

Ilmavalvontatutkien sijoituksen optimointi kokonaislukuohjelmoinnilla

Jonni Järvinen

Perustieteiden korkeakoulu

Kandidaatintyö
Espoo 2026-01-28

Vastuuopettaja

Prof. Kai Virtanen

Työn ohjaaja

DI. Markus Virtanen

Copyright © 2026 Jonni Järvinen

The document can be stored and made available to the public on the open internet pages of Aalto University.
All other rights are reserved.



Tekijä Jonni Järvinen

Työn nimi Ilmavalvontatutkien sijoituksen optimointi kokonaislukuohjelmoinnilla

Koulutusohjelma Teknillinen fysiikka ja matematiikka

Pääaine Matematiikka ja systeemitieteet

Pääaineen koodi SCI3029

Vastuuopettaja Prof. Kai Virtanen

Työn ohjaaja DI. Markus Virtanen

Päivämäärä 2026-01-28

Sivumäärä 20+1

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Ilmavalvonta on nykyään tärkeä osa kaikkien valtioiden ja alueiden puolustusta. Mahdolliset uhat on nähtävä tutkilla aikaisin, jotta niihin voidaan varautua. Tässä työssä esitellään menetelmät ja algoritmi tutkaryhmyksen sijoituksen optimointiin. Esimerkkitehtävissä generoidaan todenmukainen maasto ja pyritään maksimoimaan erilaisten ryhmitysten peittämää kolmiulotteista tilavuutta maastokatve huomioon ottaen. Muista aiheen töistä poiketen työssä siis huomioidaan tutkien peittämän alueen lisäksi peittokorkeus. Tutkina käytetään Suomen Ilmavoimien käytössä olevia tutkia, jotka näkevät kaikkialle ympärilleen ja joiden skannaussäteet nousevat lineaarisesti. Optimointi suoritetaan Matlabin geneettisellä algoritmilla.

Esimerkkitehtävien ratkaisusta huomataan, että maastokatve vaikuttaa merkittävästi tutkien peittämään alueeseen ja voi optimaalisessakin ratkaisussa estää jopa neljänneksen tutkien lähettämistä säteistä tietynlaisilla alueilla. Tulokset viittaavat myös siihen, että geneettisen algoritmin tuottamat ratkaisut ovat lievästi satunnaisia ja niiden optimaalisuus on epäselvää.

Avainsanat Ilmavalvonta, kokonaislukuoptimointi,

Author Jonni Järvinen

Title Air surveillance radar placement optimization using integer programming

Degree programme Engineering physics and mathematics

Major Mathematics and Systems Sciences

Code of major SCI3029

Teacher in charge Prof. Kai Virtanen

Advisor DSc (Tech.) Markus Virtanen

Date 2026-01-28

Number of pages 20+1

Language Finnish

Abstract

Air surveillance is a vital part of the defence strategy of all nations and areas in the modern era. Possible aerial threats must be seen early with radars to maximize the time to prepare countermeasures. This thesis introduces an algorithm and methods to optimize the positioning of a radar formation.

In the example exercises a realistic terrain is generated and the positioning of different radar formations is optimized with the intent of maximizing the covered three-dimensional volume. Thus, this thesis differs from earlier works in that it considers the height covered by the radar in addition to the area. The radars used in this thesis are those used by the Finnish Air Forces which can see in every direction around themselves. The examples are optimized by Matlab's genetic algorithm.

In the solutions to the example exercises it is evident that terrain blockage greatly affected the covered volume blocking up to a quarter of the beams sent by the radars in certain terrains. From the results one can also notice that the solutions generated by the genetic algorithm are mildly stochastic and the optimality of them is unclear.

Keywords Air surveillance, integer programming

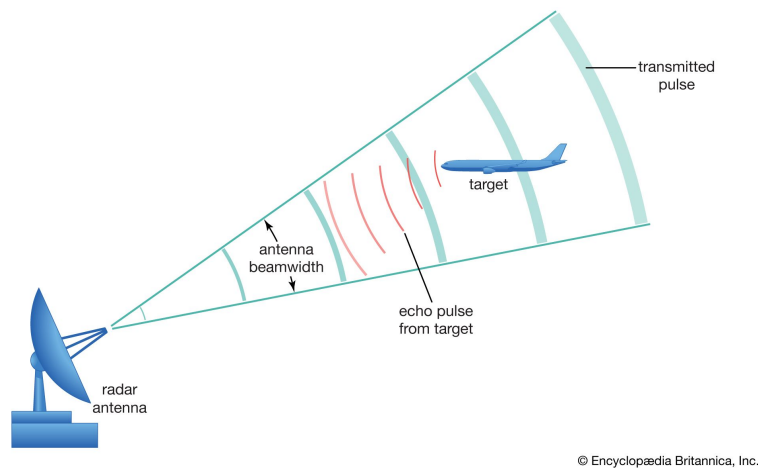
Sisällys

Tiivistelmä	3
Tiivistelmä (englanniksi)	4
Sisällys	5
1 Johdanto	6
2 Tutkien mallinnus	7
2.1 Tutkien peittäjä tilavuus	7
2.1.1 Tutkien peittäjä pinta-ala	7
2.1.2 Tutkien peittäjä korkeus	8
2.2 Työssä käytettävät tutkat	10
3 Optimointimenetelmä	10
3.1 Maaston generointi ja huiput	10
3.2 Geneettinen algoritmi Matlabissa	10
3.3 Optimointitehtävän formulointi	10
3.4 Sakkofunktio	11
3.5 Toteutus Matlabilla	12
4 Esimerkkitehtävät	12
4.1 Ensimmäinen tehtävä	12
4.1.1 Tehtävän esittely	12
4.1.2 Tehtävän ratkaisu	13
4.2 Toinen tehtävä	14
4.2.1 Tehtävän esittely	14
4.2.2 Tehtävän ratkaisu	15
4.3 Kolmas tehtävä	15
4.3.1 Tehtävän ratkaisu	17
4.4 Tulosten yhteenveto	17
5 Yhteenveto	18

1 Johdanto

Ilmatilan valvonta on yhä elintärkeämmässä osassa valtioiden kansallisen koskemattomuuden turvaamisessa modernissa maailmassa. Tästä syystä ilmavalvontatutkien käyttö on yleistynyt jatkuvasti aina ensimmäisten tutkien kehittämisestä lähtien 1930-luvulla.

Tutkan toimintaperiaate perustuu sen lähettämien sähkömagneettisten pulssien heijastumiseen lentävistä kappaleista. Pulssin lähettämisen ja sen havaitsemisen välisen ajan perusteella pystytään laskemaan kappaleen etäisyys tutkasta. (Skolnik, 2025)



Kuva 1: Tutkan toimintaperiaate

Tutkien sijoittaminen ei kuitenkaan aina ole triviaalia. Sijoittamisessa on otettava huomioon muun muassa asennus- ja ylläpitokustannukset sekä tutkaryhmyksen mahdollinen näkyvyys viholliselle. Tässä työssä kuitenkin keskitytään ryhmyksen luultavasti oleellimpaan ominaisuuteen, eli sen havaintokykyyn. Tähän vaikuttaa tutkien määrä sekä kantama niin pysty- kuin vaakasuunnassakin. Lisäksi havaintokykyyn vaikuttaa tutkien sijoituskorkeus sekä maastokatve. Havaintokykyä pyritään maksimoimaan optimoimalla ryhmyksen sijoittamista erilaisissa maastoissa.

Tutkien sijoittelun optimointia on tutkittu erilaisilla tavoitteilla, kuten monitavoitteisesti säätutkien säde-estoprosentin sekä asennus- ja ylläpitokustannusten minimointi (Boudjemaa ja Oliva, 2019). Ilmavalvontatutkien aihepiirissä sijoittelua on tutkittu myös monitavoitteisesti pyrkimällä eri algoritmeilla maksimoimaan tutkien peittämä pinta-ala samalla minimoiden tutkien määrän (Tema, Sahmoud, ja Kiraz, 2024). Lisäksi ilmavalvonnan laatua on tarkasteltu monikriteerisen päätösanalyysin avulla (Virtanen, 2024) sekä tuulivoimaloiden haitan minimoimista spatiaalisella päätösanalyysillä (Lahti, 2022).

Tässä työssä esitellään maastokatveen huomioon ottava peittävyysfunktio, jonka avulla optimoidaan tutkien sijoittelua. Funktion toimintaa havainnollistetaan esimerkkitehtävillä, jotka testaavat optimointia erilaisissa ympäristöissä. Tarkoituksena näissä tehtävissä on tutkia Matlabin geneettisen algoritmin ja funktion yhteistoimintaa ja pohtia sen puutteita.

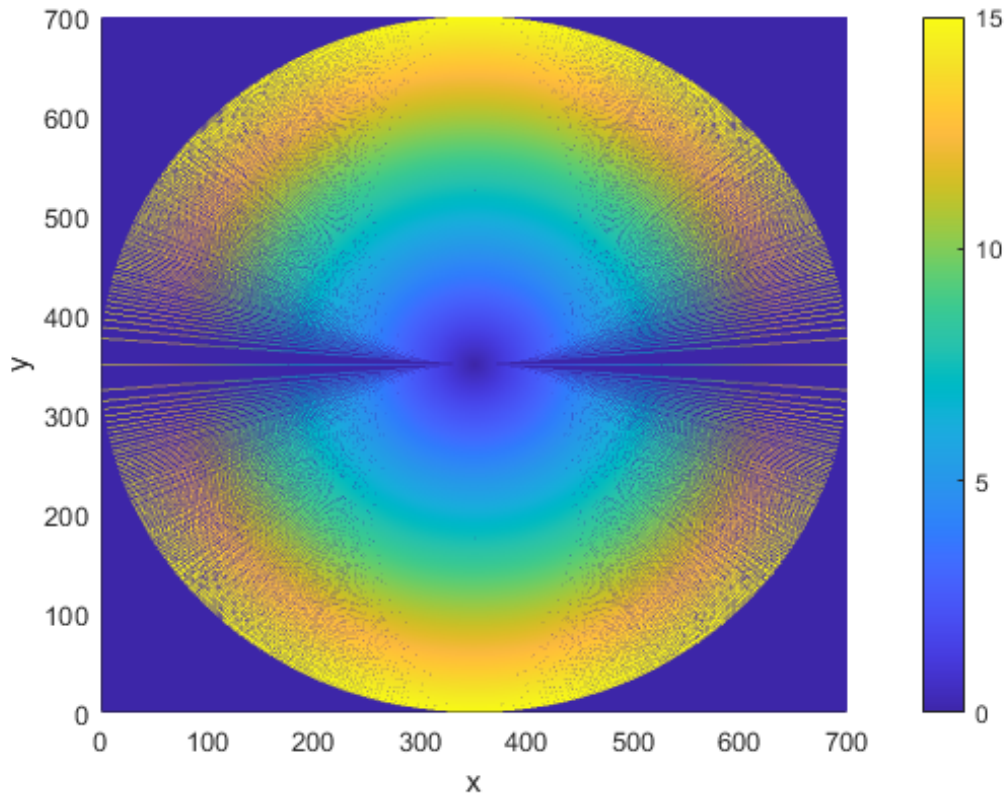
2 Tutkien mallinnus

Maasto jaetaan 1 km x 1 km -kokoisiin ruutuihin, joista jokaisesta ruudusta (i, j) tiedetään kyseisen alueen korkeuden keskiarvo h_{ij} . Esimerkkitehtävien ruutukoko r on siis $r = 1$ km. Tässä osiossa määritetään kaava, jolla lasketaan kaikkien tutkien peittämä tilavuus.

2.1 Tutkien peittämä tilavuus

2.1.1 Tutkien peittämä pinta-ala

Oletetaan, että tutka pyörii ja siten näkee ympärilleen tasaisesti. Tämä tarkoittaa, että tutkan peittämä alue on muodoltaan puolipallo, jonka yläosasta on poistettu keskipisteeseen ylettyvä kartio, jota kutsutaan katvekartioksi. Vaaditun laskentatehon minimoimiseksi mallinnetaan tutkan skannausta siten, että jokaisesta tutkasta kuvitellaan lähtevän ympärilleen skannaussäteitä, joiden avulla lasketaan tutkan peittämä pinta-ala. Tehtävän alueesta ulosmenevää osuutta säteistä ei lasketa mukaan tilavuuteen.



Kuva 2: Tutkan peittämää pinta-alaa havainnoillistava kuva

Kuvassa 2 on esitetty ylhäältäpäin tutkan skannausmuoto. Huomataan, että varsinkin x-akselin lähellä eli länsi-itä-akselilla on pyöristämisestä johtuen vähemmän skannaussäteitä, mutta ero on niin vähäinen, että se ei vaikuta merkittävästi tuloksiin.

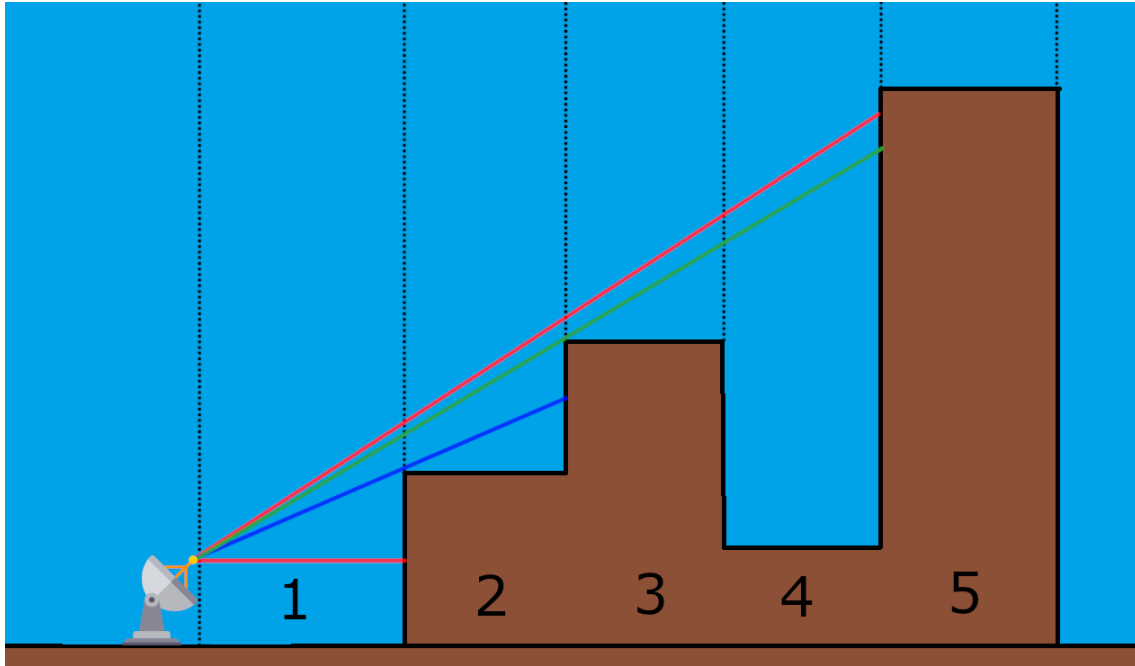
2.1.2 Tutkien peittämä korkeus

Olkoon tutkan maksimikantama r ja maksimikorkeus h . Tutkan lähettämät skannaussäteet nousevat pystysuunnassa lineaarisesti maksimikulmassa $\alpha_{\max} = \tan^{-1}(h/r)$.

Maksimikulman lisäksi jokaiselle ruudulle lasketaan maastonmuodon avulla skannaussäteiden minimikulma. Minimikulman arvo on alussa $\alpha_{\min}^0 = 0$ ja määräytyy jokaiselle ruudulle sitä edeltävien ruutujen korkeimman maastonkohdan mukaan. Olkoon H_t maastonkorkeus tutkan t kohdalla, $h_{i,j}$ maastonkorkeus ruudussa (i,j) , d tutkan t ja ruudun (i,j) välinen etäisyys ja s tutkan t ja ruudun (i,j) välisten ruutujen määrä. Minimikulma ruudussa (i,j) määräytyy kaavalla: $\alpha_{\min}^s = \max(\alpha_{\min}^{s-1}, \frac{h_{i,j} - H_t}{d})$. Kutsutaan maksimi- ja minimikulmassa lähteviä säteitä ylä- ja alarajaksi tässä järjestyksessä. Jos jonkin ruudun maasto on korkeammalla kuin yläraja, on minimikulma suurempi kuin maksimikulma ja täten tämä ruutu sekä sen takana olevat ruudut

lasketaan peittämättömiksi eli niiden peittokorkeus on 0.

Vähentämällä alarajan korkeus ylärajan korkeudesta lasketaan jokaiselle tutkan peittämälle ruudulle (i,j) peittokorkeus z_{ij} , joka kerrotaan ruudun sivun pituuden neliöllä. Jos useampi tutka peittää saman ruudun, lasketaan tilavuuteen mukaan vain se tutka, jonka peittokorkeus on suurin.



Kuva 3: Tutkan peittämää korkeutta havainnoillistava kuva

Kuvassa 3 on havainnollistettu maastokatveen vaikutusta tutkan peittävyys eri tilanteissa. Tutkan skannaussäteiden yläraja ja alaraja ovat merkitty kuvaan punaisilla viivoilla. Sinisellä viivalla on merkitty sektorin 2 maastokatveen aiheuttama alaraja. Sektorissa 2 siis tutka peittää ylemmän punaisen sekä sinisen viivan välisen alueen. Vihreällä viivalla on merkitty sektorin 3 maastokatveen aiheuttama alaraja. Vaikka maasto sektorissa 4 on selvästi matalammalla kuin sektorissa 3, näkee tutka kuitenkin sektorin 3 maastokatveesta johtuen näillä sektoreilla vain ylemmän punaisen ja vihreän viivan välisen alueen. Sektorin 5 maasto taas on ylärajaa korkeammalla, joten tutka ei peitä sektoria 5 eikä sen takana olevaa aluetta.

Täten ryhmytyksen peittävyys voidaan laskea kaavalla

$$V = r^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m z_{ij} - h_{ij}$$

jossa n on ruutujen määrä x-akselilla ja m ruutujen määrä y-akselilla.

2.2 Työssä käytettävät tutkat

Työssä käytetään Suomen ilmavoimien käytössä olevia tutkatyyppejä. Näihin kuuluvat seuraavat tutkat:

- Kaukovalvontatutka KAVA: kantama 500 kilometriä, maksimikorkeus 30 kilometriä
- Keskivalvontatutka KEVA: kantama 350 kilometriä, maksimikorkeus 15 kilometriä
- Lähivalvontatutka LÄVA: kantama 100 kilometriä, maksimikorkeus 5 kilometriä

([Ilmavoimat](#), 2016)

3 Optimointimenetelmä

3.1 Maaston generointi ja huiput

Tutkittava maasto generoidaan luonnonilmiöiden muokkaamaa maastoa simuloivan algoritmin mukaisesti ([McClure](#), 2012). Algoritmi pyrkii luomaan Brownin liikkeen ja keskiarvosiirtomenetelmän avulla fraktaalimaisemaa, joka mukailee muun muassa eroosion ja vesimassojen liikkeen vaikutuksia maastoon. Ruudukosta etsitään huiput, eli ruudut, jotka ovat korkeammalla tai yhtä korkealla kuin kaikki kahdeksan viereistä ruutua. Maastongenerointialgoritmissa on myös sisäänrakennettu funktio, joka generoi todenmukaiset värit maastolle. Tätä ominaisuutta käytetään ratkaisujen visualisoinneissa.

3.2 Geneettinen algoritmi Matlabissa

Matlabin sisäänrakennettu ga-funktio käyttää hyväkseen geneettistä algoritmia. Geneettinen algoritmi perustuu populaatioihin, jotka koostuvat eri päätösmuuttujan arvoista. Aluksi satunnaisen populaation avulla algoritmi luo iteroiden uusia populaatioita joko yhdistäen, muuttaen tai pitäen yksilöitä samana. Nämä populaatiot suppenevat tiettyyn päätösmuuttujan arvoon, joka palautetaan algoritmin pysähtyessä.

3.3 Optimointitehtävän formulointi

Tutkat sijoitetaan huippuihin Matlabin ga-kokonaislukuohjelmointialgoritmillä pyrkien maksimoimaan tutkien peittämä kolmiulotteinen tilavuus. Jokaiselle huipulle annetaan järjestysnumero ja määritetään päätösmuuttuja x siten, että

$$x \in \{1, 2, 3, \dots, M\}^n$$

jossa M on huippujen määrä ja n tutkien määrä. Päätösmuuttuja x siis koostuu uniikeista huippujen järjestysnumeroista, jotka määrittävät mihin huippuun mikäkin

tutka sijoitetaan. Tutkat siis voidaan sijoittaa pelkästään huippuihin, millä varmistetaan, että tutkat peittävät vähintäänkin välittömän läheisyytensä. Selkeyden vuoksi päätösmuuttujan alkioit vastaavat sijoitettavia tutkia kantamajärjestyksessä suurimmasta pienimpään. Määritetään tutkien sijoituksesta eli päätösmuuttujasta x riippuva peittävyysfunktio $Z(x)$, jonka arvo lasketaan edellisessä osiossa esitetyllä kaavalla $Z(x) = z_{ij} - h_{ij}$. Olkoon X maaston leveys, Y maaston pituus, M maaston huippujen määrä ja n tutkien määrä, täten optimointitehtävä on seuraavanlainen:

$$\begin{aligned} \max. \quad & r^2 \sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^Y Z(x) \\ \text{s.t.} \quad & x_i \neq x_j, \quad i \in \{1, 2, \dots, n\}, j \in \{1, 2, \dots, n\} \setminus \{i\} \\ & x \in \{1, 2, \dots, M\}^n \end{aligned}$$

Tehtävässä ei ole muita rajoituksia, sillä geneettinen algoritmi sallii vain yhtäsuuruusrajoituksia tai lineaarisia epäyhtälörajoituksia, joita tässä tehtävässä ei ole. Rajoituksia on siis valvottava sakkofunktiolla.

3.4 Sakkofunktio

Sakko lasketaan tutkille $N = \{1, 2, \dots, n\}$ ruuduissa $(i_1, j_1), (i_2, j_2), \dots, (i_n, j_n)$ kantomilla $\{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ seuraavalla tavalla:

Olkoon $\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ tutkien etäisyydet niiden lähimmistä reunoista:

$$e_k = \min(\min(i_k, X - i_k), \min(j_k, Y - j_k)), k \in N$$

ja d_{pq} tutkan p etäisyys tutkaan q :

$$d_{pq} = \sqrt{(i_p - i_q)^2 + (j_p - j_q)^2}, \quad p, q \in N$$

Määritetään reunasakko

$$s_e = \sum_{k \in N} \max(r_k - e_k, 0)$$

ja läheisyysakko

$$s_d = \sum_{k \in N} \sum_{l \in N \setminus \{k\}} d_{kl}$$

Yhteissakko on näiden sakkojen summa kerrottuna miljardilla:

$$S = 10^9(s_e + s_d)$$

3.5 Toteutus Matlabilla

Määritetään aluksi funktio huippujen etsimiseen maastosta sekä funktio, joka laskee kunkin tehtävän teoreettisen maksimin eli laskee yhteen tutkien peittämän tilavuuden tasaisella alustalla ilman päällekkäisyyksiä. Lisäksi määritetään Matlabiin osion 2 kuvauksen mukainen funktio, joka laskee tutkaryhmyksen peittävyysarvon. Luo- daan myös kustannusfunktio, jonka arvo on peittävyysfunktion arvo paitsi silloin, jos tutkien säteet koskevat toisiaan tai reunaa. Tällöin kustannusfunktio rankaisee vähentämällä peittävyysfunktion arvosta sakkofunktion arvon. Kutsutaan sijoittelualgoritmiä tällä toteutuksella, jossa kustannusfunktio asetetaan geneettisen algoritmin kohdefunktioksi.

4 Esimerkkitehtävät

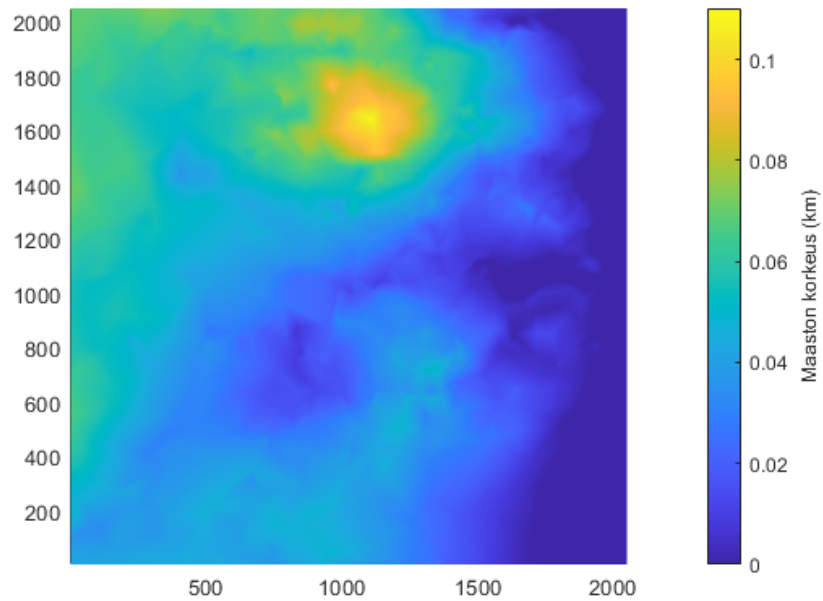
Johdanto

Tässä osiossa esitellään esimerkkitehtävät ja niiden ratkaisut. Jokaiseen tehtävään valitaan erilainen joukko tutkia, joille lasketaan teoreettinen maksimipeittävyys tehtävien alussa. Tehtäviin valitaan myös omanlainen maasto, josta etsitään huiput. Käytetään osiossa 3.5 määriteltyä kustannusfunktiota geneettisen algoritmin kohdefunktiona, optimoidaan tehtävät laskemalla eri tutkien peittävyysarvot rinnakkain, visualisoidaan tulokset ja lopuksi verrataan peittävyysfunktion arvoa teoreettiseen maksimiin. Osion tarkoitus on testata sijoittelualgoritmiä käytännössä erilaisissa maastotyypeissä ja arvioida optimaalisuutta.

4.1 Ensimmäinen tehtävä

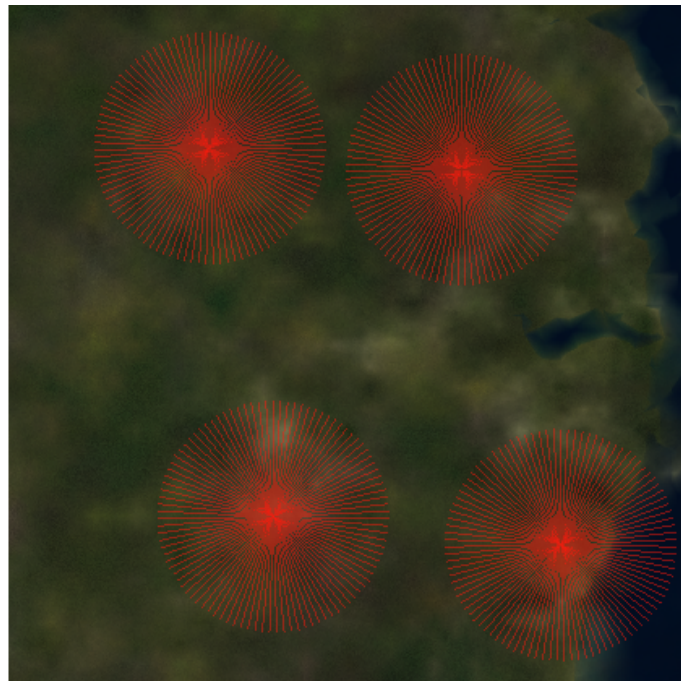
4.1.1 Tehtävän esittely

Ensimmäisessä tehtävässä tarkastellaan tasankoaluetta, jossa on pieniä vesistöalueita ja yksi korkeampi kukkula. Tehtävässä alueelle sijoitetaan neljä keskivalvontatutkaa eli peittävyysfunktion teoreettinen maksimi on noin $10\,762\,908\text{ km}^3$. Maaston tasaisuudesta johtuen peitetyn tilavuuden odotetaan olevan suhteellisen lähellä peittävyysfunktion teoreettista maksimia. Tämän esimerkin tarkoitus onkin esitellä sijoittelualgoritmiä soveltamalla sitä yksinkertaiseen tasaiseen maastoon, jossa on suhteellisen paljon mahdollisia sijoituspaikkoja.



Kuva 4: Ensimmäisen tehtävän korkeuspintakartta ja väriselite

4.1.2 Tehtävän ratkaisu



Kuva 5: Optimaaliset tutkien sijoituspaikat ja niiden peittämä alue

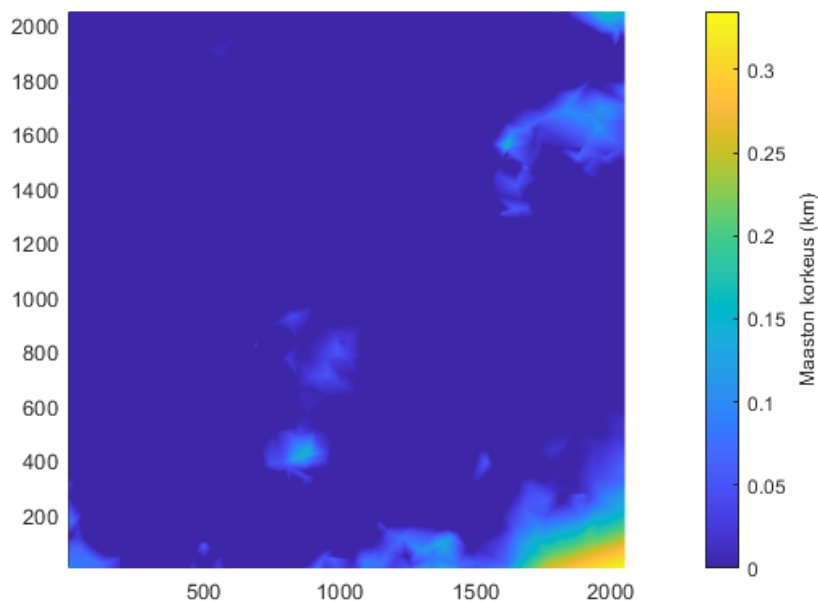
Kuvassa 5 on esitetty ensimmäisen tehtävän ratkaisu. Tutkien peittämä tilavuus on yhteensä $10\,762\,900\text{ km}^3$. Maastokatveesta johtuen siis peittävydestä menetettiin

vain 8 kuutiokilometriä eli noin 10^{-6} suuruinen osuus.

4.2 Toinen tehtävä

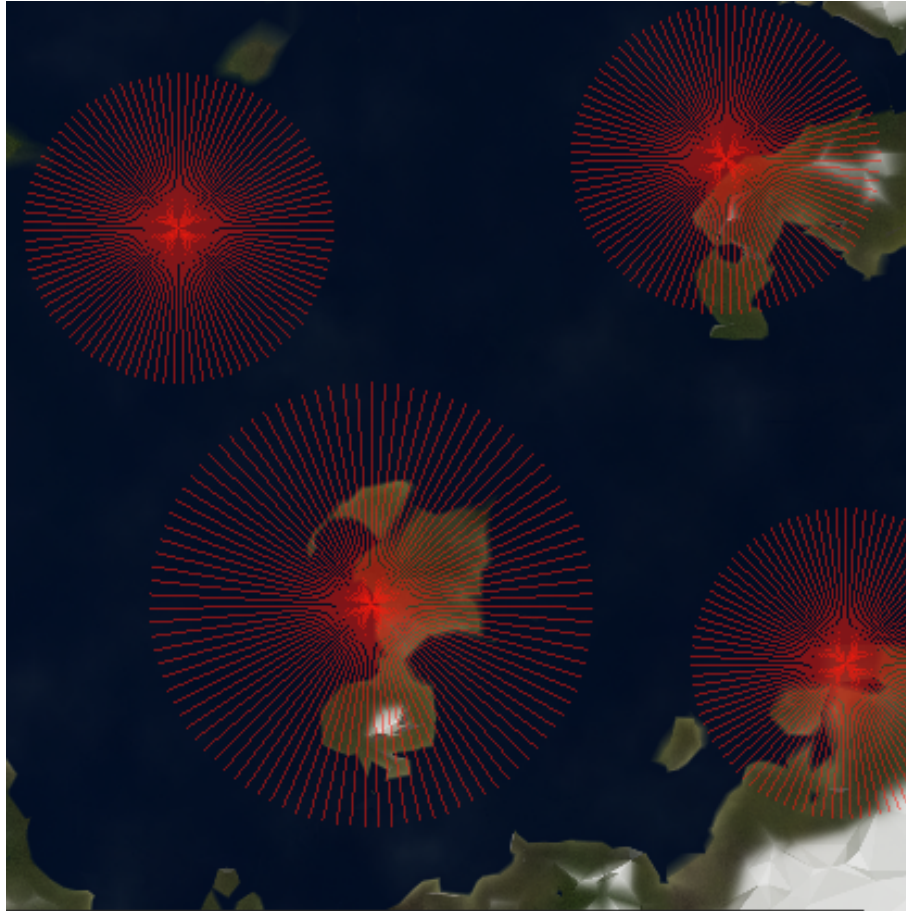
4.2.1 Tehtävän esittely

Toisessa tehtävässä tarkastellaan saaristoaluetta, josta suurin osa on veden peitossa. Tutkien käypiä sijoituspaikkoja on siis hyvin rajallisesti, mikä todennäköisesti pienentää peitettyä tilavuutta, mutta samalla nopeuttaa optimointia. Tehtävässä sijoitetaan yksi kaukovalvontatutka ja kolme keskivalvontatutkaa eli peittävyysfunktion teoreettinen maksimipeittävyys on $27\,411\,795\text{ km}^3$. Tämän esimerkin tarkoitus on tutkia, miten sijoittelualgoritmi käyttäytyy maastossa, jossa sijoituspaikkoja on vähän.



Kuva 6: Toisen tehtävän korkeuspintakartta ja väriselite

4.2.2 Tehtävän ratkaisu

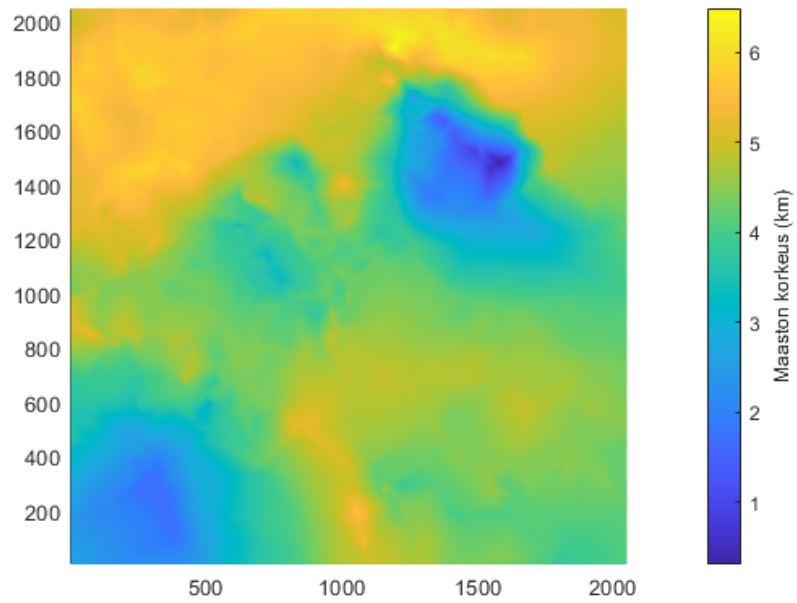


Kuva 7: Optimaaliset tutkien sijoituspaikat ja niiden peittämä alue

Kuvassa 7 on esitetty toisen tehtävän ratkaisu. Tutkien peittämä tilavuus on yhteensä noin $19\,036\,848\text{ km}^3$. Kuvasta huomataan, että sijoituspaikkojen vähäisyyden vuoksi yksi tutka oli asetettava lähelle reunaa.

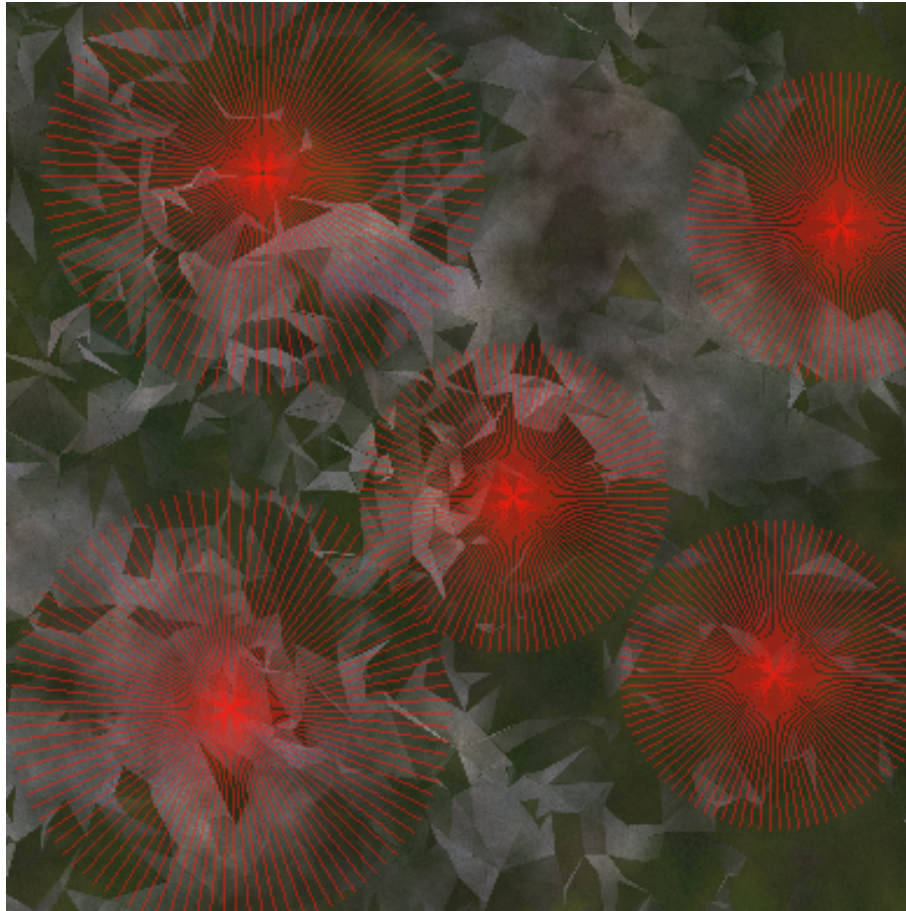
4.3 Kolmas tehtävä

Kolmannen tehtävän alueena toimii vuoristoalue, jossa on suuret korkeuserot. Maastokatve vaikuttaa siis huomattavasti edellisiä tehtäviä enemmän. Tarkoituksena on sijoittaa kaksi kaukovalvontatutkaa ja kolme keskivalvontatutkaa. Näin ollen peittävyysfunktion teoreettinen maksimi on noin $38\,376\,513\text{ km}^3$. Tämän tehtävän tarkoitus on tutkia sijoittelualgoritmin käyttäytymistä alueella, jossa maastokatve on merkittävä tekijä.



Kuva 8: Kolmannen tehtävän korkeuspintakartta ja väriselite

4.3.1 Tehtävän ratkaisu



Kuva 9: Optimaaliset tutkien sijoituspaikat ja niiden peittämä alue

Kuvassa 9 on esitetty kolmannen tehtävän ratkaisu. Tutkien peittämä tilavuus on yhteensä noin $28\,557\,674\text{ km}^3$. Huomataan, että odotusten mukaan maastokatve vaikutti merkittävästi tulokseen ja tästä johtuen ratkaisu näyttääkin epäoptimaaliselta. Täytyy kuitenkin ottaa huomioon, että alueella on merkittävästi jyrkkiä mäkiä, jotka saattavat täysin estää tutkan peittävyyskuten kuvan 3 sektorissa 5.

4.4 Tulosten yhteenveto

Tässä osiossa testattiin peittävyysfunktia tutkien sijoittelun optimointiin käytännössä esimerkkitehtävillä. Kyseinen ongelmatyyppi ei kuitenkaan soveltunut Matlabin Genetic Algorithm -menetelmälle täydellisesti. Optimointia suoritettaessa huomattiin, että tulokset olivat hyvin satunnaisia ja epäjohdonmukaisia. Tämä johtui pääasiassa siitä, että kyseessä oli epälineaarinen kokonaislukuoptimointitehtävä. Lisäksi Matlabin geneettiseen algoritmiin ei voi laittaa argumentiksi epäyhtälörajoituksia, joten tutkien etäisyyttä toisistaan ja reunoista täytyi rajoittaa sakkofunktion avulla.

Esimerkiksi toisessa esimerkkitehtävässä, vaikka huippuja oli suhteellisen pieni määrä, oli erilaisia ryhmittymien sijoitusvaihtoehtoja kuitenkin $\binom{445}{4} \approx 1.6 \cdot 10^{10}$ Näiden kaikkien läpikäymiseen vaadittaisiin valtava määrä laskentatehoa ja aikaa. Esimerkkitehtävien ratkaisemiseen kuluikin kohtalaisen tehokkaalla pöytätietokoneella useita minuutteja peittävyysfunktion monimutkaisuuden vuoksi. Suorien rajoitusten puutteen vuoksi geneettinen algoritmi ei myöskään osannut suoraan nähdä, millaiset muutokset nostaisivat kohdefunktion arvoa. Tästä johtuen algoritmin toiminta perustui siihen, että se loi jokaisella iteraatiolla lähes täysin satunnaisen populaation ja sen jälkeen tarkisti kohdefunktion arvon tällä populaatiolla. Täten myös satunnaisesti valitut alkusijoituspaikat vaikuttivat loppusijoitukseen merkittävästi eikä ratkaisujen optimaalisuudesta ole takeita.

Sijoittelualgoritmi kuitenkin antoi optimaaliselta vaikuttavan tuloksen suhteellisen nopeasti ruutujen määrään ja alueen kokoon nähden. Lisäksi se on helposti muokattavissa, eli siihen voi syöttää minkä tahansa korkeusmallin sekä tutkien tiedot ja jopa muokata ruutukokoa.

5 Yhteenveto

Tässä työssä tutkittiin tutkaryhmittymien optimointia erilaisissa maastoissa maksimoimalla tutkien peittämää tilavuutta. Tavoitteena oli luoda sijoittelualgoritmi, joka laskee optimaalisen sijoituksen tutkaryhmittymäkselle verrattain tehokkaasti, kun siihen syöttää maaston korkeusmallin sekä tutkien kantaman ja maksimikorkeuden. Optimointialgoritmi toteutettiin luomalla peittävyyslaskeva funktio ja optimoimalla se Matlabin geneettisillä algoritmeilla. Tuloksia tarkastellessa havaittiin, että sijoittelualgoritmin tulokset vaikuttivat ylhäältä päin katsottuna optimaalisilta. Optimaalisuutta on kuitenkin vaikea varmistaa peittävyysfunktion monimutkaisuuden takia. Samasta syystä myös optimoinnissa meni kohtalaisen kauan aikaa. Sijoittelualgoritmi kuitenkin lopulta todettiin toimivaksi käyttötarkoitukseensa muutamilla parannusehdotuksilla ja on tuore näkökulma ilmavalvonnan tehostamisen saralla, sillä olemassa olevassa kirjallisuudessa ei ole huomioitu tutkien peittämää tilavuutta. Lisäksi tutkien peittävyyttä tarkastelevassa kirjallisuudessa ei ole huomioitu, miten erilaiset maaastonmuodot vaikuttavat skannaussäteen käyttäytymiseen niiden takana.

Tutkaryhmittymien suunnittelussa harvoin on ainoana tavoitteena saada tutkilla peitettyä mahdollisimman suuri tilavuus, vaan pikemminkin esimerkiksi keskittää tutkat tiettyyn suuntaan, kuten valvottavan alueen rajalle. Lisäksi peittävyysfunktio ei ottanut huomioon sitä tilannetta, jossa tarpeeksi pienen alueen ympärillä jokaisessa suunnassa on alue, jonka jokin tutka peittää. Tällaisessa tilanteessa voi kyseisen alueen laskea myös peitettyksi, sillä sinne ei voi kulkea ilmateitse ilman, että jokin tutka huomaa.

Lisätutkimuksessa voisi ottaa huomioon näiden seikkojen lisäksi kohteen havaitsemistodennäköisyyden sekä skannaussäteiden heijastumisen maastosta ja pilvistä. Jatkotutkimuksessa voisi olla myös kätevä hyödyntää Matlabin Radar-lisäosaa, jolla voi havainnollistaa edellä mainittuja ominaisuuksia tutkaryhmyksessä ([The MathWorks Inc., 2024b](#)). Optimoinnin voisi myös pyrkiä suorittamaan Matlabin surrogateopt-funktiolla, jonka optimointi on tehokkaampaa kohdefunktion evaluoinnin ollessa laskennallisesti vaativa ([The MathWorks Inc., 2024a](#)). Tutkien sijainnin taktinen näkökulma olisi myös mielenkiintoinen jatkotutkimuksen kohde. Kohdefunktioon voisi lisätä parametreja, jotka vastaavat esimerkiksi tutkien sijainnin esteettömyys ja näkyvyys viholliselle, jotta tutkien huoltokustannukset saataisiin minimoitua. Tutkien sijoittelun optimointia on tutkittu kattavasti jo vuosikymmeniä, mutta erilaisilla priorisoinneilla jatkotutkimuksen mahdollisuudet ovat laajat.

Viitteet

- R. Boudjemaa ja D. Oliva. A multi-objective approach to weather radar network architecture. *Soft Computing*, 23:4221–4238, 2019. Viitattu 26.6.2025. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s00500-018-3072-6>.
- Ilmavoimat. Ilmavalvontatutkat ovat alueellisen koskemattomuuden valvonnan perustyökaluja. 2016. Saatavissa: https://ilmavoimat.fi/ilmavalvontatutkat_vanha.
- P. Lahti. Compensation of adverse effects of wind farms on air surveillance capability using spatial decision analysis. Diplomityö, Aalto-yliopiston Perustieteiden korkeakoulu, Espoo, 2022.
- T. McClure. Automatic terrain generation, 2012. Muokattu 2025, Saatavissa: <https://se.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/39559-automatic-terrain-generation>.
- M.I. Skolnik. radar. *Encyclopaedia Britannica*, 2025. Päivitetty 15.5.2025. Viitattu 12.06.2025. Saatavissa: <https://www.britannica.com/technology/radar>.
- E.Y. Tema, S. Sahmoud, ja B. Kiraz. Radar placement optimization based on adaptive multi-objective meta-heuristics. *Expert Systems with Applications*, 239: 122568, 2024. ISSN 0957-4174. Viitattu 26.6.2025. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417423030701>.
- The MathWorks Inc. surrogateopt, 2024a. Viitattu 05.08.2025, Saatavissa: <https://www.mathworks.com/help/gads/surrogateopt.html>.
- The MathWorks Inc. Radar toolbox version: 24.2.0 (r2024b), 2024b. Viitattu 05.08.2025, Saatavissa: <https://www.mathworks.com/help/radar/index.html>.
- M. Virtanen. Evaluation of quality of air surveillance using spatial multi-criteria decision analysis. Diplomityö, Aalto-yliopiston Perustieteiden korkeakoulu, Espoo, 2024.