensiivsus küllaltki ühtlaseks. Sellise suhteliselt lihtsa tehiseobjektide avastamise võimalusega peaks arvestama iga riik oma kaitsevõime tugevdamisel.

Toome ära mõned kaameraga Pika NIR registreeritud tulemused inimsilmale nähtamatu infrapunapiirkonna kohta. Joonisel 12, millel on esitatud hüperspektraalpilt lähiinfrapunalaainepikkuste kohta, on Kaitseväe objektide tagasipeegelduse spektraaltipud erinevalt joonistest 9 ja 11 paigutunud keskkonnaga samadele lainepikkustele (erinevused ilmnevad põhiliselt vaid tagasipeegelduse suhtelistes nivooes).

Joonisel 12 kujutatud infrapunakiirguse piirkonna 900 kuni 2000 nm kohta võib öelda, et pikaajaline militaartööstuse arendamine pärast Teist maailmasõda öövaatlusvõime ja soojade kehade infrapunakaamerate alal on andnud tulemust, kus Kaitseväe sõidukite värvid on valitud nii, et sõidukid oleksid raskesti avastatavad just selles lainepikkuste piirkonnas. Seni, kuni 700 nm piirkonna hüperspektraalkaamera ei ole iga vastase töövahendiks, on Kaitseväe sõidukite värvus peaaegu ideaalilähedane. Tehnoloogia on viimase kümne aastaga teinud tohutu hüppe ja isegi nutikad magistrandid demonstreerivad juba ülikoolide laborites sobivates lainepikkuste vahemikes töötavate multispektraalsete ja/või IR-kaamerate valmistamist (Bendig 2012).

5. Kokkuvõte

Tehtud katsed kinnitavad seisukohta, et tänapäevase hüperspektraaltehnoloogiaga varustatud vaatleja eest objektide varjamine ja moondamine (värvid, materjalid, kooslus) muutunud raskemaks. Selleks, et infoajastuga kaasa minna, tuleb hakata panustama vastava kaitsetehnoloogia väljatöötamisse.

Katsed näitavad, et kuigi infrapunakiirguse lainel alal vastavad Kaitseväe sõidukite värvid NATO standardite (4360, 2836, 4698 + NATO AEP 59–65) nõuetele, on sõidukid nähtava valguse lainepikkuste äärealal (700 nm ümbruses) hüperspektraalkaameraga selgesti eristatavad ja ka potentsiaalselt tuvastatavad.

Artiklis esitatud mõõtmistulemused osutavad, et peamist tähelepanu tuleb pöörata lainepikkustele 520–750 nm, kus klorofüll ja teiste looduslike biokeemiliste ühendite puudumise tõttu eristuvad sõidukite värvitoonid selgelt loodusfoonist. Selle põhjal võib teha järelduse, et hüperspektraalinfot andvad sensorid võivad muutuda vägagi võimsateks tööriistadeks, millega saab kauge vahemaa tagant tuvastada nii sõidukeid kui ka sõdureid, sest vormirõivad ei sisalda samuti klorofüll ja vett.

Kokkuvõtteks võib väita, et Kaitsevägi vajab paremat moondamise ja varjamise metoodikat, mis kaitseks sõidukeid, militaarobjekte ja inimesi hüperspektraalsete seiresüsteemide eest. Loodusfooni jäljendamiseks on jätkuvalt hea kasutada looduslikke komponente. Selleks, et saavutada moondamise maksimaalne tõhusus ja töötada välja uusi varjamineetodeid, on aga kindlasti vaja hüperspektraalvõimet, sest vastavate abinõude kasutamata jätmisel on potentsiaalsel hüperspektraaltehnoloogiliste abivahenditega varustatud vastasel lihtne Kaitseväe objekte ja inimesi seiretegevusega nii märgata kui ka vaadelda, avastada, tuvastada ning isegi identifitseerida.

Kirjandus

- Bendig, J.; Bolten, A.; Bareth, G.** 2012. Introducing a low-cost mini-UAV for thermal- and multispectral-imaging. – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 39, pp. 345–349.
- Benoist, K. et al.** 2016. Phenomenology and Exploitation of Thermal Hyperspectral Sensing. NATO Science and Technology Organisation Technical Report (STO-TR-SET-190).
- Bue, B. D.; Merényi, E.; Csathó, B.** 2010. Automated Labeling of Materials in Hyperspectral Imagery. – IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, No. 48(11), pp. 4059–4070.
- Campbell, J. B.; Wynne, R. H.** 2011. Introduction to Remote Sensing. 5th edition. The Guilford Press.
- Casal, G.; Sánchez-Carnero, N.; Domínguez-Gómez, J. A.; Kutser, T.; Freire, J.** 2012. Assessment of AHS (Airborne Hyperspectral Scanner) sensor to map macroalgal communities on the Ria de Vigo and Ria de Aldan coast (NW Spain). – Marine Biology, Vol. 159 (9), pp. 1997–2013.
- Clevers, J. G.; Kooistra, L.** 2012. Using Hyperspectral Remote Sensing Data for Retrieving Canopy Chlorophyll and Nitrogen Content. – IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Vol. 5(2), pp. 574–583.
- Dale, L. M.; Thewis, A.; Boudry, C.; Rotar, I.; Dardenne, P.; Baeten, V.; Pierna, J. A.** 2013. Hyperspectral Imaging Applications in Agriculture and Agro-Food

- Product Quality and Safety Control: A Review. – *Applied Spectroscopy Reviews*, Vol. 48(2), pp. 142–159.
- Fingas, M.; Brown, C.** 2014. A Review of Oil Spill Remote Sensing. – *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 83(1), pp. 9–23.
- Grahn, H.; Geladi, P.** (eds). 2007. *Techniques and Applications of Hyperspectral Image Analysis*. John Wiley & Sons.
- Holmes, B.; Harkrider, S.** 2016. Using Serious Games to Enhance Recognition of Combatants Training for Electro Optic and Infrared (EO/IR) Sensors. NATO Science and Technology Organisation Technical Report (STO-MP-MSG-133).
- Kamruzzaman, M.; El Masry, G.; Sun, D. W.; Allen, P.** 2012. Non-destructive prediction and visualization of chemical composition in lamb meat using NIR hyperspectral imaging and multivariate regression. – *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, No. 16, pp. 218–226.
- Lee, C. M.; Cable, M. L.; Hook, S. J.; Green, R. O.; Ustin, S. L.; Mandl, D. J.; Middleton, E. M.** 2015. An introduction to the NASA Hyperspectral InfraRed Imager (HyspIRI) mission and preparatory activities. – *Remote Sensing of Environment*, No. 167, pp. 6–19.
- Lucey, P. G.; Wood, M.; Crites, S. T.; Akagi, J.** 2012. A LWIR hyperspectral imager using a Sagnac interferometer and cooled HgCdTe detector array. – *Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery*. International Society for Optics and Photonics, Vol. 8390, p. 83900Q.
- Magnan, P.** 2003. Detection of Visible Photons in CCD and CMOS: A Comparative View. – *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 504(1–3), pp. 199–212.
- Mishra, P.; Asaari, M. S.; Herrero-Langreo, A.; Lohumi, S.; Diezma, B.; Scheunders, P.** 2017. Close Range Hyperspectral Imaging of Plants: A Review. – *Biosystems Engineering*, No. 164, pp. 49–67.
- Oleary, C.** 2016. *Standard Colorimetry: Definitions, Algorithms and Software*. John Wiley & Sons.
- Pisek, J.** 2018. *Forest Background*. Elsevier.
- Resonon Downloads** 2018. <<https://downloads.resonon.com/categories/1/>> (12. 02. 2018).
- Rosario, D.; Borel, C.; Conover, D.; McAlinden, R.; Ortiz, A.; Shiver, S.; Simon, B.** 2017. Small Drone Field Experiment: Data Collection & Processing. – arXiv.org, preprint arXiv:1711.10693.
- Schaum, A.** Advanced Methods of Automatic Target Recognition Based on Spectral Sensing. NATO Science and Technology Organisation Technical Report (STO-MP-SET-241).
- Studer, V.; Bobin, J.; Chahid, M.; Mousavi, H. S.; Candes, E.; Dahan, M.** 2012. Compressive fluorescence microscopy for biological and hyperspectral imaging. – *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 109(26), pp. E1679–1687.

- Zang, W.; Lin, J.; Wang, Y.; Tao, H.** 2012. Investigating small-scale water pollution with UAV Remote Sensing Technology. – IEEE World Automation Congress (WAC), pp. 1–4.
- Uto, K.; Kosugi, Y.; Murase, T.; Takagishi, S.** 2012. Hyperspectral band selection for human detection. – IEEE 7th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM), pp. 501–504.
- Vagni, F.** 2007. Survey of Hyperspectral and Multispectral Imaging Technologies (Etude sur les Technologies d'imagerie hyperspectrale et multispectrale). NATO Technical Report. Nato Research and Technology Organization, Neuilly-Sur-Seine (France) (TR-SET-065-P3).
- Winkelmann, M.** 2017. Spectral Characterization of Natural Backgrounds. – Target and Background Signatures III. International Society for Optics and Photonics, Vol. 10432, p. 1043202.

MARTIN JÜRISE, MSc

Tallinna Tehnikaülikooli (TalTech) mehaanika ja
tööstustehnika instituudi doktorant-nooremteadur

Dr ANDRES UDAL

Tallinna Tehnikaülikooli (TalTech)
tarkvarateaduse instituudi vanemteadur

JAANUS KAUGERAND, MSc

Tallinna Tehnikaülikooli (TalTech)
tarkvaraarenduse instituudi doktorant-nooremteadur