

## TIIVISTELMÄRAPORTTI

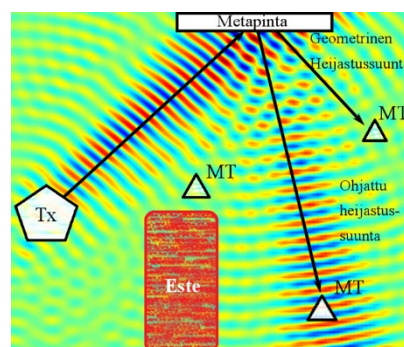
# ÄLYKKÄÄT RADIOPINNAT SOTILASRADIOJÄRJESTELMISSÄ

**Markku Juntti (markku.juntti@oulu.fi, +358294482834)**  
**Veikko Hovinen, Joonas Kokkonen, Visa Tapio, Juha Pyhtilä, Pekka Sangi**  
**Langattoman tietoliikenteen keskus, Oulun yliopisto, Pentti Kaiteran katu 1, 90570 Oulu**

**Tiivistelmä:** Älykkäät radiopinnat ovat heijastavia rakenteita, joilla voidaan vaikuttaa sähkömagneettisen säteilyn etenemiseen radioympäristössä. Sijoittamalla älykkäitä heijastavia pintoja ympäristöön, voidaan radiokanavan ominaisuuksia muuttaa kontrolloidusti. Radiokanavan ominaisuuksien muuttamisen ohella radiopintojen voidaan myös ajatella toimivan eräänlaisina passiivisinä toistinasemina. Tyypillinen kiinnostava käyttökohte on mahdollistaa parantunut linkkiyhteys, kun suoraa näköyhteyttä ei ole. Kun käytössä on hyvin suuntaava lähetinantenni, voidaan hyödyntää sen kapeaa keilaa parantamaan linkkibudjetin lisäksi myös tietoturvaa, koska signaali voidaan ilmaista vain halutussa sijainnissa. Hankkeessa tehtiin esiselvitys älykkäiden radiopintojen tutkimuksen nykytilasta sekä siitä voidaanko pintojen avulla parantaa tietoturvaa ja häiveominaisuuksia. Lisäksi tarkasteltiin älykkäiden pintojen käyttöä paikannus- ja tutkasovelluksissa. Älykkäiden radiopintojen käyttöä signaalin kuuluvuuden parantamiseksi tutkittiin simuloitussa 3D-kaupunkiympäristössä käyttäen kuuluvuusennusteiden laskemiseen Oulun yliopistossa kehitettyä säteenseurantasovellusta.

## 1. Johdanto

Älykkäät radiopinnat ovat rakenteita, joilla voidaan vaikuttaa sähkömagneettisen säteilyn etenemiseen radioympäristössä. Sijoittamalla älykkäitä heijastavia pintoja ympäristöön, voidaan radiokanavan ominaisuuksia muuttaa kontrolloidusti. Kuvassa 1 esitetään, miten ohjelmoitavalla metapintaan perustuvalla heijastimella voidaan ohjata sähkömagneettisen aallon etenemistä haluttuun suuntaan. Tyypillinen kiinnostava käyttökohte on kuvassa esitetyn kaltainen. Siinä mahdollistetaan parantunut linkkiyhteys, kun suoraa näköyhteyttä ei ole. Tämä on tärkeää erityisesti suuria millimetriaaltotaajuuksia käytettäessä, koska kyseiset aallot vaihtelevat voimakkaasti kohdatessaan esteitä. Mikäli lähettimen (Tx) ja heijastavan pinnan sijainti tunnetaan, tiedonsiirron lisäksi järjestely hyödyttää myös liikkuvan verkkosolmun eli mobiiliterminaalin (mobile terminal, MT) paikantamista. Kun käytössä on hyvin suuntaava lähetinantenni, voidaan hyödyntää sen kapeaa keilaa parantamaan linkkibudjetin lisäksi myös tietoturvaa, koska signaali voidaan ilmaista vain halutussa sijainnissa.

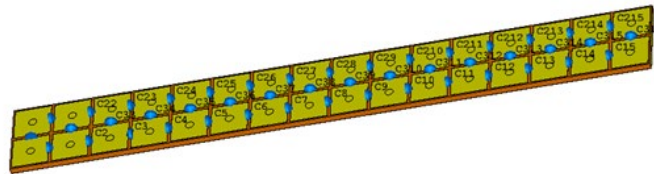


Kuva 1. Sähkömagneettisen aallon ohjaaminen älykkäällä radiopinnalla

Radiokanavan ominaisuuksien muuttamisen ohella radiopintojen voidaan myös ajatella toimivan eräänlaisina passiivisinä toistinasemina (relay station). Passiivisuus tarkoittaa tässä yhteydessä sitä, että heijastavassa pinnassa ei ole aktiivista tehonsyöttöä eikä tehovahvistinta.

Näin ollen pinta on energiatehokas ratkaisu, koska se vaatii ainoastaan hyvin matalalla virtatasolla toimivaa ohjauselektronikkaa.

Älykkäät radiopinnat eivät tarvitse toimiakseen radiolähettämiä tai -vastaanottimia. Sen sijaan niiden läpäisy- ja heijastusominaisuuksia voidaan muuttaa sähköisesti. Ne voidaan toteuttaa käyttäen heijastavia sähköisesti ohjattavia antenniryhmiä tai metapintoja. Metapinnat koostuvat suuresta joukosta sähköisesti pieniä rakenteita (meta-atomeja), joiden ominaisuuksia voidaan muuttaa. Kuvassa 2 on esitetty CST-ohjelmistolla mallinnettu metapinnan osa, joka koostuu 32 meta-atomista. Kyseisessä esimerkissä meta-atomit ovat suorakaiteen muotoisia metallisia laattoja, joiden mitat ovat huomattavasti ohjattavan aallon aallonpituutta pienempiä. Pinnan heijastusominaisuuksia voidaan kontrolloida varaktoreilla, joilla jokainen meta-atomit on yhdistetty naapuriatomiin.



Kuva 2. Osa kontrolloitavan metapinnan rakenteesta

Älykkäiden radiopintojen tutkimuksellisenä haasteena on selvittää passiivisen heijastinpinnan ominaisuuksia, kuten keilanmuodostuksen rajoitteita ja tarvittavan vaihesiirtymän resoluutiolle asetettuja vaatimuksia. Lisäksi tutkimuksellisia kohteina ovat tehokkaat radiokanavan esitimointimenetelmät sekä fyysisen RIS-pinnan suunnittelu- ja toteutusmenetelmät.

## 2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkimuksen tavoitteena oli tutkia älykkäiden heijastavien radiopintojen hyödyntämistä ja toteuttamista sotilasradiojärjestelmissä. Tutkimushankkeessa tavoitteena oli parantaa radiopinnan mallinnusmenetelmiä tavalla, jolla on yleistä tieteellistä merkittävyyttä. Sotilassovellusten kannalta mallinnusta käytetään ensisijaisesti tutkittaessa hyötyjä tiedonsiirron laadulle eli saavutettavalle datanopeudelle tai linkkibudjetille sekä peittoalueelle. Lisäksi tavoitteena oli tehdä myös alustava esiselvitys siitä, voiko tämän avulla parantaa tietoturvaa ja häiveominaisuuksia sekä tarkastella pintojen hyödyntämistä paikannus- ja tutkakäytössä.

Hankkeen keskeiset tavoitteet:

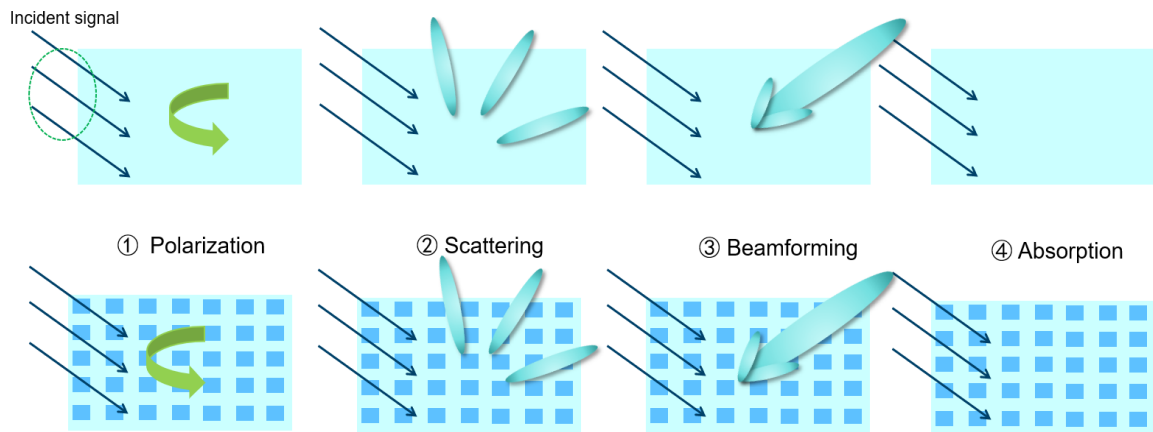
1. tehdä esiselvitys ja kirjallisuuskatsaus älykkäiden radiopintojen sotilaskäytöstä ja sovelluksista.
2. mallintaa pinnan käyttö sotilaallisesti kiinnostavassa käyttötapauksessa kaupunkisotaskaenaariossa.
3. mallintaa simuloinnein saavutettava hyöty linkkibudjetille ja yhteyden laadulle.
4. analysoida alustavasti älykkäiden radiopintojen hyötyä tietoliikenteen piilottamisessa ja salauksessa sekä mahdollisuuksia toteuttaa pinnoilla häiveominaisuuksia.

## 3. Aineisto ja menetelmät

Tutkimuksen tavoitteen 1 mukaisesti tehtiin RIS:n teoriasta ja käytävyydestä julkaistun

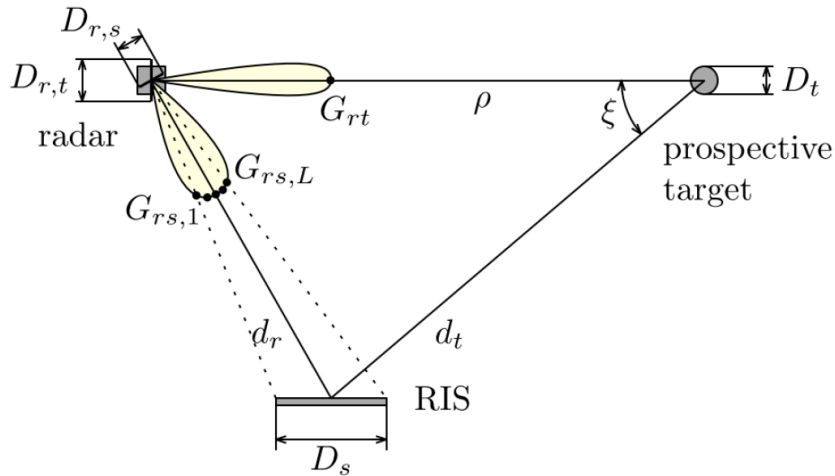
avoimen kirjallisuuden pohjalta esiselvitys älykkäiden radiopintojen soveltuvuudesta sotilaskäyttöön. Esiselvityksen pohjalta laadittiin kolme potentiaalista käyttötapausta, joista yksi valittiin tarkempaan tietokonesimulointiin. Simuloinnissa käytettiin säteenseurantamenetelmää radiosignaalin kuuluvuuden ennustamiseksi kaupunkiympäristössä. Verrokkina RIS-heijastimen tuoman hyödyn arvioimiselle pidettiin tilannetta, jossa RIS puuttui ja heijastus tapahtui normaalista seinäpinnasta.

RIS:n toiminnan periaate on havainnollistettu kuvassa 3. Heijastava pinta koostuu useista elementeistä, jotka ovat sivumitaltaan tyypillisesti radiosignaalin aallonpituuden puolikkaan luokkaa tai metamateriaalipinnan tapauksessa jopa huomattavasti pienempiä. Elementtien sähkö-magneettisia ominaisuuksia muutetaan hallitusti, jolloin radiosignaalin heijastuskäyttäytymistä voidaan kontrolloida. Pinta voi (1) muuttaa heijastuvan radiosignaalin polarisointia, (2) siroamiskäyttäytymistä, (3) heijastussuuntaa ja antennin säteilykeilan muotoa sekä (4) absorboida signaalia. Keilanmuodostuksen tavoitteena on parantaa signaalin havaittavuutta suunnissa missä toivottu signaalitaso on heikko. Hallitun keilanmuodostuksen seurauksena radiosignaalin epätoivottu hajaantuminen ympäristöön voidaan minimoida, mikä osaltaan parantaa viestinnän salattavuutta.

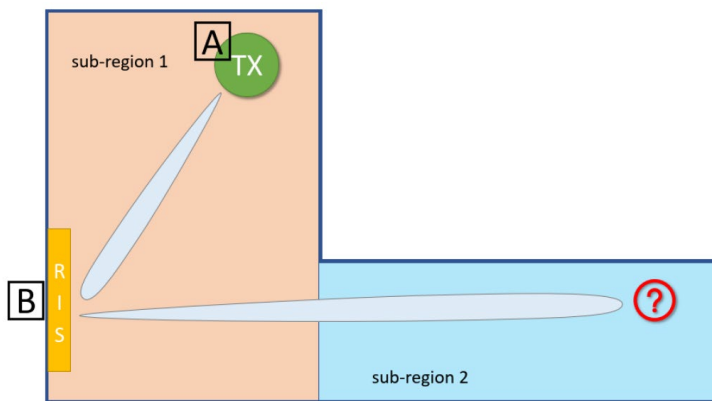


Kuva 3. Älykkään radiopinnan toiminnan periaate.

RIS:n toinen sotilassovellutusalue on kohteen paikannus. Kuva 4 esittää periaatetasolla, kuinka RIS mahdollistaa kohteen paikannuksen vain yhtä tiedusteluvastaanotinta käyttäen [1]. RIS-pinta voi mahdollistaa katveessa olevan kohteen epäsuoran havainoinnin kuvassa 5 esitetyn periaatteen mukaisesti [2]. RIS:n käyttö tutkasovellutuksiin rajattiin tähän tutkimukseen sisältyvien simulaatioiden ulkopuolelle.

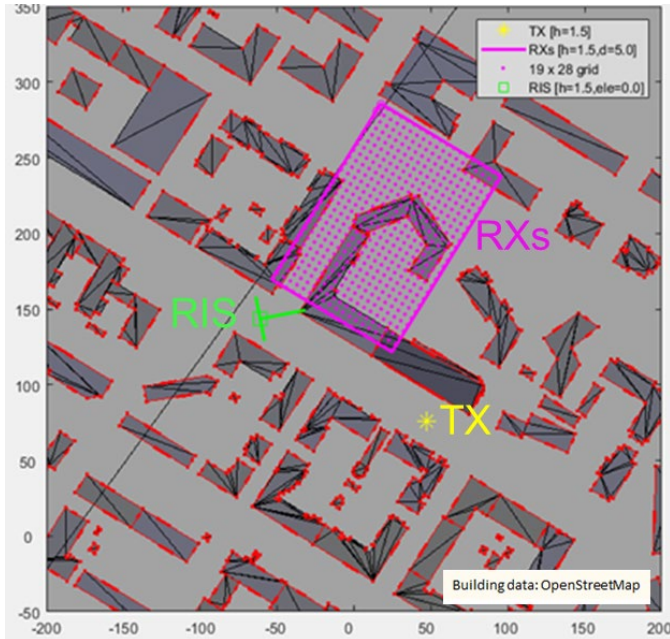


Kuva 4. Älykkään radiopinnan käyttö tutkasovelluksessa.

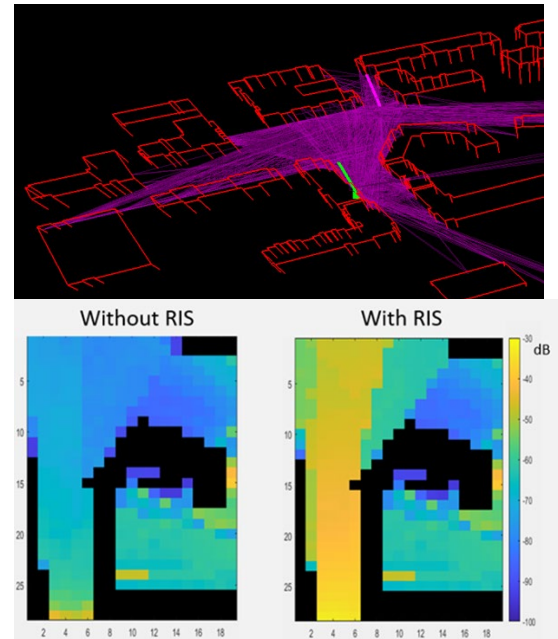


Kuva 5. Älykkään radiopinnan käyttö kulman taakse ulottuvassa tutkasovelluksessa.

Hankkeen tavoitteissa 2 ja 3 keskityttiin tutkimaan älykkään radiopinnan avulla toteutetun keilanmuodostuksen tuomaa signaalin parannusta. Tutkimuksessa sovellettiin Oulun yliopistossa kehitettyä säteenseuranta-algoritmia Oulun Etu-lyötyn kaupunginosan 3D-karttamalliin. Algoritmin antamia kuuluvuusennustetuloksia verrattiin tilanteisiin, joissa radiosignaalia pyrittiin vahvistamaan RIS:n avulla. Kuva 6a esittää erästä simulointitilannetta, jossa rasteroidun alueen sisään eri pisteisiin sijoitettu vastaanotin (RX) kuvaa liikkumista alueella ja lähetin (TX) on paikallaan ajoneuvossa. Älykkäästi ohjattava pinta (RIS) sijaitisi tässä skenaariossa toisessa ajoneuvossa, josta avautuu TX:ää parempi näkymä kohdealueelle. Tulospöytä kuvassa 6b esitetään kuvaan 6a rasteroidulla alueella tapahtuva signaalitason parannus joka saavutetaan, kun signaali ohjataan vastaanottimen sijainnin kannalta optimaalisimpaan suuntaan. Suunta ei välttämättä ole suorin tie RIS:n ja RX välillä, vaan RIS-pinnan heijastama signaali ohjattiin säteenseuranta-algoritmin laskeman vahvimman signaalireitin suuntaan, jolloin saatettiin hyödyntää heijastuksia rakennusten seinistä.

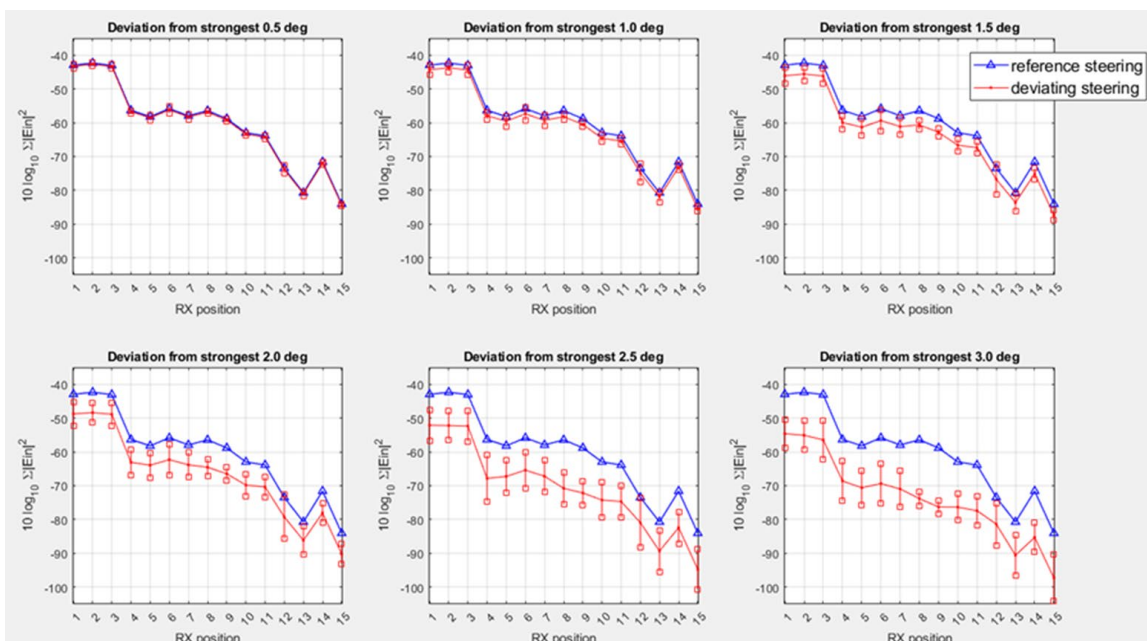


Kuva 6a. Kaupunkiskenaario: Kommunikaatio-tilanne Oulun Etu-Lyötyn kaupunginosassa.



Kuva 6b. Signaalintason kasvu älykästä radiopintaa käytettäessä

Tavoitteeseen 4 liittyy RIS:n teoreettisen suorituskyvyn arviointi. Tässä verrattiin RIS:n koon vaikutusta saavutettavaan vahvistukseen. Simulaatio suoritettiin kiinteällä TX-RX-linkkivälillä, jonka ympäristöön sijoitettiin 1-10 kpl RIS:ejä. Simulointi toistettiin 100000 verkkorealisimulaatiolle. Toinen suorituskykyarviointi suoritettiin tutkimalla RIS:n avulla toteutetun keilansuuntauksen vaikutusta (kuva 7) aiemmin esillä olleessa kaupunkiskenaariossa. Havaitaan, että 3 asteen suuntavirhe huonontaa signaalitasoa 10-15 dB.



Kuva 7. Keilansuuntauksen vaikutus.

#### 4. Tulokset ja pohdinta

Hankkeessa tutkittiin älykkään radiopinnan käyttävyttä radiosignaalin kuuluvuuden parantamiseen. Radiopinnan kontrolloitaviin ominaisuuksiin kuuluu keilanojtaus, joka tässä tutkimuksessa sisältyi säteenseurantasimulaattoriin. Hankkeen yhtenä tuloksena todennettiin ohjausalgoritmin toiminta aiemmin kuvatussa kaupunkiskenaariossa. RIS-pinnan elementtien lukumäärän vaikutus suorituskykyyn on ilmeinen ja todellista hyötyä älykkästä radiopinnasta saavutetaan vasta kun elementtien lukumäärä on luokkaa 1000.

#### 5. Loppupäätelmät

Tutkimuksen simuloinnit suoritettiin 3.5 GHz taajuudella, jolloin aallonpituus on 8.5 cm. Simulaatiossa käytetyn 3D-mallin resoluutio on useita kymmeniä aallonpituuksia, joten tulokset eivät sisällä rakennusten seinäpintojen yksityiskohtien vaikutusta. Tulokset ovat kuitenkin suuntaa-antavina käyttökelpoisia arvioitaessa älykkään radiopinnan käytettävyyttä signaalitason parantamiseen.

Hankkeessa saavutettiin pääosin sille asetetut tavoitteet, vaikkakin tavoitteeksi 4 kirjattu älykkäillä pinnoilla toteutettavien häiveominaisuuksien tarkastelu ja pintojen käyttö tietoliikenteen piilottamisessa ja salauksessa rajoittui vain esiselvitysvaiheessa havaittujen kirjallisuuslähteiden esiintuomiseen.

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

Tutkimushankkeen vaiheen 1 raportti: Älykkäiden radiopintojen kirjallisuusselvitys. Visa Tapio, Veikko Hovinen, Markku Juntti, Joonas Kokkonen ja Juha Pyhtilä, "Survey on Reconfigurable Intelligent Surfaces", Centre for Wireless Communication, Oulun yliopisto 2021.

#### Lähteet:

1. Buzzi et al., "Radar target detection aided by reconfigurable intelligent surfaces," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 28, 2021.
2. Aubry et al., "Reconfigurable intelligent surfaces for n-los radar surveillance," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021.