



Tuulivoimaloiden vaikutus valvontasensoreihin

Infrapunavaikutukset

14.09.2011

Kirjoittajat: Markku Sipilä

Versio 1.1

Raportin nimi Infrapunavaikutukset	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Energiateollisuus ry, Niina Honkasalo, PL 100, Fredrikinkatu 51-53 B, 00101 Helsinki, puh. 09 5305 2205, niina.honkasalo@energia.fi	Asiakkaan viite
Projektin nimi Tuulivoimaloiden vaikutus valvontasensoreihin	Projektin numero/lyhytnimi 70477
Raportin laatija(t) Markku Sipilä	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 30
Avainsanat tuulivoima, infrapuna	Raportin numero VTT-R-06457-11
Tiivistelmä <p>Raportissa arvioidaan tuulivoimaloiden vaikutukset sellaisten infrapunasensoreiden toimintaan, joita Puolustusvoimat mahdollisesti voisi käyttää ilmatilan valvonnassa. Arvio perustuu julkisista lähteistä saatuihin tietoihin infrapunasensoreiden ominaisuuksista sekä fysikaalisiin perusteisiin nojaavaan päättelyyn. Siinä ei ole käytetty eikä sitä varten ole saatu Puolustusvoimilta salassa pidettävää tietoa mahdollisesti käytössä olevien infrapunasensorien ominaisuuksista tai sijoituspaikoista. Raportissa selvitetään tuulivoimaloiden mahdollinen häiritsevä vaikutus kohteen havaitsemiseen infrapuna-alueella sekä voimaloiden oma infrapunahäeräte. Tarkoituksena on luoda edellytykset yksittäisen tuulivoimahankkeen arviointiin, niin että Puolustusvoimille voidaan antaa tällä osa-alueella riittävät tiedot mahdollistamaan kannanotto kyseiseen tuulivoimahankkeeseen.</p>	
Luottamuksellisuus	Julkinen
Espoo 14.09.2011 Laatijat	Tarkastaja
	Hyväksyjä
VTT:n yhteystiedot VTT, Markku Sipilä, PL 1000, 02044 VTT, puh. 040 500 3463, s-posti markku.sipila@vtt.fi	
Jakelu Projektin ”Tuulivoimaloiden vaikutus valvontasensoreihin” johtoryhmä	
<p style="text-align: center;"><i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i></p>	

Alkusanat

Tämä selvitys liittyy Teknologian tutkimuskeskus VTT:ssä käynnissä olevaan tutkimukseen ”Tuulivoimaloiden vaikutus valvontasensoreihin”. Tutkimuksen tilaaja on Energiateollisuus ry, jonka kautta sitä rahoittavat Työ- ja elinkeinoministeriö, alan yritykset ja Metsähallitus. Tässä raportissa kuvataan menetelmiä infrapunavaikutusten arviointiin. Näitä menetelmiä käytetään tarvittaessa yksittäisen tuulivoimahankkeen vaikutusten selvittämiseen.

Espoossa 14.9.2011

Markku Sipilä
Tutkimusprofessori
Projektin päällikkö

Sisällysluettelo

Alkusanat	2
1. Johdanto	4
2. Tutkimuksen tavoite, rajaukset ja menetelmät	4
3. Infrapunasensorien fysikaaliset perusteet.....	5
3.1 Kappaleiden säteily.....	5
3.2 Ilmakehän läpäisyominaisuudet infrapuna-alueella	6
3.3 Sensorijärjestelmän ominaisuuksia.....	8
4. Voimaloiden infrapunaherätteeseen vaikuttavia tekijöitä	10
Havaintoetäisyys.....	14
5. Voimaloiden infrapunaheräte ilmapalvontasensorien kannalta.....	19
5.1 Vaikutusten yleinen luonne	19
5.2 Tuulivoimaloiden itsensä aiheuttamat havainnot	20
5.3 Häirintävaikutus todellisten maalien havaitsemiseen	20
Kulma-alue.....	23
Havaitsemistodennäköisyys vaikutusalueella.....	24
Vaikutusalue korkeussuunnassa.....	26
Tuulivoimapuiston vaikutus.....	28
Taktiset vaikutukset.....	28
6. Yhteenveto.....	28
7. Johtopäätökset.....	30
Lähdeviitteet.....	30

1. Johdanto

Kysymys tuulivoimaloiden vaikutuksesta ilmavalvontajärjestelmien toimintaan on tullut ajankohtaiseksi tuulivoimapuistojen yleistyttyä viime aikoina nopeasti Suomessa. Erityistä huolta yleistyvät tuulivoimalat aiheuttavat ilmavalvonnalle, jonka järjestelmille tuulivoimalat edustavat suuria kohteita, jotka varjostavat varsinaisia maaleja ja näkyvät itse tutkassa ja muissa järjestelmissä. Tuulivoimala on sijaintinsa kannalta staattinen kohde, jonka rakenne kuitenkin muuttuu jatkuvasti ajan ja sääolosuhteiden funktiona, noudattaen tiettyä periodisuutta ja tilastollista jakaumaa. Tuulivoimalan koko ja lapojen liike on hankala tekijä erityisesti liikkuvia maaleja tunnistaville tutkille.

Ylivoimainen pääosa tämän tutkimuksen työmäärästä kohdistuu tutkavaikutusten arviointiin. On myös syytä rajoitetusti tarkastella muita vaikutuksia. Infrapunasensoreita voidaan ajatella käytettäväksi ilmavalvonnassa täydentämässä tutkan antamaa tilannekuvaa, siksi niihin kohdistuvia vaikutuksia on syytä tarkastella myös.

2. Tutkimuksen tavoite, rajaukset ja menetelmät

Raportissa arvioidaan tuulivoimaloiden vaikutukset sellaisten infrapunasensoreiden toimintaan, joita Puolustusvoimat mahdollisesti voisi käyttää ilmatilan valvonnassa. Arvio perustuu julkisista lähteistä saatuihin tietoihin infrapunasensoreiden ominaisuuksista sekä fysikaalisiin perusteisiin nojaavaan päättelyyn. Siinä ei ole käytetty eikä sitä varten ole saatu Puolustusvoimilta salassa pidettävää tietoa mahdollisesti käytössä olevien infrapunasensorien ominaisuuksista tai sijoituspaikoista. Raportissa selvitetään tuulivoimaloiden mahdollinen häiritsevä vaikutus kohteen havaitsemiseen infrapuna-alueella sekä voimaloiden oma infrapunaheräte. Tarkoitus on luoda edellytykset yksittäisen tuulivoimahankkeen arviointiin, niin että Puolustusvoimille voidaan antaa tällä osa-alueella riittävät tiedot mahdollistamaan kannanotto kyseiseen tuulivoimahankkeeseen. Puolustusvoimat luonnollisesti arvioi itse raportoitujen vaikutusten merkittävyyden operatiivisen toimintansa kannalta.

3. Infrapunasensorien fysikaaliset perusteet

3.1 Kappaleiden säteily

Kappaleen havaitsemiseksi voidaan käyttää sen itsensä säteilemää sähkömagneettista säteilyä. Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttisen nolapisteen yläpuolella, lähettävät ympäristöönsä tätä säteilyä. Hyvä approksimaatio tälle on ns. mustan kappaleen säteily, joka noudattaa **Planckin säteilylakia** (vuodelta 1901):

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc / \lambda kT) - 1} \quad (3.1-1)$$

jossa $I(\lambda, T)$ on mustan kappaleen säteilyn spektrinen intensiteetti ($[I(\lambda, T)] = \text{W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$). λ on säteilyn aallonpituus, $h = 6,62607 \cdot 10^{-34}$ Js on Planckin vakio, $k = 1,38065 \cdot 10^{-23}$ J/K on Boltzmannin vakio, $c = 299\,792\,458$ m/s on valon nopeus ja T on absoluuttinen lämpötila.

Todellisen kappaleen (joka ei ole täysin musta eli heijastamaton) säteily poikkeaa tästä alaspäin säteilevän pinnan ominaisuuksien mukaan. Planckin säteilylaki antaa kuitenkin hyvän kuvan säteilevien pintojen yleisestä käyttäytymisestä ja säteilyn riippuvuudesta lämpötilasta.

Mustan kappaleen säteily on kulmasta riippumatonta, jolloin mustan kappaleen spektrinen emittanssi, $E(\lambda, T)$, saadaan kertomalla piillä: $E = \pi I$. Integroimalla E aallonpituuden yli saadaan **Stefanin-Boltzmannin laki** (1879), jonka mukaan mustan kappaleen säteilemä kokonaisemittanssi (säteilyteho pinta-alayksikköä kohti (dP/dA)) riippuu sen lämpötilasta seuraavasti:

$$E(T) = dP / dA = \sigma T^4 \quad (3.1-2)$$

jossa Stefanin-Boltzmannin vakio $\sigma = 5,67040 \cdot 10^{-8}$ W m⁻² K⁻⁴. Havaitaan, että kappaleen säteilemä kokonaisteho kasvaa jyrkästi lämpötilan noustessa.

Mustan kappaleen spektrinen emittanssi tietyllä lämpötilalla, T , saavuttaa maksimin aallonpituudella λ_{max} , joka saadaan **Wienin siirtymälai** (1893):

$$\lambda_{max} = b / T \quad (3.1-3)$$

jossa $b = 2,897\,769 \cdot 10^{-3}$ m K, Wienin siirtymävakio. Todetaan, että mustan kappaleen lämpötilan noustessa säteilymaksimi siirtyy lyhyemmille aallonpituuksille.

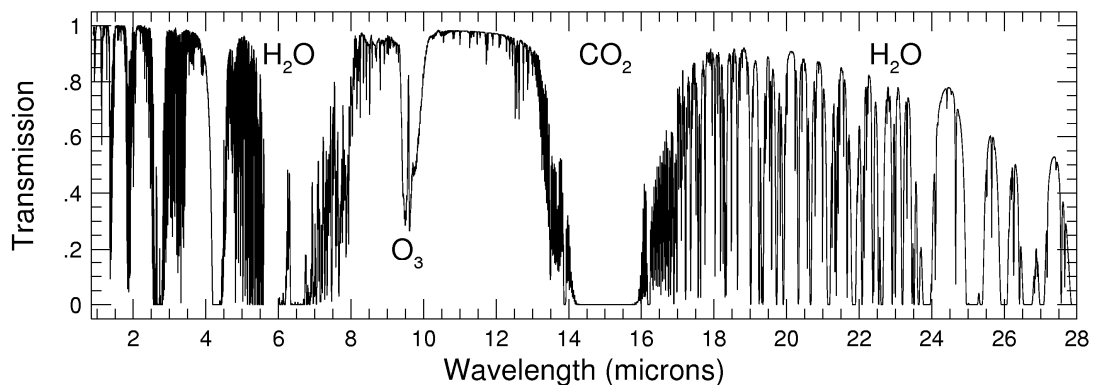
Wienin siirtymälain perusteella saadaan esimerkiksi ihmisen (lämpötila + 37 °C) infrapuna-alueella olevan säteilyhuipun aallonpituudeksi 9,3 μm ja suihkumoottorin pakokaasujen (lämpötila noin + 500 °C) vastaavasti 3,7 μm. ”Normaalissa lämpötilassa” olevien kappaleiden, joiden lämpötila on noin välillä -50...+90 °C, säteilyhuippujen aallonpituudet ovat välillä 8...13 μm. Tämä on aallonpituusväli, jolla ilmakehä läpäisee hyvin infrapunasäteilyä, yksi ns. ikkunoista. Toinen ikkuna sijaitsee noin aallon-

pituusalueella 3...5 μm mahdollistaen esimerkiksi edellä mainitun suihkumoottorin havaitsemisen. Vastaavasti alueella 5,5...8 μm ilmakehän vaimennus on suuri, jonka vuoksi lämpötilassa +90...+250 $^{\circ}\text{C}$ olevia kappaleita on vaikea havaita niiden infrapunasäteilyn perusteella.

Lambertin laista (1760) seuraa, että diffuusin pinnan omaavan kappaleen radianssi (säteily säteilevän pinnan pinta-alayksikköä ja avaruuskulmayksikköä kohti) on katselukulmasta riippumaton vakio. Tällöin infrapuna-alueella kappale vaikuttaa ”litteältä” ja sen säteily määrä tietyssä lämpötilassa ja tietyllä aallonpituudella riippuu ainoastaan siitä, kuinka suuren avaruuskulman kappale muodostaa tarkastelupisteestä katsottuna.

3.2 Ilmakehän läpäisyominaisuudet infrapuna-alueella

Kappaleen säteilyominaisuuksien ohella toinen infrapunasensorien toimintaan vaikuttava keskeinen tekijä on infrapunasäteilyn eteneminen ilmakehässä.



Kuva 3.2-1. Infrapunasäteilyn vaimennus ilmakehässä aallonpituuden funktiona ([7]).

Ilmakehän läpäisy aallonpituuden funktiona on esitetty kuvassa 3.2-1. Voimakas vaihtelu johtuu ilmakehän eri molekyylien resonansseista. Läpäisy- ja vaimennuskertoimien tarkka arvo tietyllä etäisyydellä ja korkeudella merenpinnasta riippuu useista tekijöistä. Ilmakehän peruskoostumus (typpi ja happi) on yleensä vakio, mutta esimerkiksi vesihöyryn ja otsonin määrä voi vaihdella huomattavasti, tämä aiheuttaa merkittäviä muutoksia infrapuna-alueen etenemiseen. Myös ilmassa esiintyvät aerosolit vaikuttavat vaimennukseen.

Läpäisykerroin τ matkalla, jonka pituus on ΔL , saadaan yhtälöstä

$$\tau = \exp(-\gamma \Delta L) \quad (3.2-1)$$

jossa vaimennuskerroin γ saadaan

$$\gamma = \sigma + k \quad (3.2-2)$$

Tässä σ on sirontakerroin ja k absorptiokerroin yksiköissä km^{-1} . Näistä voidaan erottaa molekyyleistä johtuva osuus (alaviitta m) ja aerosoleista johtuva osuus (alaviitta a) seuraavasti:

Tuloksista havaitaan, että aallonpituudella 3,392 μm vaimennus on huomattavasti suurempi kuin 10,591 μm :llä. Näyttää jopa siltä, että tuolla lyhyemmällä aallonpituudella kohteen havaitseminen on mahdotonta muuten kuin vain lyhyillä etäisyyksillä, alle noin 4...5 kilometriä. Kuitenkin eräät tekijät vaikuttavat toiseen suuntaan parantaen mahdollisuuksia kohteen havaitsemiseen:

- Stefanin-Boltzmannin lain (2) mukaan kohteen kokonaissäteily kasvaa voimakkaasti sen lämpötilan noustessa, joten kuumen kohteen, kuten suihkumoottorin ja sen suihkujen havaitseminen helpottuu verrattuna normaalilämpötilaiseen kohteeseen.
- Kohteen ollessa korkeammalla kuin aivan horisontissa etenemisvaimennus pienenee, koska säde kulkee keskimäärin korkeammalla, jossa vaimennus on pienempi.
- Kontrasti taustaan nähden on suurempi kuumilla kohteilla 3 μm :n alueella kuin normaalilämpötilaisilla kohteilla 10 μm :n alueella.
- Aallonpituuden 3,392 μm läheisyydessä vaimennus vaihtelee voimakkaasti, mutta sen läheisyydessä alueella 3,5...4 μm vaimennus voi olla pienempi kuvan 3.2-1 perusteella.

Kuitenkin ikkuna 8...13 μm vaikuttaa edullisemmalta kohteen havaitsemiseksi pidemmillä etäisyyksillä.

3.3 Sensorijärjestelmän ominaisuuksia

Todettakoon ensinnäkin, että infrapunasensorin toiminta muistuttaa huomattavasti näkyvän valon avulla tapahtuvaa optista havaitsemista, ei niinkään tutkaa. Infrapunasäteilyn aallonpituus, vaikkakin pidempi kuin valon, on tavallisten esineiden ja ympäristöjen mittasuhteisiin nähden niin lyhyt, että se mahdollistaa tarkkojen kuvien muodostamisen ympäristöstä. Kohteen ja sensorin välillä pitäisi olla esteetön näkyvyys, esimerkiksi kasvillisuus estää kuvaamisen, kuten näkyvälläkin valolla. Ilmakehä vaimentaa säteilyä kuten näkyvällä valollakin sumu ja pilvet. Erona valoon on säteilyn synty tapa, infrapunalla (ainakin 8...13 μm :n alueella) on oleellista kohteiden oma lämpösäteily, ei niinkään kohteista heijastunut säteily kuten yleensä valolla. Tämän vuoksi yölläkin kuvaaminen on mahdollista.

Viitteissä [2] ja [3] on kuvattu infrapuna-alueella toimivien ilmavalvontaan tarkoitettujen sensorijärjestelmien konseptteja. Yleinen ongelma on, että kohteen emission perusteella kohteesta saadaan kaksiulotteinen kuva, sen suunta saadaan määritettyä, mutta ei sen etäisyyttä. Tämä on ratkaistu patentissa [2] liittämällä järjestelmään tutka etäisyyden määrittämiseksi, viitteessä [3] kuvatussa demonstraattorijärjestelmässä taas käytetään laseretäisyysmittaria tähän tarkoitukseen. Markkinoilla on myös ainakin viitteessä [4] kuvattu kaupallinen tuote infrapunailmavalvontaan.

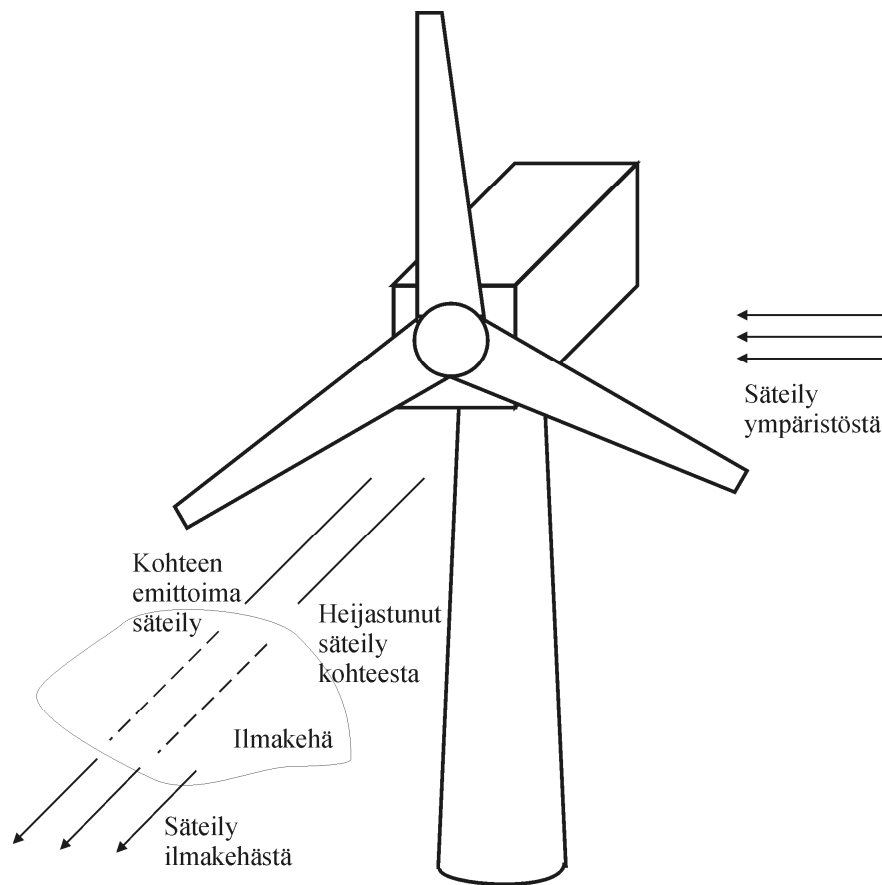
Ottamatta kantaa tietyn kaupallisen tuotteen ominaisuuksiin, voidaan päätellä tunnetun teknologian ja yleisten fysikaalisten perusteiden avulla nykyaikaisella infrapuna-alueella toimivalla ilmavalvontajärjestelmällä olevan seuraavassa kuvattavia ominaisuuksia:

Ilmatilaa valvotaan skannaamalla horisontin yläpuolella olevaa puoliavaruutta infrapuna-ilmaisimien avulla. Ilmaisimien (tai ilmaisimet) pyyhkii taivasta periodisesti linssien ja peilien muodostaman optisen järjestelmän avulla tietyssä järjestyksessä. Avaruuskulma-alueesta kerrallaan muodostetaan kuva järjestelmän polttotasossa olevan kuvantamismatriisin avulla, joka käsittää satoja infrapuna-ilmaisimia. Kukin ilmaisimien vastaa yhtä kuva-alkiota (pikseliä). Ilmaisimien vaatimasta integrointiajasta ja pyyhkäisy-nopeudesta riippuu, kuinka usein koko taivaan kuvantaminen voidaan toistaa. Muodostetaan kuva paikallaan pysyvistä taustasta, jonka järjestelmä tallentaa muistiinsa. Kun havaitaan säteilyvoimakkuuden jonkin tai joidenkin pikselien alueella muuttuneen ja poikkeavan tunnetusta taustasta, ja tämä muutos näkyy useassa perättäisessä kuvassa, päätellään kyseessä olevan todellisen kohteen. Kohteen etäisyys mitataan järjestelmään kuuluvalla joko laseretäisyysmittarilla tai tutkalla. Tieto näin havaitusta kohteesta syötetään ilmalavontajärjestelmään.

Järjestelmän kulmaerottelukyky voi olla luokkaa 1 mrad, jolloin pikselin koko olisi 1 metri kilometrin etäisyydellä. Kuvataajuus voisi olla samaa luokkaa kuin normaaleissa videokameroissa, mutta jos valvottavana on puoliavaruus, niin kuvataajuus on 2...5 Hz lienee realistisempi. Havaintoetäisyys riippuu käytettävästä aallonpituudesta, sääolosuhteista, vuodenaikasta ja kohteen ominaisuuksista. Edellä olevan ilmakehän läpäisyominaisuuksia koskevan tarkastelun perusteella näyttäisi siltä, että 3...5 μm :n alue soveltuisi valvontaan vain lyhyillä etäisyyksillä (enintään 4...5 km). Silloinkin kohteen on oltava kuuma ja hyvin taustastaan erottuva, esimerkiksi suihkumoottori. Sen sijaan 8...13 μm :n alueella parhaissa olosuhteissa (kirkas talvipäivä) näyttäisi mahdolliselta suorittaa valvontaa jopa 20 kilometrin etäisyydelle. Etäisyydet jäävät silloinkin paljon lyhyemmiksi kuin tutkalla saavutettavat.

4. Voimaloiden infrapunaherätteeseen vaikuttavia tekijöitä

Useimmat infrapunakamerat (IR-kamerat) tai –anturit (IR-anturit) eivät mittaa kohteen lämpötilaa suoraan, vaan ne havaitsevat säteilyvuota tietyssä avaruuskuulmassa, johon vaikuttavat havaittavan kohteen koko ja havaitsijan etäisyys kohteesta. Lisäksi havainnot painottuvat IR-kameran tai IR-anturin aallonpituusvasteen mukaisesti. Kuten on aikaisemmin todettu IR-kamerat tai –anturit toimivat pääsääntöisesti kahdessa aallonpituusikkunassa, 3-5 μm ja 8-13 μm , joissa ilmakehän vaimennus on matalimmillaan (ks. Kuva 3.2-1). On syytä huomata, että antureiden vaste ei välttämättä (ja pääsääntöisesti) ole tasainen aallonpituuden funktiona.



Kuva 4-1. Infrapunasäteilyn lähteet havaittaessa tuulivoimalaa infrapunakameran tai –anturien avulla.

Kuva 4-1 esittää tyypillisen tilanteen havaittaessa ulkoilmassa olevaa kohdetta passiivisin infrapunamenetelmin. Ympäristön säteily (aurinko, maaperä, kylmä taivas, jne.) osuu kohteeseen, joka yleisesti ottaen heijastaa osan, absorboi osan ja läpäisee osan osuvasta infrapunasäteilystä. Lisäksi kohde ja sitä ympäröivä ilmakehä säteilevät itse infrapunasäteilyä. Kohdetta havaitseva IR-anturi näkee kohteesta heijastuneen ympäristön IR-säteilyn, kohteen itsensä emittoiman IR-säteilyn ja kohteen ja anturin välissä olevan ilmakehän IR-säteilyn. Kohteen ensimmäiseen vaikuttaa ilmakehän vaimennus, kuten luvussa 3.2 on kerrottu. Lisäksi on syytä tietää, että nämä kaikki säteilyosuudet ovat tyypillisesti sekä lämpötilan että aallonpituuden funktioita, ja

suuntakulmilla on oma vaikutuksensa. Heijastuneen ja emittoitun säteily tapauksessa kohteen pintaominaisuuksilla on omat vaikutuksensa säteilyvuohon, ja niitä kuvaavat parametrit ovat myös yleisesti ottaen lämpötilan, aallonpituuden, suuntakulmien funktioita. Monissa tapauksissa voidaan kuitenkin tehdä tulkintaa helpottavia approksimaatioita. Voidaan esimerkiksi ajatella, että aallonpituusikkuna, jossa IR-anturi toimii, on varsin kapea ja tarkasteltavat parametrit ovat aallonpituuden suhteen vakioita tässä ikkunassa. Vastaavasti voidaan perustella, että jos kohteen lämpötila poikkeaa vain vähän ympäristön lämpötilasta, tarkasteltavat parametrit ovat myös vakioita lämpötilan suhteen tällä kapealla vaihteluvälillä. Joissakin tapauksissa pinnan voidaan olettaa olevan diffuusi säteilijä, jolloin Lambertin laki on voimassa ja pinnan säteilyn intensiteetti on havaintokulmasta riippumaton. Pääsääntöisesti kuitenkin useimmat pinnat omaavat jonkinlaista suuntariippuvuutta. Hyvin usein parametrien arvoja ei yksinkertaisesti tiedetä, mikä tekee kohteen lämpötilan määrittämisestä vaikeaa.

Säteilytasapainosta seuraa [5], että kussakin pinnassa on oltava voimassa

$$G_y = G_h + G_a + G_l \quad (4-1)$$

missä G on spektrinen irradianssi [$\text{W}/(\text{m}^2 \mu\text{m})$], ja alaindeksit y , h , a ja l viittaavat ympäristöstä pintaan kohdistuvaa, pinnan heijastamaa, pinnan absorboimaa ja pinnan läpäisevää irradianssia. Tässä on oletettu, etteivät irradianssit riipu suuntakulmista. Jakamalla (4-1):n molemmat puolet G_y :llä saadaan

$$1 = G_h/G_y + G_a/G_y + G_l/G_y \quad (4-2)$$

Yhtälön (4-2) oikealla puolella olevia osamääriä

$$\rho_\lambda = G_h/G_y \quad (4-3 \text{ a})$$

$$\alpha_\lambda = G_a/G_y \quad (4-3 \text{ b})$$

$$\tau_\lambda = G_l/G_y \quad (4-3 \text{ c})$$

nimitetään spektriseksi reflektanssiksi (ρ_λ), absorptanssiksi (α_λ) ja transmittanssiksi (τ_λ), ja jotka ovat siis aallonpituuden funktioita. Jos oletetaan lisäksi, että pinnan heijastus, absorptio ja läpäisy eivät riipu myöskään aallonpituudesta, (4.2):sta seuraa

$$\alpha + \rho + \tau = 1, \quad (4-4)$$

missä tekijät ovat nyt vakioita. Oletetaan tuulivoimaloista seuraavaa: roottorin lapojen pintakerros on lasikuitua ja konehuoneen ja tornin seinämät ovat paksua terästä. Lisäksi potkurin, konehuoneen ja maston pinnat on maalattu valkealla maalilla. Kyseiset pinnat ovat läpäisemättömiä infrapuna-alueella, joten (4-4) yksinkertaistuu vielä muotoon

$$\alpha + \rho = 1. \quad (4-5)$$

Materiaalien pintaominaisuuksien arviointi niiden näkyvässä valossa käyttäytymisen perusteella on vaarallisen harhaanjohtavaa. Useat materiaalit, jotka näkyvällä alueella heijastavat hyvin, ovat infrapunassa lähes heijastamattomia. Näin on myös valkoisen maalin laita. Aallonpituusalueella 3-5 μm sen ρ on luokkaa 0,03 – 0,2 ja alueella 8-13 μm luokkaa 0,02 (ks. [5], s. 735). Tuulivoimala heijastaa siis ympäristön IR-säteilyä 2 ja 20 prosentin välillä.

IR-anturin tai –kameran havaitsema irradianssi muodostuu edellä mainituista kolmesta osasta ([6], ks. myös kuva 4-1):

$$G = G_k + G_h + G_i, \quad (4-6)$$

missä alaindeksit k, h ja i viittaavat kohteen emittoimaan, kohteesta heijastuneeseen ja ilmakehän IR-säteilyyn. Osatekijät riippuvat aallonpituudesta ja kohteen ja ilmakehän tapauksessa myös lämpötilasta seuraavasti:

$$G_k = \int \varepsilon_k(\lambda) E_{bb}(T_k, \lambda) \tau_i(\lambda) d\lambda \quad (4-7 a)$$

$$G_h = \int \rho_k(\lambda) G_y(\lambda) \tau_i(\lambda) d\lambda \quad (4-7 b)$$

$$G_i = \int \tau_i(\lambda) E_{bb}(T_i, \lambda) d\lambda. \quad (4-7 c)$$

Kaavoissa (4-7) $E_{bb}(T, \lambda)$ on mustan kappaleen spektrinen emittanssi, $\tau_i(\lambda)$ ilmakehän spektrinen transmittanssi, $\rho_k(\lambda)$ kohteen spektrinen reflektanssi, ja $G_y(\lambda)$ ympäristön spektrinen irradianssi. $\varepsilon_k(\lambda)$ on kohteen spektrinen emissiviteetti, joka vaihtelee nollan ja yhden välillä ja kertoo paljonko kohde poikkeaa mustasta kappaleesta (mustan kappaleen $\varepsilon = 1$ kaikilla aallonpituuksilla). Tyypillisesti metallipintojen emissiviteetti on pieni (0-0,2), kun taas ei-johtavilla materiaaleilla se on suuri (>0,6) [5]. Valkoisen maalin emissiviteetti on 0,9 (ks. [5], s. A28). Yleisesti ottaen emissiviteetti riippuu myös lämpötilasta, mutta tuulivoimalaitosolosuhteissa pintojen lämpötilan vaihteluväli on suhteellisen pieni ja emissiviteettiä voidaan pitää vakiona. Esimerkiksi ruostumattoman teräksen tapauksessa lämpötilan on muututtava satoja asteita, jotta emissiviteetti muuttuisi merkittävästi. Kaavoissa (4.7) integrointialue on IR-anturin tai –kameran aallonpituusalue, eli tapauksesta riippuen joko 3-5 μm tai 8-13 μm . Integroinnin seurauksena G on nyt kokonaisirradianssi, joka ei riipu enää aallonpituudesta ($[G]=\text{W}/\text{m}^2$).

Oletetaan nyt, että lukuun ottamatta mustan kappaleen emittanssia kaikki muut tekijät kaavoissa (4.7) ovat vakioita (luvussa 3.2 tehty tarkastelu on tehty kahdella diskreetillä aallonpituudella, joten tämä on hyvä approksimaatio). Tällöin integraalien alle jää vain E_{bb} , ja integraalit ovat ratkaistavissa perustuen Stefan-Boltzmannin lakiin (kaava (3.1-2)). Näin yhtälöt (4-7) saavat muodot

$$G_k = \varepsilon_k \sigma T_k^4 \tau_i \quad (4-8 a)$$

$$G_h = \rho_k \tau_i G_y = \rho_k \tau_i (\varepsilon_m \sigma T_m^4 + \sigma T_i^4 + G_a) \quad (4-8 b)$$

$$G_i = \tau_i \sigma T_i^4. \quad (4-8 c)$$

Kaavassa (4-8 b) on otettu huomioon, että heijastuvaa säteilyä voi tulla kolmelta taholta: maaperästä (alaindeksi m), ilmakehästä ja auringosta (G_a). Ilmakehän on tässä oletettu vastaavan mustaa kappaletta, ja samoin maaperä on hyvin lähellä sitä ($\varepsilon_m \sim 0,93-0,97$). Ilmakehän lämpötilana käytetään ns. efektiivistä taivaslämpötilaa, joka vaihtelee kylmän kirkkaan taivaan arvosta 230 K lämpimän pilvisen taivaan 285 K:iin.

Auringon säteilyn irradianssi riippuu kulmasta, jossa se kohdistuu (zeniittikulma), ja lisäksi siihen vaikuttaa sironna ilmakehässä ja ilmakehän absorptio. Suomen leveysasteilla pienin zeniittikulma on noin 37 astetta etelärannikolla keskikesällä auringon ollessa korkeimmillaan, muulloin ja muualla se on tätä suurempi. Lasketaan auringon

irradianssi infrapuna-alueella seuraavasti. Otetaan lähtökohdaksi Planckin laki aallonpituusmuodossa (kaava 3.1-1). Integroidaan se aallonpituusvälillä $\lambda_1 \dots \lambda_2$;

$$I(T) = 2hc^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{1}{\lambda^5 (\exp(hc / \lambda kT) - 1)} d\lambda \quad (4-9)$$

Tämä integraali kertoo säteilyintensiteetin tuolla aallonpituusvälillä säteilevän kappaleen, tässä tapauksessa auringon, pinnan neliometriä ja avaruuskulman steradiaania kohti. Irradianssi G_a' maan etäisyydellä ilmakehän ulkopuolella saadaan

$$G_a' = I(T) \Omega A_1 \quad (4-10)$$

jossa avaruuskulma Ω on se, jolla maan etäisyydellä oleva 1 neliometri näkyy auringosta katsottuna, noin $4,468 \cdot 10^{-23}$ steradiaania. Säteilevä pinta A_1 taas on auringon geometrinen poikkipinta-ala, noin $1,522 \cdot 10^{18} \text{ m}^2$. Käytetään auringon mustan kappaleen pintalämpötilana arvoa $T = 5800 \text{ K}$. Kaavasta (4-10) saadaan nyt irradianssiksi $1,43 \text{ W/m}^2$ alueella $8 \dots 13 \text{ }\mu\text{m}$. Kyseessä on siis tämän aallonpituusvälin yli integroitu arvo. Vastaavasti saadaan $22,01 \text{ W/m}^2$ alueen $3 \dots 5 \text{ }\mu\text{m}$ yli integroituna. Jos integroidaan tarkistuksen vuoksi hyvin laajalla alueella, esimerkiksi $0,01 \dots 100 \text{ }\mu\text{m}$, saadaan tällä menetelmällä 1389 W/m^2 auringon kokonaissäteilyn voimakkuudeksi. Mitattu arvo on 1366 W/m^2 , eli sangen lähellä tätä.

Saadut auringon irradianssit G_a' kuvaavat tilannetta maan ilmakehän ulkopuolella. Ilmakehän aiheuttama vaimennus on otettava huomioon maan pinnalla vallitsevan säteilyvoimakkuuden G_a selvittämiseksi. Lähteessä [1] sivulla 24 on annettu ilmakehän vaimennukset eri korkeuksilla 1 km:n välein aallonpituudella $10,591 \text{ }\mu\text{m}$. Käytetään olosuhteita, jotka lähinnä vastaavat Suomen kesää, eli lähteen [1] taulukon 5 "midlatitude summer", lämpötila $+ 21^\circ\text{C}$ ja kirkas sää. Saadaan taulukon 4-1 vaimennusarvot eri korkeuksilla kerroksittain 1 km:n välein 20 km:n korkeuteen asti.

Säteilyn kulkema matka ilmakehässä on verrannollinen tekijään $1/\sin\beta$, jossa β on auringon korkeuskulma horisontista. Kaava on riittävän tarkka, jos β on suurempi kuin noin $20 \dots 30$ astetta. Oletetaan, että $\beta = 53$ astetta, joka on suurin mahdollinen auringon korkeuskulma Suomessa (zeniittikulma on tällöin 37 astetta). Vaimennuskerroin τ ilmakehän ulkopuolelta maan pinnalle saadaan

$$\tau = \exp(-\gamma_z / \sin\beta) \quad (4-11)$$

jossa γ_z on taulukon 4-1 oikeanpuoleisen sarakkeen γ -arvojen summa ($0,357827$) korkeudesta 0-1 km alkaen. Kokonaisvaimennuskertoimeksi saadaan nyt $0,2761$, kun aurinko on 53 asteen korkeudella. Auringon säteilyn kokonaisirradianssi $8 \dots 13 \text{ }\mu\text{m}$:n alueella maan pinnalla on tällöin $1,43 \cdot 0,2761 = 0,395 \text{ W/m}^2$. Huomattakoon, että tämä on kovin pieni osa auringon kokonaissäteilyintensiteetistä, joka on suuruusluokkaa 1000 W/m^2 . Laskettu arvo edustaa ylärajaa auringon irradianssille tuolla aallonpituusalueella. Talvella ilmakehän vaimennus pituusyksikköä kohden on pienempi, mutta auringon korkeuskulma paljon matalampi, jolloin säteily kuitenkin vaimenee enemmän.

Ilmakehän vaimennus eri korkeuksilla				
$\lambda = 10,591 \mu\text{m}$, kesä, lämpötila maan pinnalla + 21 °C, keskileveysasteet, kirkas sää				
h / km	k_m	k_a	σ_a	γ / km^{-1}
0	0,358200	0,005460	0,004690	0,368350
0-1	0,325600	0,003640	0,003090	0,332330
1-2	0,187700	0,001580	0,001340	0,190620
2-3	0,115200	0,000675	0,000573	0,116448
3-4	0,075820	0,000318	0,000270	0,076408
4-5	0,055440	0,000201	0,000170	0,055811
5-6	0,044680	0,000146	0,000124	0,044950
6-7	0,037520	0,000118	0,000100	0,037738
7-8	0,030180	0,000116	0,000098	0,030394
8-9	0,023780	0,000115	0,000098	0,023993
9-10	0,019520	0,000111	0,000095	0,019726
10-11	0,015740	0,000106	0,000090	0,015936
11-12	0,012410	0,000106	0,000090	0,012606
12-13	0,009534	0,000104	0,000088	0,009726
13-14	0,008337	0,000099	0,000084	0,008520
14-15	0,008700	0,000095	0,000081	0,008875
15-16	0,008491	0,000090	0,000075	0,008656
16-17	0,008384	0,000086	0,000074	0,008544
17-18	0,008467	0,000085	0,000072	0,008624
18-19	0,008560	0,000075	0,000065	0,008700
19-20	0,008989	0,000060	0,000051	0,009101

Taulukko 4-1. Ilmakehän vaimennuskerroin γ osatekijöineen eri korkeuksilla 20 km:n korkeuteen asti ([1]). Kaavojen (3.2-2), (3.2-3a) ja (3.2-3b) perusteella $\gamma = k_m + \sigma_m + k_a + \sigma_a$. Tässä tapauksessa $\sigma_m < 10^{-6}$, siksi sitä ei ole merkitty taulukkoon.

Aallonpituusalueella 3...5 μm saatiin edellä suurempi auringon irradianssi 22,01 W/m² ilmakehän ulkopuolella. Kun $\lambda = 3,392 \mu\text{m}$, niin vastaavasti ja samoissa olosuhteissa kuin taulukossa 4-1, saadaan lähteen [1] sivun 23 taulukon 5 arvojen mukaan lasketuksi $\gamma_z = 28,257$ merenpinnan tasolta 20 km:n korkeuteen asti zeniitissä. Tällöin $\tau < 10^{-12}$ ja koska 20 km:n yläpuoleltakin tulee vaimennusta, on τ todellisuudessa vieläkin pienempi. Tämän perusteella todetaan, että aallonpituudella 3,392 μm auringon säteily maan pinnalla on niin heikko, että sitä ei tarvitse ottaa tarkasteluissa huomioon.

Havaintoetäisyys

Miltä etäisyydeltä kohde tai voimala voidaan havaita? Luvussa 3.2 on määritelty ilmakehän läpäisykerroin τ , jolle on laskettu numeerisia arvoja erilaisissa sääolosuhteissa eri etäisyyksille ja aallonpituuksille. Sensorille näkyvä kohteen (G_k' ,

kohde voi tässä olla joko havaittava kohde tai voimala) ja taustan irradianssi (G_b') saadaan

$$G_k' = (1 - \tau) G_i + \tau G_k \quad (4-12a)$$

$$G_b' = (1 - \tau) G_i + \tau G_b \quad (4-12b)$$

jossa G_k ja G_b ovat vastaavat suuret lähietäisyydellä eli ilman ilmakehän vaikutusta. G_i on ilman irradianssi. Läpäisykerroin kohteen ja voimalan välillä on τ . Jotta sensori kykenisi erottamaan kohteen taustasta, on taustan ja kohteen irradianssien erottava toisistaan vähintään ΔG , joka on infrapunailmaisimen ja optisen järjestelmän ominaisuuksista ja myös integrointiajasta riippuva ominaisuus.

Vähennetään yhtälöt (4-12a) ja (4-12b) toisistaan, saadaan $G_k' - G_b' = \tau (G_k - G_b)$. Jotta kohde erottuisi taustasta, on yhtälön vasemman puolen oltava vähintään ΔG , joten kriteeri kohteen erottumiselle on $\Delta G < \tau (G_k - G_b)$ eli vaaditaan

$$\tau > \Delta G / (G_k - G_b) \quad (4-13)$$

Koska $\tau = \exp(-\gamma \Delta L)$ (yhtälö (3.2-1)), niin maksimihavaintoetäisyydeksi L_{\max} kilometreinä saadaan

$$L_{\max} = -\ln(\Delta G / (G_k - G_b)) / \gamma \quad (4-14)$$

jossa γ on yhtälön (3.2-2) mukainen vaimennuskerroin. Sille on esitetty arvoja eri olosuhteissa taulukossa 3.2-1. Seuraavaksi on laskettava, millaisia arvoja ΔG , G_k ja G_b voivat saada.

Olkoon G_{k1} kohteen irradianssin se osa, joka johtuu kohteen omasta säteilystä. Kaavasta (4-9) saadaan intensiteetti $I(T)$ tietyllä aallonpituusvälillä kohteen pinta-alayksikköä ja säteilyn avaruuskulmayksikköä kohti. Kohteen emissiviteetti olkoon ε_k , lämpötila T_k , etäisyys d ja pikselin koko kulmayksiköissä $P \times P$ radiaania². Tällöin 1 m^2 :n pinta-alalle säteilytehoa saataisiin (ilmakehän vaimennusta huomioimatta) $G_{k1} = \varepsilon_k I(T_k) P^2 d^2$ ($1 \text{ m}^2 / d^2$) eli

$$G_{k1} = \varepsilon_k I(T_k) P^2 \quad (4-15)$$

Edellä on arvioitu auringon säteilyn irradianssi G_a maan pinnalla. Olkoon G_{ar} se irradianssi sensorin luona (ilmakehän vaimennusta kohteen ja sensorin välillä huomioimatta), joka seuraa kohteesta heijastuneesta ja ilmakehän läpi saapuessaan vaimentuneesta auringon säteilystä. Sen suuruudeksi saadaan

$$G_{ar} = \rho_k G_a P^2 / (2\pi) \quad (4-16)$$

ρ_k on kohteen reflektanssi ja tekijä 2π johtuu siitä, että säteily leviää puoliavaruuden kokoiselle kulma-alueelle. G_{ar} ilmaisee sen auringosta ilmakehän läpi vaimentuen tulleen ja kohteesta heijastuneen tehon, joka tulee 1 m^2 :n alalle sensorin luona, kun kohteen ja sensorin välistä ilmakehän aiheuttamaa vaimennusta ei vielä huomioida. Maasta ja ilmakehästä peräisin oleva lämpösäteily heijastuu myös kohteesta, vastaavat irradianssit sensorin luona ilman ilmakehän vaimennusta ovat G_{ir} ja G_{mr} . Ne saadaan seuraavasti:

$$G_{ir} = \rho_k I(T_i) P^2/2 \quad (4-17)$$

$$G_{mr} = \rho_k \varepsilon_m I(T_m) P^2/2 \quad (4-18)$$

ε_m on maan emittanssi ja T_i ja T_m ovat ilman ja maan lämpötilat. Tekijä 2 nimittäjässä johtuu siitä, että maa ja ilmakehä näkyvät kumpikin matalalla olevalle kohteelle noin puoliavaruuden suuruisista avaruuskulmista, jolloin niiden painotettu keskiarvo (yhtälöiden (4-17) ja (4-18) summa) ilmaisee noista lähteistä tulleen kohteesta heijastuneen kokonaistehon 1 m^2 :n alalle sensorin luona, kun kohteen ja sensorin välistä ilmakehän aiheuttamaa vaimennusta ei vielä huomioida. Kohteen kokonaisradianssi G_k on edellä olevien osien summa, $G_k = G_{kl} + G_{ar} + G_{ir} + G_{mr}$. Tämän on oltava suurempi kuin taustan (ilman) irradianssi G_b , jotta kohde erottuisi taustasta, $G_b = I(T_i)P^2$. Näiden erotus voidaan nyt laskea yhtälöiden (4-15)...(4-18) avulla:

$$G_k - G_b = G_{kl} + G_{ar} + G_{ir} + G_{mr} - G_b \quad (4-19)$$

Tämän tarkastelun edellytyksenä on, että kohde on riittävän suuri täyttääkseen koko pikselin. Eri tekijöiden suuruusluokista mainittakoon, että kesällä auringon säteilyn ollessa voimakkaimmillaan (taulukon 4-3 kesä, kirkas sää ja $10,591 \mu\text{m}$) sen osuus on alueella $8...13 \mu\text{m}$ noin $0,003 \%$ kohteen aiheuttamasta irradianssista, maan osuus $1,037 \%$, ilman $0,680 \%$ ja kohteen oman säteilyn osuus $98,280 \%$.

Irradianssien laskemiseen tarvittavat funktion $I(T)$ arvot saadaan kaavasta (4-9). Numeerisen integroinnin avulla laskettuja funktion ja sen derivaatan arvoja eräissä lämpötiloissa ja kahdella aallonpituusalueella on taulukoitu taulukossa 4-2.

Lämpötila		$\lambda = 3...5 \mu\text{m}$		$\lambda = 8...13 \mu\text{m}$	
t/°C	T/K	I(T)	d I(T)/dT	I(T)	d I(T)/dT
+30	303	2,0810		49,40	
+21	294	1,4970		42,81	
+12	285	1,0560	0,0429	36,79	0,6416
+3	276	0,7291		31,32	
+2	275	0,6987	0,0304	30,75	0,5737
-16	257	0,3080		21,54	
-23	250	0,2174	0,0114	18,52	0,4137
-43	230	0,0720	0,0044	11,46	0,2999

Taulukko 4-2. Kaavan (4-9) integraalin $I(T)$ ja sen derivaatan $d I(T)/dT$ arvoja.

Minkä suuruisia irradianssiarvoja voidaan havaita? Nykyisten lämpökameroiden havaitsema pienin lämpötilaero eli NETD-luku (Noise Equivalent Temperature Difference) on luokkaa $30...150 \text{ mK}$. Nyt voidaan laskea vastaava irradianssiero seuraavasti: Taulukon 4-2 mukaan alueella $8...13 \mu\text{m}$ lämpötilassa $+12 \text{ °C}$ kohteen säteilyteho kasvaa $0,6416$ yksikköä, kun kohteen lämpötila nousee yhdellä asteella. NETD-arvoa 30 mK vastaava $I(T)$:n muutos on tällöin $0,030 \cdot 0,6416 = 0,019248$. Tämä on siis pienin havaittava $I(T)$:n muutos, joka vastaa kaavassa (4-13) olevaa suuretta ΔG .

$$\Delta G = \text{NETD} \cdot (dI(T)/dT) \cdot P^2 \quad (4-20)$$

NEDT:n yksikkönä on K ja $dI(T)/dT$:lle käytetään taustalla olevan taivaan lämpötilaa vastaavaa arvoa, joka yleensä on alhaisempi kuin ilman lämpötila maan pinnalla. Nyt tunnetaan kaavoista (4-19) ja (4-20) tarvittavat lukuarvot, niin että voidaan laskea kaavoissa (4-13) ja (4-14) esiintyvä suure $\Delta G / (G_k - G_b)$ ja edelleen kaavasta (4-14) suurin havaintoetäisyys L_{max} . Tuloksia on esitetty taulukossa 4-3, jossa on käytetty taulukon 3.2-2 arvoja γ :lle. Huomattakoon, että P^2 esiintyy tekijänä lausekkeen $\Delta G / (G_k - G_b)$ sekä osoittajassa (kaava (4-20)) että nimittäjän kaikissa termeissä (kaava (4-19)), joten se supistuu pois eikä vaikuta lopputulokseen. Edellytys tämän laskelman pätevyydelle on, että kohde täyttää koko pikselin.

	Kirkas	Utuinen				NETD= 0,030 K	NETD = 0,15 K	Huomautukset
$\lambda / \mu\text{m}$	γ	γ	T_k/K	T_i/K	T_m/K	L_{max} / km		
Kesä								+ 21 °C
3,392	1,8623		303	275	303	4,23	3,36	
3,392		1,9876	294	285	294	3,83	3,02	
Talvi								- 16 °C
3,392	2,0623		257	230	257	3,64	2,86	
3,392	2,0623		276	230	257	4,10	3,32	Lämmitetyt lavat
3,392		2,1876	257	250	257	2,65	1,91	
3,392		2,1876	276	250	257	3,32	2,59	Lämmitetyt lavat
Kesä								+ 21 °C
10,591	0,3683		303	275	303	18,3	13,9	
10,591		0,4076	294	285	294	12,0	8,0	
Talvi								- 16 °C
10,591	0,0513		257	230	257	133	102	
10,591	0,0513		276	230	257	147	116	Lämmitetyt lavat
10,591		0,0906	257	250	257	51,0	33,2	
10,591		0,0906	276	250	257	73,9	56,2	Lämmitetyt lavat

Taulukko 4-3. Maksimihavaintoetäisyys L_{max} ja sen riippuvuus eri tekijöistä. Ilma on oletettu mustaksi kappaleeksi ($\varepsilon = 1$), maakin lähes ($\varepsilon = 0,95$ kesällä ja $0,97$ talvella), kohteelle on oletettu $\varepsilon = 0,9$. Auringon irradianssille on käytetty arvoa $0,395 \text{ W/m}^2$ kesällä kirkkaalla ilmalla alueella $8 \dots 13 \mu\text{m}$, muulloin 0. Kesällä kirkkaalla ilmalla kohteen lämpötilaksi on oletettu $+30^\circ\text{C}$, hiukan enemmän kuin ilman lämpötila $+21^\circ\text{C}$. Talviolosuhteissa on tarkasteltu myös lämmitettyjä lapoja (lämpötila $+3^\circ\text{C}$). Kohteen reflektanssiksi on oletettu $0,2$ alueella $3 \dots 5 \mu\text{m}$ ja $0,02$ alueella $8 \dots 13 \mu\text{m}$.

Huomattakoon, että laskettuja kantama-arvoja L_{max} voidaan tuulivoimaloiden lisäksi käyttää myös varsinaisten havaittavien kohteiden, pääasiassa lentokoneiden, havaintoetäisyyden arviointiin. Edellytyksenä on, että näiden kohteiden säteily- ja heijastusominaisuudet muistuttavat riittävästi tuulivoimaloiden vastaavia ominaisuuksia. Toinen edellytys kantama-arvojen oikeellisuudelle on, että kohde täyttää vähintään yhden kuvantamisjärjestelmän pikselin. Jos näin ei ole, lähestyy pikselin alueella havaittu keskimääräinen lämpötila ympäröivän ilmakehän arvoja, jolloin havaintoetäisyys lyhenee.

Taulukon 4-3 kantama-arvoja tarkasteltaessa havaitaan, että $3 \dots 5 \mu\text{m}$:n alueella havaintoetäisyydet näyttäisivät jäävän lyhyiksi, noin $2 \dots 4$ kilometriin. On kuitenkin

syytä huomioida kohdan 3.2 lopussa esitetyt varaukset, jotka saattavat pidentää kantamaa tässä esitetyistä.

Alueella 8...13 μm kantama näyttäisi hyvissä olosuhteissa voivan olla jopa yli 100 kilometriä. Tällöin kuitenkin myös pikselikoko metreissä kasvaa suureksi. Jos pikselin koko kulmayksiköissä on 1 mrad^2 , niin 100 km:n etäisyydellä se käsittää 100 m x 100 m suuruisen alueen. Mikään lentokone tai tuulivoimala ei ole niin suuri, että se peittäisi tuon kokoisen alueen, eikä edellä mainittu pikselintäyttymisehto täyty. Tämän vuoksi on taulukon 4-3 pisimpiä kantama-arvoja lyhennettävä useita kymmeniä prosentteja niiden saamiseksi realistisiksi. On myös huomattava, että suurilla etäisyyksillä tuulivoimalat ovat horisontin alapuolella sensorista katsottuina, joten niillä ei tällöin ole vaikutusta muiden kohteiden havaitsemiseen.

5. Voimaloiden infrapunaheräte ilmavalvontasensorien kannalta

5.1 Vaikutusten yleinen luonne

Tuulivoimaloiden mahdolliset vaikutukset infrapunasensorijärjestelmän toimintaan voidaan jakaa kahteen pääryhmään. Ne voivat

- aiheuttaa maalihavaintoja, jotka virheellisesti tulkitaan lentäviksi kohteiksi, joita halutaan havaita.
- häiritä ja estää todellisten maalien havaitsemista.

Käsitellään näitä vaikutuksia jatkossa tarkemmin. Tarkastellaan ensin joitakin voimaloiden yleisiä ominaisuuksia.

Suurina metallisina ja lasikuituisina maalattuina kappaleina tuulivoimalat muistuttavat kokoluokaltaan, materiaaleiltaan ja rakenteiltaan lentokoneita, eli kohteita, joita ilmavalvonta pääasiassa pyrkii havaitsemaan. Erona lentokoneisiin on, että voimalat pysyvät paikallaan, vaikka niissä onkin liikkuvia osia. Roottorin lapojen nopeudet vastaavat suurimmillaan potkurikäyttöisten pienlentokoneiden ja helikoptereiden nopeuksia. Infrapunahavainnoinnissa, toisin kuin tutkassa, ei kuitenkaan kiinnitetä huomiota liikkeestä aiheutuvaan Doppler-siirtymään liikkuvan kohteen erottamiseksi paikallaan pysyvistä taustasta.

Voimaloiden infrapunaherätteellä on seuraavia yleisiä ominaisuuksia:

Laaja-alaisuus. Koska voimalat ovat suuria kohteita (kokonaiskorkeus jopa lähes 200 metriä, osien leveydet useita metrejä), niiden heräte tulee laajalta alueelta ja huomattavasta avaruuskulmasta, joka tietenkin riippuu havainnointietäisyydestä. Lisäksi tuuli-voimapuistossa voi voimaloita olla suuri määrä, useita kymmeniä.

Suuri emissiviteetti, joka johtuu maalatuista pinnoista ja lasikuiturakenteista. Kuten edellä todettiin, valkoisen maalin emissiviteetti ε on lähes 1, jolloin se muistuttaa mustaa kappaletta, jolle $\varepsilon = 1$. Sen heijastuskerroin on infrapuna-alueella hyvin pieni, jonka vuoksi sen aikaansaama infrapunaheräte johtuu pääasiassa sen omasta lämpösäteilystä. On syytä olettaa, että tuulivoimalan pintojen lämpötila on lähellä ympäröivän ilman lämpötilaa, paitsi talvella, jos lavoissa on lämmittimet jäätyksen estämiseksi. Poikkeuksena voi olla konehuone, jonka sähkögeneraattorin ja muiden laitteiden häviöt nostavat sen sisäistä ja myös ulkopinnan lämpötilaa jonkin verran muita osia korkeammaksi. Kuitenkin näyttää siltä, että tuulivoimalat eivät suuresti ainakaan Suomessa yleisellä pilvisellä säällä lämpötilansa puolesta selvästi erotu ympäröivästä ilmakehästä ja muusta ympäristöstä, esimerkiksi puustosta. Kesällä auringon paahtaessa voimalaa tilanne voi olla toinen.

Periodisuus. Voimalan roottorin pyöriessä myös sen infrapunaheräte muuttuu, mutta periodisesti, koska sama tilanne toistuu 1/3 kierroksen välein. Periodisuuden hyödyntämiseksi havaintojärjestelmän kuvantamistaajuuden olisi oltava riittävän suuri. Tuulen

suunnan muuttuessa myös periodisuuden ominaisuudet muuttuvat, mutta suhteellisen hitaasti lapojen pyörimisliikkeeseen verrattuina.

Staattisuus, jolla tarkoitetaan sitä, että lapojen liikettä lukuun ottamatta voimalat pysyvät paikallaan ennalta tunnetussa suunnassa ja etäisyydellä.

5.2 Tuulivoimaloiden itsensä aiheuttamat havainnot

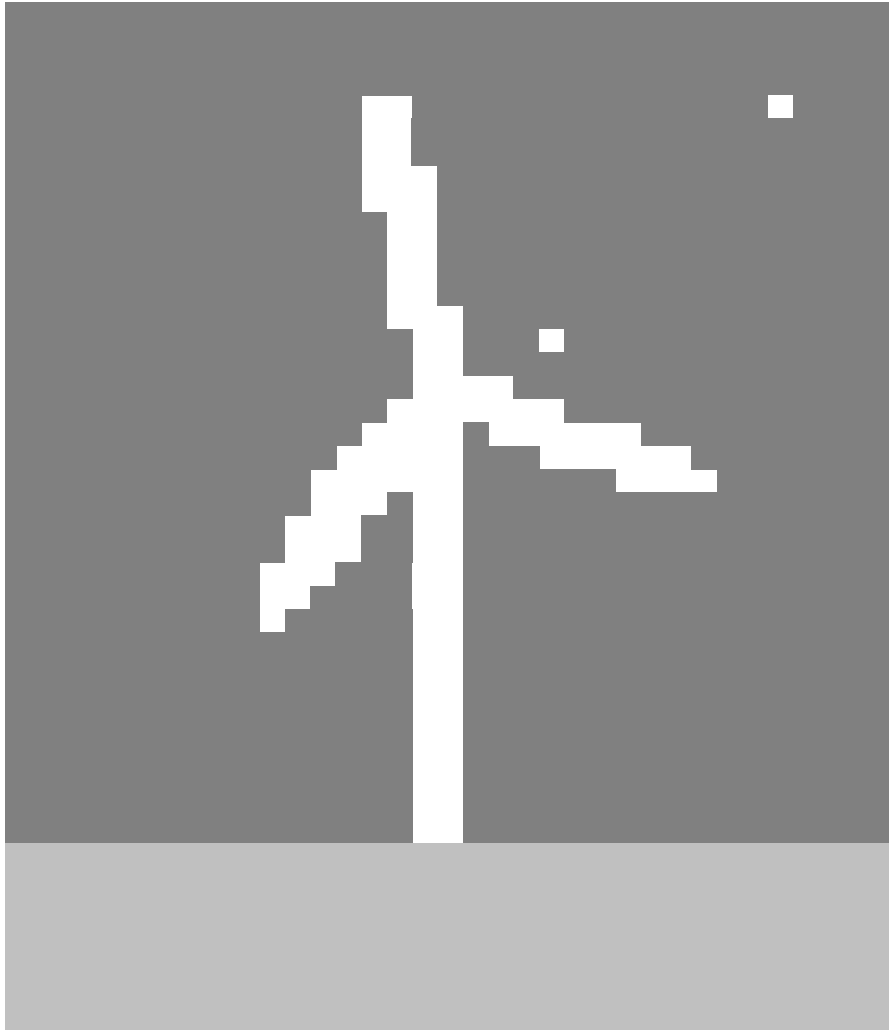
Infrapunasensori on sijoitettava riittävän esteettömään paikkaan, jotta se saavuttaisi täyden havaintokykynsä, esimerkiksi esteenä oleva kasvillisuus estää havaintojen teon kyseiseen suuntaan. Tyypillinen sijoituspaikka voisi olla mäellä oleva torni, jolla sensori saadaan puunlatvojen yläpuolelle. Tällöin myös lähitienoilla (alle noin 20 km:n päässä) olevat tuulivoimalat yleensä näkyvät hyvin sensorin sijoituspaikalle. Jos ne ovat maastoesteiden, kuten korkeiden mäkien, takana, niin niillä ei ole vaikutusta sensoreihin. Kuitenkin Suomen melko tasaisessa maastossa näin ei usein käy. Tarkastelussa ei juurikaan ole syytä huomioida yli 20...30 km:n etäisyyksiä sensoreista niiden rajoitetun kantomatkan takia. Tällöin ei myöskään maapallon kaarevuuden vaikutus ole kovin merkittävä tuulivoimaloiden näkyvyyttä rajoittavana tekijänä.

Suurina kohteina lähialueella (muutaman kilometrin etäisyydellä) olevat tuulivoimalat kyllä yleensä näkyvät infrapunasensorissa. Kuitenkin staattisina kohteina niiden suunta ja etäisyys ovat tunnettuja, joten ainakin niiden liikkumattomat osat (torni) voidaan sisällyttää taustakarttaan. Lavat liikkuvat ja voivat aiheuttaa havaintoja, varsinkin koska niiden periodisuus ei ole tahdistettu kuvantamistajuuteen ja näkyy perättäisissä kuvissa erilaisena. Kuitenkin voitaneen järjestelmään ohjelmoida ominaisuus, jolla voimaloiden suunnassa ja etäisyydellä (jos järjestelmässä on etäisyysmittausominaisuus) oleva kohdehavainto voidaan jättää huomiotta tuulivoimaloista johtuvana.

5.3 Häirintävaikutus todellisten maalien havaitsemiseen

Kuvissa 5.3-1a...5.3-1c on esitetty kuvitelma siitä, miltä kuvantavan infrapunasensorin näkemä kuva tuulivoimalasta ja kahdesta lentävästä kohteesta näyttäisi aallonpituusalueella 8...13 μm ja voimalan etäisyyksillä 5, 10 ja 20 km sensorista. Kuvan ruudut kuvaavat kuvantamisjärjestelmän pikseleitä, mustat viivat ovat voimalan ääriviivoja, jotka eivät näy infrapunakuvassa. Olosuhteet ovat tässä esimerkissä lähes optimaaliset infrapunavalvonnan kannalta, koska oletetaan valvonnan 20 km:n etäisyydellekin olevan mahdollista.

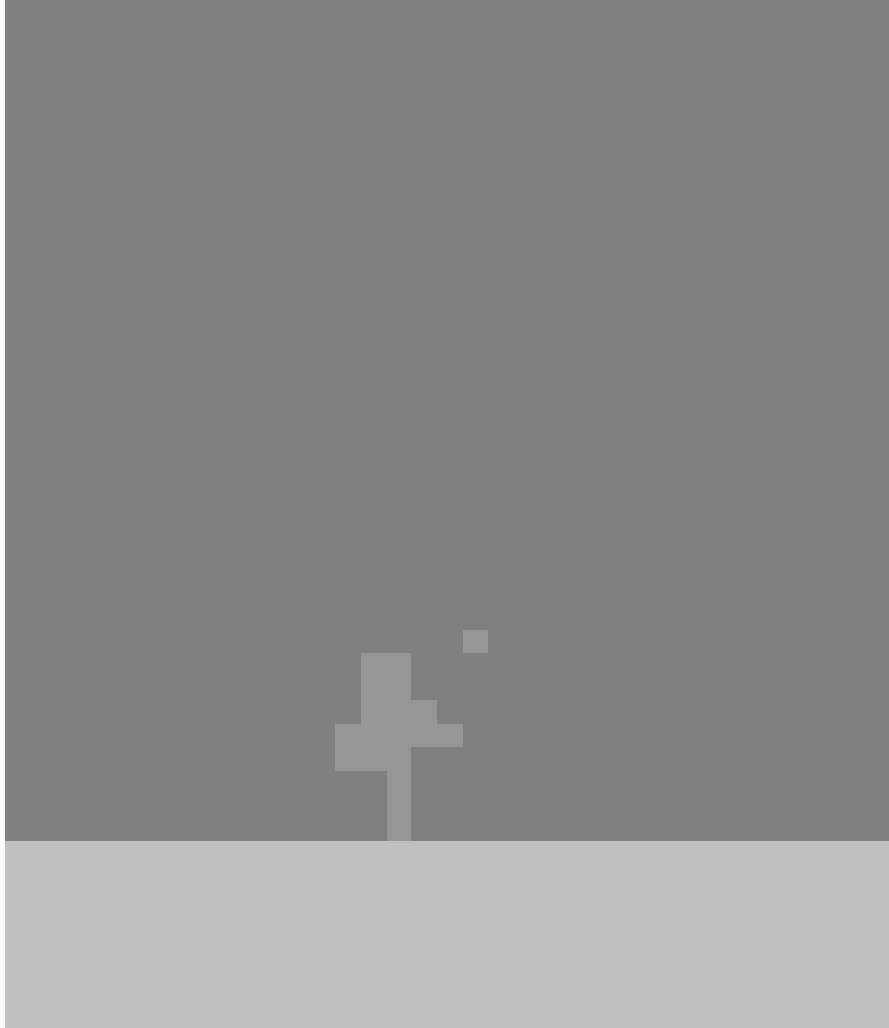
Etäisyyden kasvaessa pikselin koko luonnollisesti kasvaa (metreissä, vaikka kulmayksiköissä pysyykin samana) verrattuna voimalan ja havaittavan kohteen kokoon ja kuva muuttuu epätarkemmaksi. Lähellä voimalaa oleva kohde sulautuu voimalaan, eikä enää erotu siitä. Samalla ilmakehän vaimennuksesta johtuen voimalan ja kohteen irradianssi lähestyy ilmakehän arvoja, eli ne muuttuvat sumeammiksi ja vaikeammin havaittaviksi. Optisella alueella tätä vastaa kohteen häviäminen sumun sisään.



Kuva 5.3-1a. Voimalan etäisyys sensorista 5 km, pikselikoko 1 mrad² eli 5 x 5 m². Kaksi lentävää kohdetta erottuu selvästi.



*Kuva 5.3-1b. Voimalan etäisyys sensorista 10 km, pikselikoko 1 mrad² eli 10 x 10 m².
Toinen lentävä kohde erottuu, toinen alkaa sulautua voimalaan.*



Kuva 5.3-1c. Voimalan etäisyys sensorista 20 km, pikselikoko 1 mrad² eli 20 x 20 m². Toinen lentävä kohde erottuu vielä, toinen on sulautunut voimalaan, eikä enää erotu. Toisaalta voimalakin erottuu enää heikosti etäisyydestä johtuvan ilmakehän vaimennuksen takia.

Kulma-alue

Tarkastellaan, millä kulma-alueella voimaloilla on vaikutusta infrapunasensorin toimintaan. Määritellään vaikutuskulma-alue yksittäiselle voimalalle suorakulmioksi, jonka korkeus on yläasennossa olevan roottorinlavan kärjen korkeus, ja leveys vaakasuorassa asennossa olevien roottorin lapojen kärkien suurimman etäisyyden (sivusuunnassa) mukaan, kun voimalaa katsotaan akselin suunnasta. Vaikutuskulma-alueen leveys α_1 saadaan

$$\alpha_1 = 2 \arctan(L_B/d) \quad (5.3-1)$$

jossa L_B on roottorin lavan pituus pyörimisakselista kärkeen ja d sensorin ja voimalan välinen etäisyys. Radioaalloilla vaikutusalueen määrittämisessä huomioitava Fresnelin vyöhyke on näillä aallonpituuksilla alle 1 metrin levyinen, ja voidaan jättää huomiotta. Vaikutusalueen korkeus β_1 horisontista saadaan

$$\beta_1 = \frac{h_2 + L + L_B}{d} - \frac{(\sqrt{2Rh_1} - d)^2}{2Rd} \quad (5.3-2)$$

jossa h_1 on sensorin korkeus meren pinnasta, h_2 on tuulivoimalan alapään korkeus meren pinnasta, L on voimalan tornin korkeus pyörimisakseliin asti ja $R = 6\,370\,000$ m, maapallon säde. Voimaloista ei yleensä ole näkyvissä β_1 :n korkuista osaa, koska kasvillisuus ja maastoesteet peittävät osan voimalan alaosa. Ylimmän kohdan korkeuskulma merenpinnan tason määrittelemästä horisontista on kuitenkin β_1 .

Havaitsemistodennäköisyys vaikutusalueella

Oletetaan, että havaittava kohde on edellä määritellyllä kulmavaikutusalueella, mutta sen tarkkaa sijaintia ei tiedetä etukäteen, se voi sijaita yhtä suurella todennäköisyydellä millä tahansa kohtaa ko. aluetta. Lasketaan todennäköisyys, jolla kohde voidaan havaita. Oletetaan, että kohde on havaittavissa kaavan (4-13) kriteerin mukaisesti taustaa vasten, mikäli voimala ei aseta esteitä. Jos kuvantamisjärjestelmän kulmaerottelukyky eli pikselin koko kulmayksiköissä on $P \times P$ radiaania, niin etäisyydellä d se on vastaavasti $p \times p = Pd \times Pd$ metriä, eli pikselin leveys p voimalan etäisyydellä pituusyksiköissä saadaan $p = Pd$. Havaitaan ensin, että voimalan torni, jonka keskimääräinen leveys on D , koskettaa poikittaissuunnassa keskimäärin $(D/p) + 1$ kappaletta pikseleitä. Jotta kohde erottuisi voimalasta, on pikselin, jossa kohde on, ja voimalan koskettamien pikselien välillä oltava vähintään yksi pikseli. Tällöin voimalan tornin kohdalla poikittaissuunnassa on $(D/p) + 3$ pikselin leveydeltä aluetta, jossa kohde ei saa olla erotuakseen voimalasta. Tornin pituussuunnassa vastaavia pikseleitä on L/p kappaletta. Tornin siis ”varjostaa” kohteita $((D/p) + 3)(L/p)$ pikselin alueella. Vastaava varjostuneiden pikselien määrä voimalan kunkin kolmen lavan osalta on $((D_B/p) + 3)(L_B/p)$, jossa D_B on lavan keskimääräinen leveys ja L_B sen kokonaispituus. Laskemalla nämä yhteen saadaan likiarvo voimalan akselin suunnasta katsottaessa peittäminen pikselien määrälle: $m = (LD + 3L_B D_B)/p^2 + (3L + 9L_B)/p$. Koko vaikutusalueella pikseleitä on: $n = 2L_B(L + L_B)/p^2$. Todennäköisyys P_1 sille, että vaikutusalueella oleva kohde havaitaan yhdellä kuvauskerralla on $P_1 = 1 - (m/n)$ eli

$$P_1 = 1 - \frac{LD + 3L_B D_B}{2L_B(L + L_B)} - \frac{3L + 9L_B}{2L_B(L + L_B)} p \quad (5.3-3)$$

Kuvassa 5.3-2 on esitetty P_1 etäisyyden funktiona eräässä esimerkkitaapauksessa.



Kuva 5.3-2. Kohteen havaitsemistodennäköisyys voimalan kulmavaikutusalueella yhden kuvauksen aikana etäisyyden funktiona. $L = 100$ m, $D = 6$ m, $L_B = 50$ m, $D_B = 4$ m ja kulmaerottelukyky 1 mrad eli pikselikoko 1 mrad².

Kuten yhtälön (5.3-3) muodosta voidaan päätellä ja kuvasta 5.3-2 havaitaan, todennäköisyys P_I laskee lineaarisesti etäisyyden ja myös pikselikoon funktiona. Lyhyillä etäisyyksillä, jolloin p on pieni, P_I on se osuus vaikutusalueen pinta-alasta, jota voimalan geometrinen poikkipinta-ala ei peitä. Eräällä etäisyydellä $P_I = 0$ ja havaitseminen käy mahdottomaksi tätä pidemmällä etäisyyksillä. Tämä johtuu siitä, että pikselikoko tulee niin suureksi, että kohde ei voi esiintyä erillisissä pikseleissä, joihin myös voimaloilla ei olisi häiritsevää vaikutusta. $P_I = 0$, kun voimalan etäisyys d sensorista on

$$d = \frac{2L_B(L + L_B) - 3L_B D_B - LD}{P(3L + 9L_B)} \quad (5.3-4)$$

Kuvan 5.3-2 lukuarvoilla saadaan $d = 18,4$ km, kun $P_I = 0$. Yhtälö (5.3-4) asettaa siis ylärajan kohteen havaintoetäisyydelle voimalan kulmavaikutusalueella, mikäli yhtälö (4-14) ei aseta alhaisempaa ylärajaa.

Yllä olevassa tarkastelussa oletettiin, että voimala näkyy akselin suunnasta, jolloin sen geometrinen poikkipinta on suurimmillaan. Jos katselusuunta on roottorin tasosta, niin havaitsemistodennäköisyys P_I on tässä tapauksessa

$$P_I = 1 - \frac{LD + (1 + \sin(30^\circ))L_B D_B}{2L_B(L + L_B)} - \frac{3}{2L_B} p \quad (5.3-5)$$

$P_I = 0$ etäisyydellä d seuraavasti:

$$d = \frac{2L_B(L + L_B) - (1 + \sin(30^\circ))L_B D_B - LD}{3P(L + L_B)} \quad (5.3-6)$$

Kuvan 5.3-2 lukuarvoilla saadaan $d = 31,3$ km, kun $P_I = 0$. Raja tulee siis vastaan kauempana kuin akselin suunnasta katsottuna, koska peittävä pinta-ala on pienempi. Muilla katselukulmilla raja on jossakin yhtälöiden (5.3-4) ja (5.3-6) antamien arvojen välillä.

Vaikutusalue korkeussuunnassa

Vaikutusalueen ylärajaa seuraava infrapunasäde kulkee ilmakehässä melko suora-viivaisesti tuulivoimalan korkeimman pisteen ja sensorin välillä, maanpinta puolestaan kaartuu ”alta pois”. On helppo nähdä, että vaikutusalueen yläreunan korkeus $H(x)$ merenpinnasta etäisyyden x funktiona tietylle voimalan etäisyydelle d sensorista saadaan seuraavasta kaavasta:

$$H(x) = h_1 + \left(\frac{h_2 - h_1 + L + L_B}{d} - \frac{d}{2R} \right) x + \frac{1}{2R} x^2 \quad (5.3-7)$$

Jos taas halutaan tietää, mikä on lyhin etäisyys x , millä vaikutusalue yltää tietylle korkeudelle H , niin on ratkaistava x yhtälöstä (5.3-7). Kyseessä on x :n suhteen toisen asteen yhtälö muotoa $ax^2 + bx + c = 0$. Todetaan, että

$$a = \frac{1}{2R} \text{ ja } b = \frac{h_2 - h_1 + L + L_B}{d} - \frac{d}{2R} \text{ sekä}$$

$$c = h_1 - H. \text{ Tällöin toisen asteen yhtälön ratkaisukaavan mukaan } x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}.$$

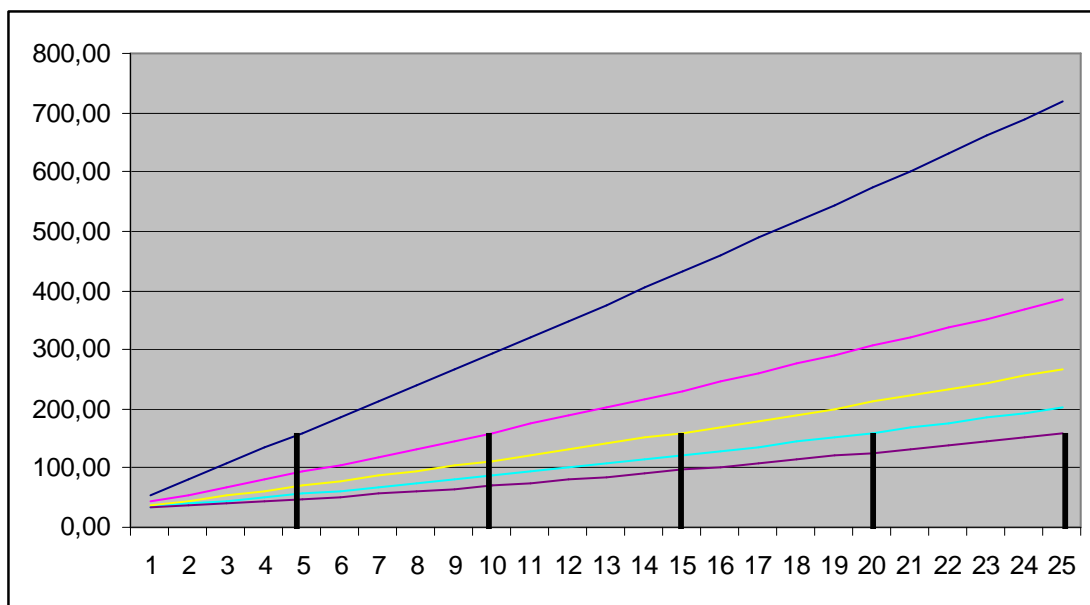
$$\text{Kahdesta ratkaisusta käytetään arvoa } x = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}.$$

Kaavasta (5.3-7) laskettuja vaikutusalueen korkeusarvoja on taulukossa 5.3-1.

Korkeus H / m						
x / km	d = 5 km	10 km	15 km	20 km	25 km	
0	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
1	55,69	42,29	37,57	35,01	33,32	
2	81,53	54,74	45,29	40,17	36,79	
3	107,53	67,35	53,17	45,50	40,42	
4	133,69	80,12	61,21	50,98	44,21	
5	160,00	93,04	69,41	56,61	48,15	
6	186,47	106,12	77,76	62,41	52,25	
7	213,10	119,35	86,27	68,36	56,51	
8	239,88	132,74	94,94	74,46	60,92	
9	266,83	146,29	103,76	80,73	65,50	
10	293,92	160,00	112,74	87,15	70,23	
11	321,18	173,86	121,88	93,73	75,11	
12	348,59	187,88	131,17	100,46	80,16	
13	376,16	202,06	140,63	107,36	85,36	
14	403,89	216,40	150,23	114,41	90,71	
15	431,77	230,89	160,00	121,61	96,23	
16	459,81	245,54	169,92	128,98	101,90	
17	488,01	260,34	180,00	136,50	107,72	

18	516,37	275,30	190,24	144,17	113,71
19	544,88	290,42	200,63	152,01	119,85
20	573,55	305,70	211,18	160,00	126,15
21	602,37	321,13	221,89	168,15	132,61
22	631,36	336,72	232,75	176,45	139,22
23	660,50	352,47	243,78	184,92	145,99
24	689,79	368,37	254,95	193,54	152,92
25	719,25	384,43	266,29	202,31	160,00

Taulukko 5.3-1. Tuulivoimalan infrapunasensorin havaintokykyyn kohdistuvan vaikutusalueen korkeus H metreinä meren pinnasta sensorista mitatun etäisyyden x funktiona. d on voimalan etäisyys sensorista, $L = 110$ m, $L_B = 50$ m, $h_1 = 30$ m ja $h_2 = 0$ m.



Kuva 5.3-3. Taulukon 5.3-1 arvot graafisena esityksenä. Vaikutuksen aiheuttavat tuulivoimalat on merkitty kuvaan tolppina.

Kuvan 5.3-3 käyrät ovat lähes suoria tässä käsitellyillä lyhyehköillä etäisyyksillä, mutta pidemmällä etäisyyksillä ne kaartuvat ylöspäin johtuen maan kaarevuudesta.

Huomattakoon, että tuulivoimalat eivät ainoastaan peittämällä estä takanaan olevien kohteiden näkymistä infrapunasensorille, ne vaikuttavat myös edessään olevien kohteiden näkymiseen. Voimalan edessä oleva kohde voi hävitä näkyvistä, jos se säteilyominaisuuksiltaan muistuttaa riittävän läheisesti voimalaa. Kohteen ja voimalan keskinäisestä konfiguraatiosta ja näkyvyydestä riippuen voidaan erottaa erilaisia tapauksia:

- 1) Kohde on voimalan edessä huomattavasti lähempänä kuin voimala. Etäisyserosta ja sää- ym. olosuhteista johtuen sensori havaitsee kohteen, mutta voimala on suuremman etäisyytensä johdosta näkymättömissä. Voimalalla ei ole vaikutusta havaintotoimintaan.
- 2) Kohde on voimalan edessä ja sensori havaitsee molemmat, mikäli niillä on riittävä kulmaetäisyys edellä kuvatulla tavalla. Kohde voidaan havaita myös sen ollessa suoraan voimalan edessä, jos sen säteilyominaisuudet poikkeavat riittävästi voimalasta.

- 3) Kohde on voimalan takana ja sen peitossa, eikä siksi tule havaituksi.
- 4) Kohde on voimalan takana, ei välttämättä sen peitossa, mutta ei tule havaituksi, koska on niin kaukana, että olosuhteet estävät näkyvyyden, vaikka lähempänä oleva voimala havaitaan.
- 5) Kohde on voimalan kulmavaikutusalueen ulkopuolella. Voimalalla ei tällöin ole vaikutusta kohteen havaitsemiseen.

Tuulivoimapuiston vaikutus

Edellä on tarkasteltu yksittäisen tuulivoimalan vaikutusta infrapunajärjestelmän toimintaan. Useita voimaloita käsittävän tuulivoimapuiston vaikutukset voidaan arvioida arvioimalla erikseen yksittäisten voimaloiden vaikutukset, mikäli ne sijaitsevat riittävällä kulmaetäisyydellä toisistaan. Kulmavaikutusalueita on tällöin useita, ne eivät juurikaan vaikuta toisiinsa ja voidaan käsitellä erikseen. Jos taas voimalat sijaitsevat sensorista katsottuna lähellä toisiaan, ne vahvistavat toistensa peittovaikutusta ja voivat, varsinkin kauempaa katsottuna muodostaa läpinäkymättömän seinämän infrapuna-havainnoille. Etäisyyden kasvaessa tosin niiden peittämä kulma-aluekin jää pienemmäksi.

Taktiset vaikutukset

Mitä vaikutuksia tuulivoimaloiden aiheuttamalla havaintokyvyn heikkenemisellä voi olla sotilastaktiselta kannalta katsottuna? Todetaan ensinnäkin, että vaikutus kohdistuu yleensä varsin kapealle, ennalta tunnetulle kulma-alueelle pysty- ja vaakasuunnassa. Ylivoimaisesti suurinta osaa puoliavaruudesta voidaan silti häiriöttömästi valvoa. Jos kohde pyrkisi lentämään kulmavaikutusalueella voimaloiden takana välttyäkseen tulehasta havaituksi, se saattaisi siinä jossakin määrin onnistua. Tämä vaatisi kuitenkin tietoa voimaloiden lisäksi myös sensorin sijainnista. Tämä taas ei ole niin helposti saatavaa tietoa kuin tieto tutkan sijainnista elektronisen mittaustiedustelun avulla, koska infrapunasensori on passiivinen, se ei itse lähetä säteilyä. Poikkeuksena on järjestelmään mahdollisesti kuuluva laseretäisyysmittari tai tutka, joiden käyttö kuitenkin voidaan rajoittaa minimiin. Lisäksi infrapunasensorin sijaintia voidaan muuttaa helpommin kuin raskaan tutkalaitteiston, ja sille soveltuvia sijoituspaikkoja on enemmän. Asiaa auttaa tietysti myös usean sensorin käyttö katvealueiden peittämiseen.

6. Yhteenveto

Olemme tarkastelleet infrapunasensorien ominaisuuksia ilmavalvonnassa ja tuulivoimaloiden vaikutusta siihen. Kaiken perusta on ymmärrys kappaleiden itsensä säteilemästä sähkömagneettisesta säteilystä, jota voidaan käyttää niiden havaitsemiseen. Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella, lähettävät ympäristöönsä tätä säteilyä. Tärkeimmät tähän liittyvät fysikaaliset peruslait ovat **Planckin säteilylaki, Stefanin-Boltzmannin laki, Wienin siirtymälaki ja Lambertin laki.**

Eri aallonpituuden omaavan ja eri lämpötiloissa syntyvän säteilyn kannalta oleellisia ovat ns. ikkunat, kuten 8...13 μm , joilla ilmakehä läpäisee hyvin infrapunasäteilyä. Toinen ikkuna sijaitsee noin aallonpituusalueella 3...5 μm . Tarkasteltiin ilmakehän

läpäisyominaisuuksia näillä aallonpituusalueilla ja esitettiin lukuarvoja ja menetelmät vaimennuksen laskemiseksi erilaisissa olosuhteissa. Havaittiin, että tarkastelluista aallonpituuksista 3,392 μm :llä vaimennus on huomattavasti suurempi kuin 10,591 μm :llä. Näyttää jopa siltä, että tuolla lyhyemmällä aallonpituudella kohteen havaitseminen on mahdotonta muuten kuin lyhyillä etäisyyksillä, alle 4...5 kilometriä, joten ikkuna 8...13 μm vaikuttaa edullisemmalla kohteen havaitsemiseksi pidemmillä etäisyyksillä.

Tarkasteltiin, minkälainen sensorijärjestelmä olisi mahdollinen ilmavalvonnassa käytettäväksi, ja mitkä sen ominaisuudet voisivat olla. Todettiin, että infrapunasensorin toiminta muistuttaa huomattavasti näkyvän valon avulla tapahtuvaa optista havaitsemista, ei niinkään tutkaa. Erona valoon on säteilyn synty tapa, infrapunalla (ainakin 8...13 μm :n alueella) on oleellista kohteiden oma lämpösäteily, ei niinkään kohteista heijastunut säteily kuten yleensä valolla. Tämän vuoksi yölläkin kuvaaminen on mahdollista.

Valvontajärjestelmä toimisi skannaamalla horisontin yläpuolella olevaa puoliavaruutta infrapuna-ilmaisimien avulla. Kun havaitaan säteilyvoimakkuuden jonkin pikselien alueella muuttuneen, päätellään kyseessä olevan todellisen kohteen, jonka etäisyys mitataan järjestelmään kuuluvalla laseretäisyysmittarilla tai tutkalla. Tieto näin havaitusta kohteesta syötetään ilmavalvontajärjestelmään. Järjestelmän kulmaerottelukyky voi olla luokkaa 1 mrad, kuvataajuus on 2...5 Hz ja aallonpituusalue mieluiten 8...13 μm . Valvonta voisi olla mahdollista noin 20 kilometrin etäisyydelle, mutta etäisyydet jäisivät näin ollen paljon lyhyemmiksi kuin tutkalla saavutettavat.

Tarkasteltiin tuulivoimaloiden infrapunaherätteeseen vaikuttavia tekijöitä. Ympäristön säteily (aurinko, maaperä, kylmä taivas, jne.) osuu kohteeseen, joka yleisesti ottaen heijastaa osan, absorboi osan ja läpäisee osan osuvasta infrapunasäteilystä. Lisäksi kohde ja sitä ympäröivä ilmakehä säteilevät itse infrapunasäteilyä. Kohdetta havaitseva IR-anturi näkee kohteesta heijastuneen ympäristön IR-säteilyn, kohteen itsensä emittoiman IR-säteilyn ja kohteen ja anturin välissä olevan ilmakehän IR-säteilyn. Heijastuneen ja emittoidun säteily tapauksessa kohteen pintaominaisuuksilla on omat vaikutuksensa säteilyvuohon, ja niitä kuvaavat parametrit ovat myös yleisesti ottaen lämpötilan, aallonpituuden, suuntakulmien funktioita. Määriteltiin asiaan liittyvät keskeiset suureet spektrinen irradianssi, reflektanssi, absorbanssi ja transmittanssi. Esitettiin menetelmä sen etäisyyden määrittämiseksi, jolla tuulivoimala tai lentokone voi kuvantamisjärjestelmässä tulla havaituksi ottaen huomioon ilmakehän aiheuttaman vaimennuksen.

Tarkasteltiin myös tuulivoimaloiden ominaisuuksia nimenomaan sensorijärjestelmän ominaisuuksien kannalta ja niiden vaikutusta kohteen havaitsemiseen. Kun kuvantava sensorijärjestelmä muodostaa kuvan kohteesta tuulivoimalaympäristössä, on pikselikoko suhteessa voimalan kokoon ratkaiseva. Esitettiin matemaattisesti havaitsemistodennäköisyyden riippuvuus näistä tekijöistä. Määriteltiin myös se kulma-alue, jolla tuulivoimalalla yleensä on vaikutusta kohteen havaitsemiseen, ja laskettiin mille lentokorkeudelle vaikutus ulottuu milläkin etäisyydellä. Tarkasteltiin myös erilaisia tilanteita, joissa kohde voi olla tuulivoimalan suhteen ja näiden vaikutusta havainnointiin. Lopuksi esitettiin arvio tuulivoimapuiston vaikutuksista suhteessa yksittäiseen voimalaan ja tarkasteltiin myös taktisia vaikutuksia.

7. Johtopäätökset

Suurina kohteina tuulivoimaloilla on eittämättä vaikutusta myös ilmavalvonnassa mahdollisesti käytettävän infrapunasensorijärjestelmän toimintaan ja havaintokykyyn. Tuulivoimalat heikentävät samalla suunnalla olevan kohteen havaitsemistodennäköisyyttä sitä enemmän, mitä kauempana sensorista voimala ja kohde ovat. Vaikutukset kuitenkin rajoittuvat kapealle kulma-alueelle, joka on sitä pienempi, mitä suurempi on voimalan etäisyys. Tämä osaltaan kompensoi havaintokyvyn heikkenemisestä aiheutuvaa haittaa. Tuulivoimaloiden itsensä aiheuttamat virrehavainnot lienee ainakin osittain mahdollista poistaa käyttämällä hyväksi tietoa voimaloiden sijainnista. Kokonaisuutena katsoen tuulivoimalat muodostavat erään ilmavalvontaan vaikuttavan tekijän, johon kuitenkin on mahdollista sopeutua, kun sen vaikutukset otetaan huomioon valvontajärjestelmien suunnittelussa.

Lähdeviitteet

- [1] R.A. McClatchey, R.W. Fenn, J.E.A. Selby, F.E. Volz, J.S. Garing, "Optical properties of the atmosphere (3rd Edition)", Report AFCRL-72-0497, Air Force Research Laboratories, Bedford, Massachusetts, USA, elokuu 1972.
- [2] E. Frei, H. Schlaepfer, "Method of, and apparatus for, area and air space surveillance", US Patent 4780719, 1988.
- [3] W. J. Bernard, "Silent-mode air surveillance", RTO SCI Symposium on System Concepts for Integrated Air Defence of Multinational Mobile Crisis Reaction Forces, Valencia, Espanja, 22.-24.5.2000.
- [4] <http://www.diehl-bgt-defence.de/index.php?id=567&L=1>
- [5] F.P. Incropera ja D.P. De Witt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer (3rd Edition)", John Wiley & Sons, New York, 1990, luku 12.
- [6] S.G. Burnay, T.L. Williams ja C.H.N. Jones, "Applications of Thermal Imaging", Adam Hilger, Bristol, 1988, luku 2.3.
- [7] <http://www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Ast161/Unit5/atmos.html>