Tampereen yliopisto

Aktiiviset häiveantenniradomit taajuushyppiviin tutkiin

TkT Mikko Heino

MATINE-hanke 2024-2025, 2. vuosi

Myönnetty MATINE-rahoitus 100 208 €

Agenda

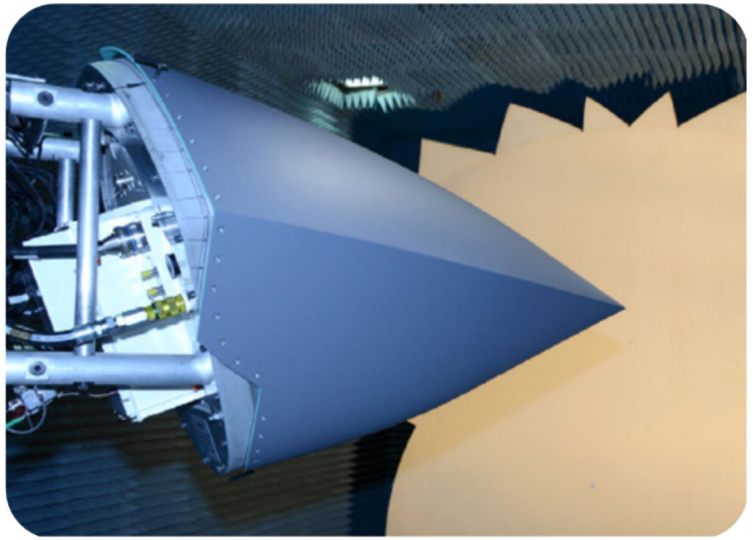
- Tutkimusongelman esittely ja motivaatio
- Menetelmät
- Koko X-kaistan aktiivinen radomi
- Mittausjärjestelmä
- Taajuushyppivä radomi
- Yhteenveto
- Päätelmät

Tutkimusongelma

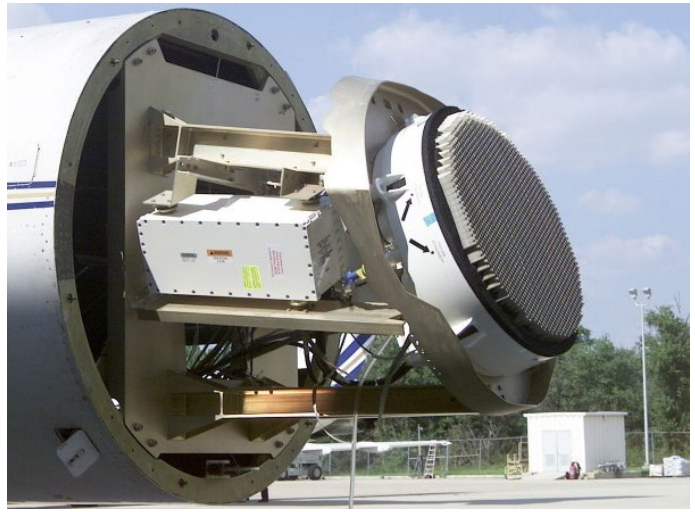
- Tutkaradomit suojaavat tutkan rakennetta
  - Sään vaikutus, tutkan naamiointi, aerodynamiikka
  - Perinteisesti vaikutus säteilyyn minimoitu laajalla kaistalla

- Tutkalla iso tutkapoikkipinta-ala
  - Heijastava metallinen rakenne
  - Resonoiva rakenne, ideaalitapauksessakin puolet tehosta siroaa
  - Vaikutuksen minimointi tutkan kääntämisellä sekä kiinteillä kaistanpäästö-radomeilla

- Tarve piilottaa tutka kun se ei ole käytössä
  - **Tarve säädettäville älykkäille radomeille**
  - Signaalin läpäisy haluttuna aikana tietyllä taajuuskaistalla
    - Muutoin joko absorboiva tai heijastava
  - Taajuushyppivissä tutkissa pulssin keskitaajuus muuttuu



General Dynamics ”Radomes – overview”

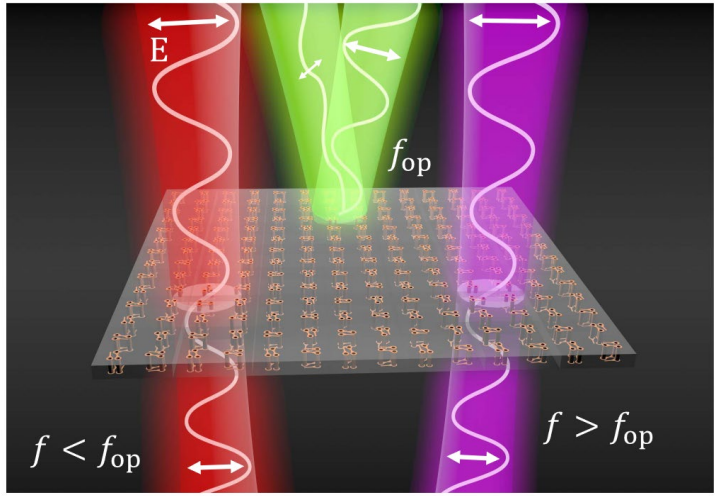


© Northrop Grumman

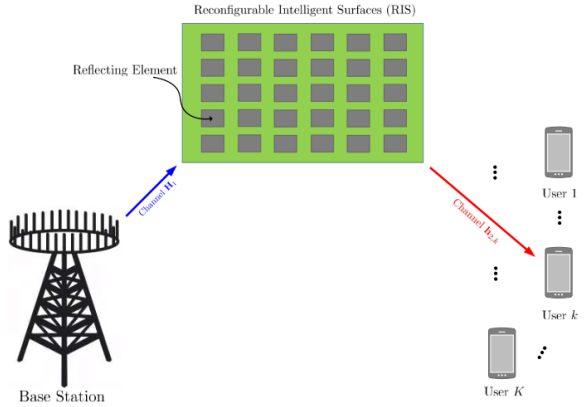
Mahdolliset ratkaisut

- Metamateriaalit
  - Aallonpituutta selkeästi pienemmillä sähköisillä rakenteilla voidaan luoda keinotekoisesti haluttuja sähköisiä ominaisuuksia

- Uudelleenkonfiguroitavat älykkäät pinnat (RIS)
  - Sähköisiä ja magneettisia ominaisuuksia voidaan säätää
  - Myös aallonpituuden kokoluokan elementtejä
  - Heijastus- ja läpäisyominaisuudet muuttuvat



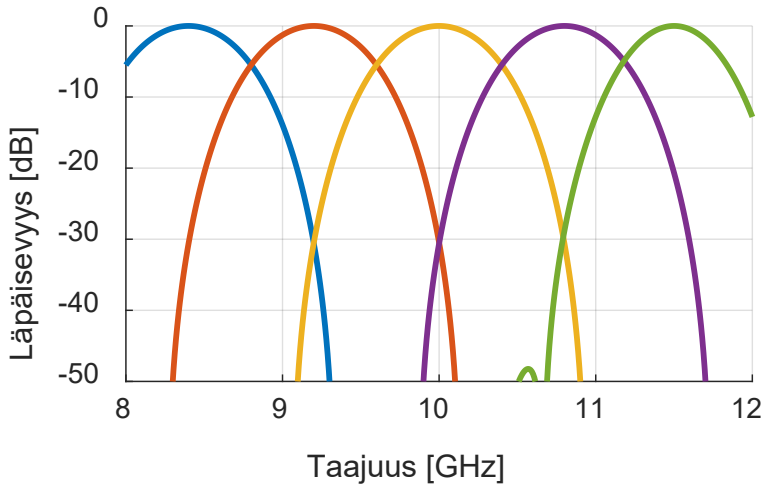
F. S. Cuesta et al., "Planar Broadband Huygens' Metasurfaces for Wave Manipulations," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 12, Dec. 2018



C. Huang et al., "Reconfigurable Intelligent Surfaces for Energy Efficiency in Wireless Communication," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 8, Aug. 2019

Tutkimussuunnitelma

- Suunnitella uusia älykkäitä tutkaradomipintoja
  - **Koko kaistan läpäisy kytkettävissä kerrallaan päälle**
  - **Usea säädettävä päästökaista (esim. yli 5 kpl)**
  - Piirilevyrakenteet, usean eri taajuuden solut, monikerrosrakenteet PIN-diodeilla, säädettävät reaktiiviset komponentit, uudet metamateriaalirakenteet
  - Tulosten verifiointi mittauksin

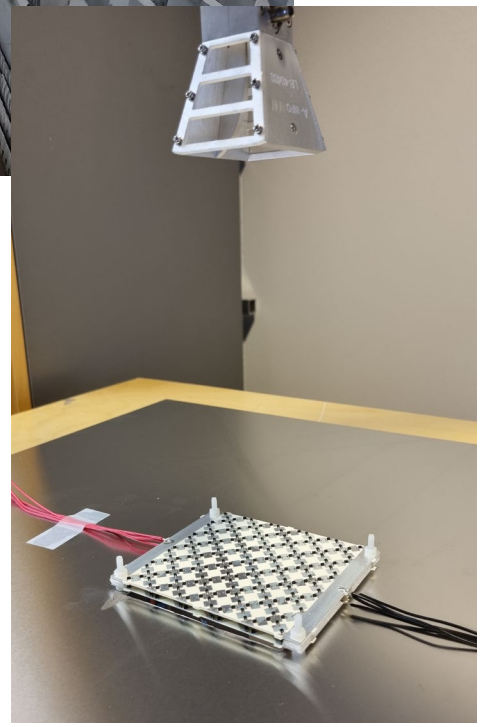


- Vaikuttavuus
  - Mahdollistavat uusien pienemmän havaittavuuden tutkaradomien suunnittelun
  - Tieteellinen uutuusarvo, laaja- ja monikaistaiset rakenteet puuttuvat ja realistinen kahden polarisaation ratkaisu puuttuu

Tutkimusmenetelmät ja kysymykset

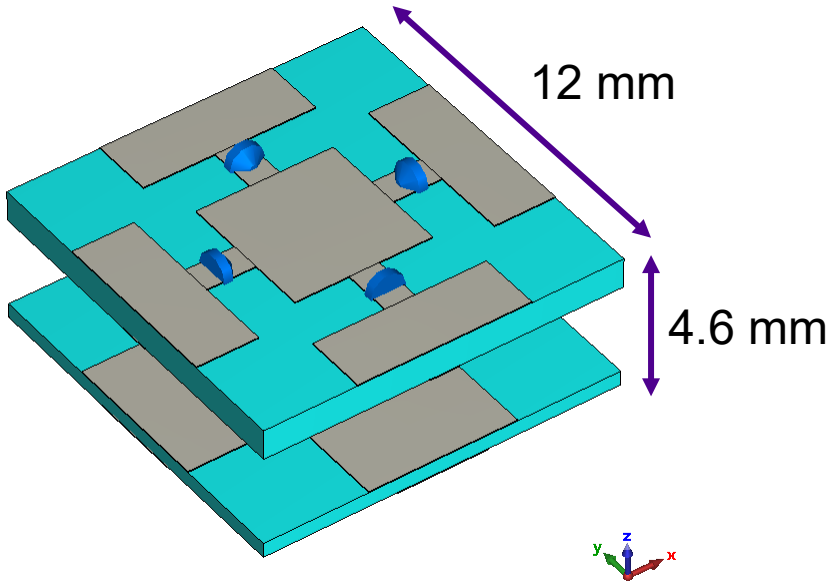
- Sähkömagneettiset simulaatiot
  - Taajuusselektiivisten pintojen suunnittelu ja simulointi sisällyttäen aktiiviset säätörakenteet

- Prototyyppipintojen valmistus sekä mittaus
  - Pääosin aktiivisia tasaisia pintoja piirilevymateriaaleille
  - Läpäisymittaukset



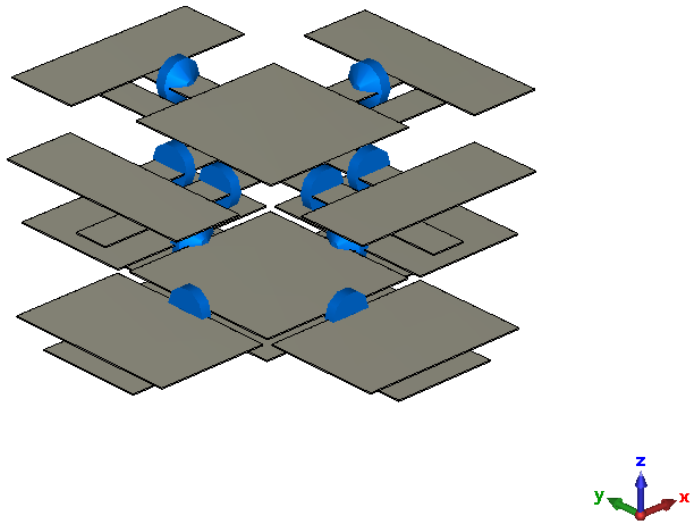
X-kaistan aktiivinen radomi

- X-kaistan (8-12 GHz) aktiivisesti säädettävä radomi
  - Läpäisy kytkettävissä päälle/pois, muutoin absorboiva



Yksikkösolu

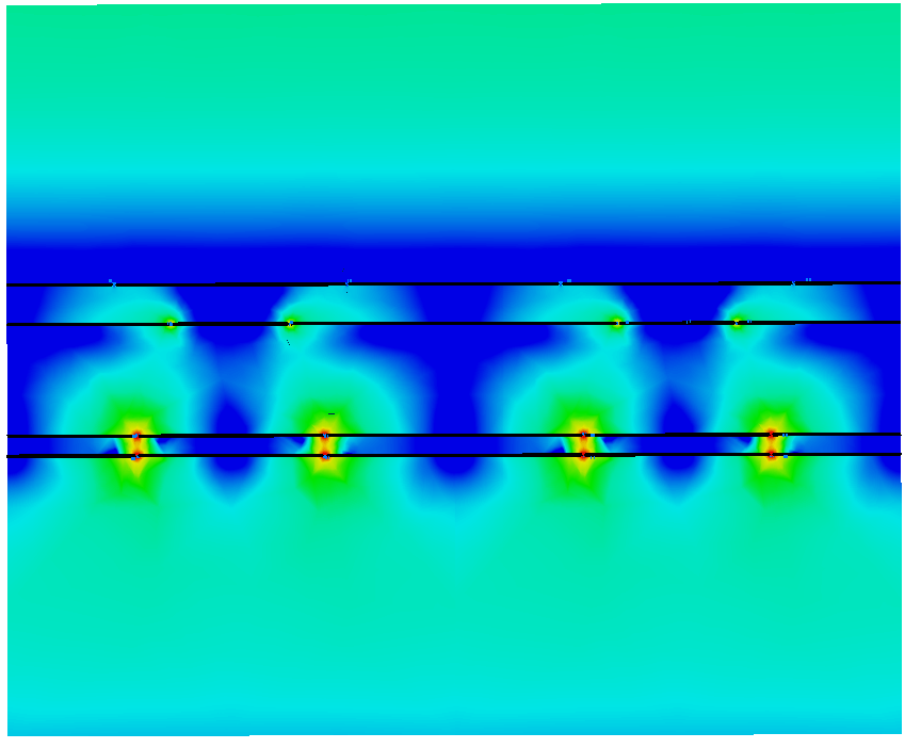
- 4-kerroksen rakenne, joka toteutettu piirilevylle
  - Toimii molemmilla polarisaatioilla
  - Diodien johtavuutta säätelemällä säädetään pinnan läpäisyä
    - OFF-tilassa tehoa palaa diodien resistanssiin, absorptio
  - Perustuu rakenteeseen jossa patch-elementtejä kytketty toisiinsä ristikkäin diodeilla [1]



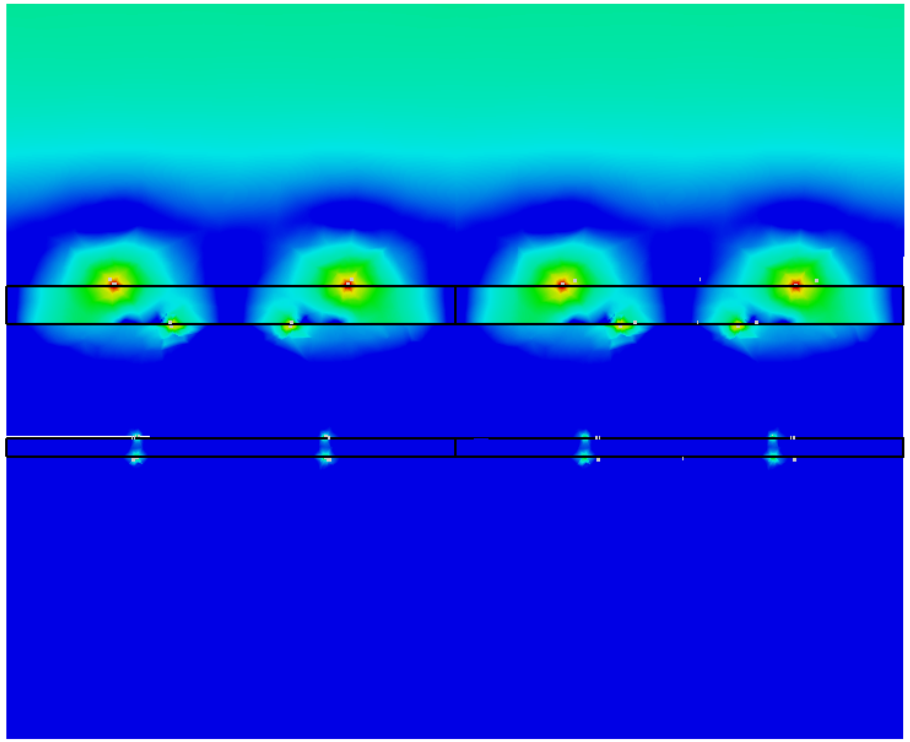
- Pieni heijastavuus ja häviöt rakenteen läpi kilpailevia ominaisuuksia
  - 2 ensimmäistä kerrosta
    - Heijastusten minimointi, ja häviöiden aiheuttaminen
  - 2 seuraavaa kerrosta
    - Läpäisyn minimointi

[1] M. Zhao, M. Zhu, Z. Wu, B. Wang, Y. Wang and Q. Cao, "A Switchable Absorption/Transmission Active Frequency Selective Surface," *2022 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES-China)*, Xuzhou, China, 2022

Toiminta



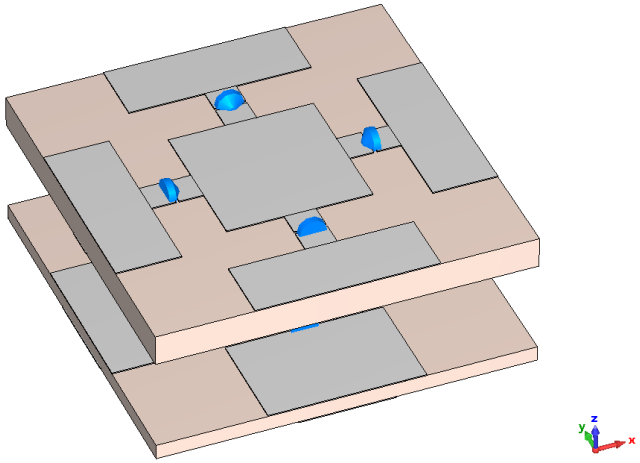
ON-tila

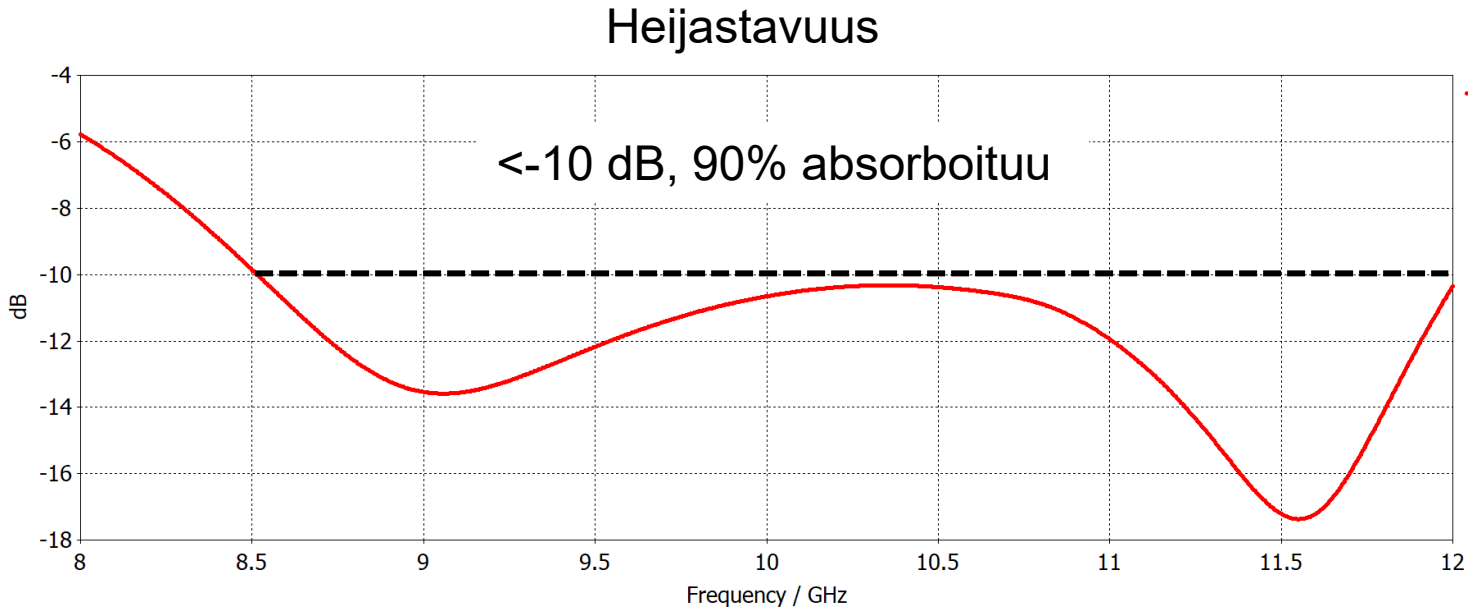


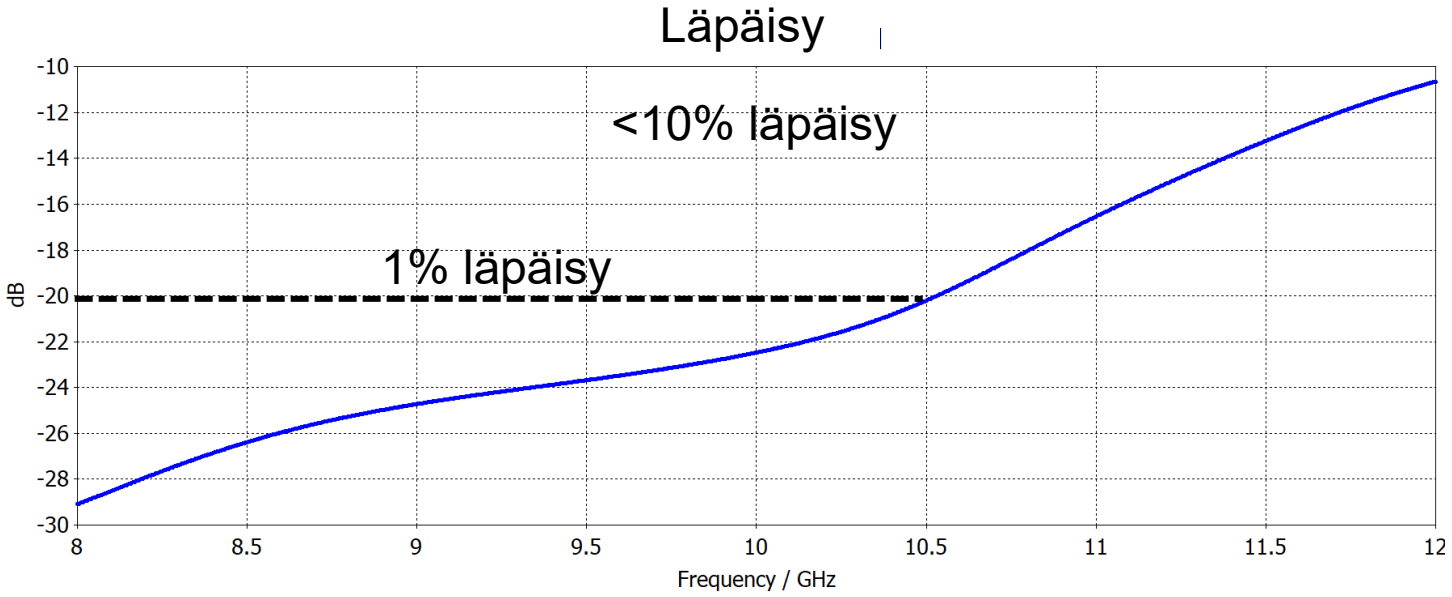
OFF-tila

Tampereen yliopisto

S-parametrit OFF-tilassa

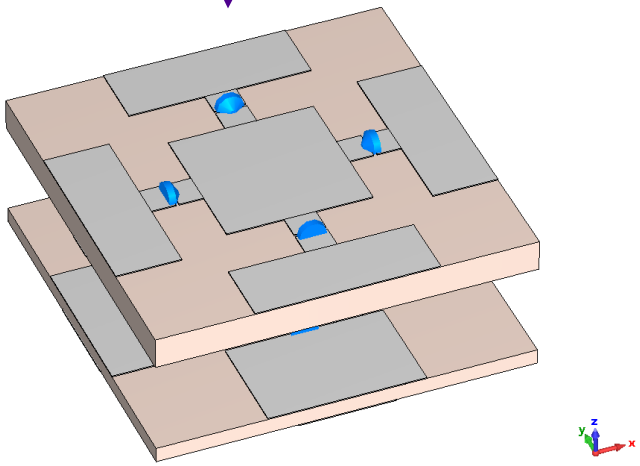


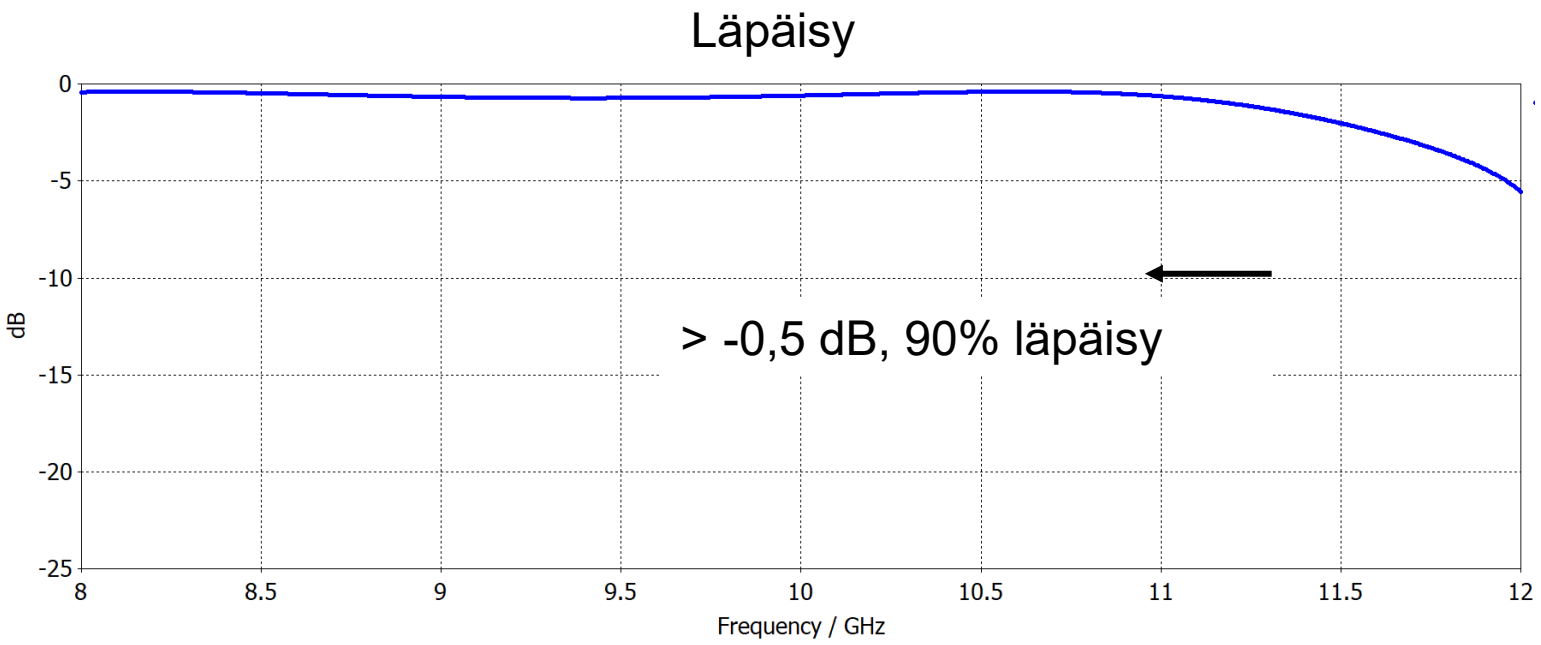


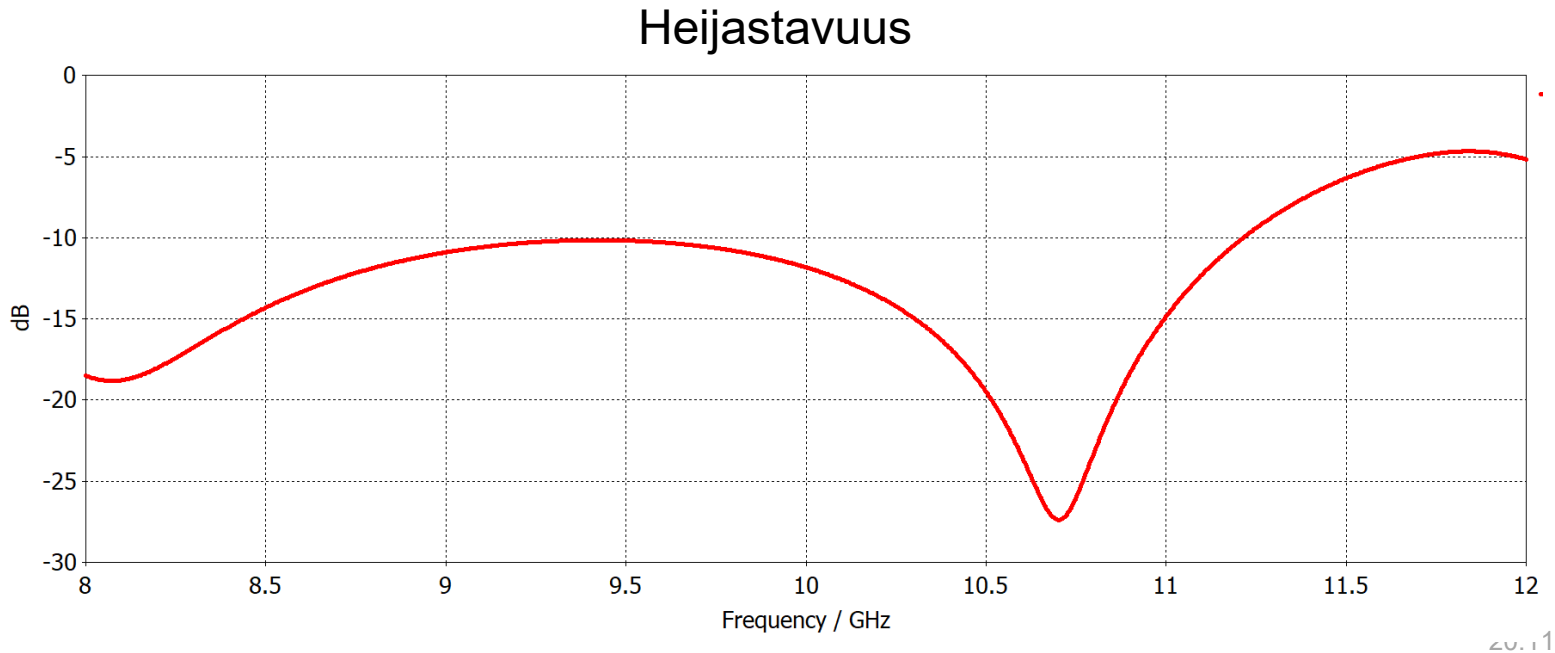


Tampereen yliopisto

S-parametrit ON-tilassa

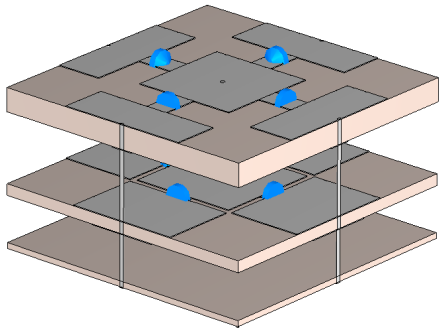


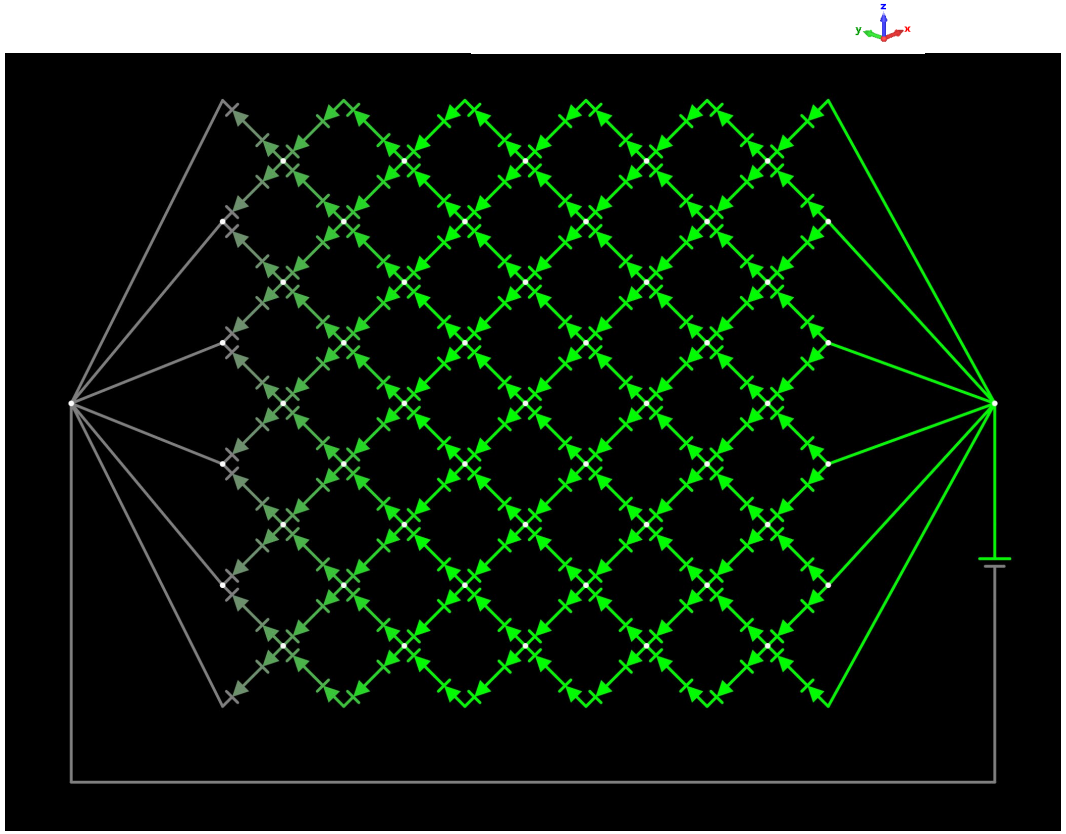




Diodien ohjausverkko

- Haasteena diodien biasointi rakenteessa niin että jokaisen diodin yli sama jännite
  - Ilman ylimääräisiä piirilevykerroksia
- Ratkaisuna 45-asteen kulmaan käännetty verkko jolloin reunoilta syöttämällä identtiset biasointivirrat
  - Biasoi molemmat polarisaatiot
- Jännite skaalautuu koon mukaan
  - 8.5 x 8.5 cm prototyypissä n. 15 V

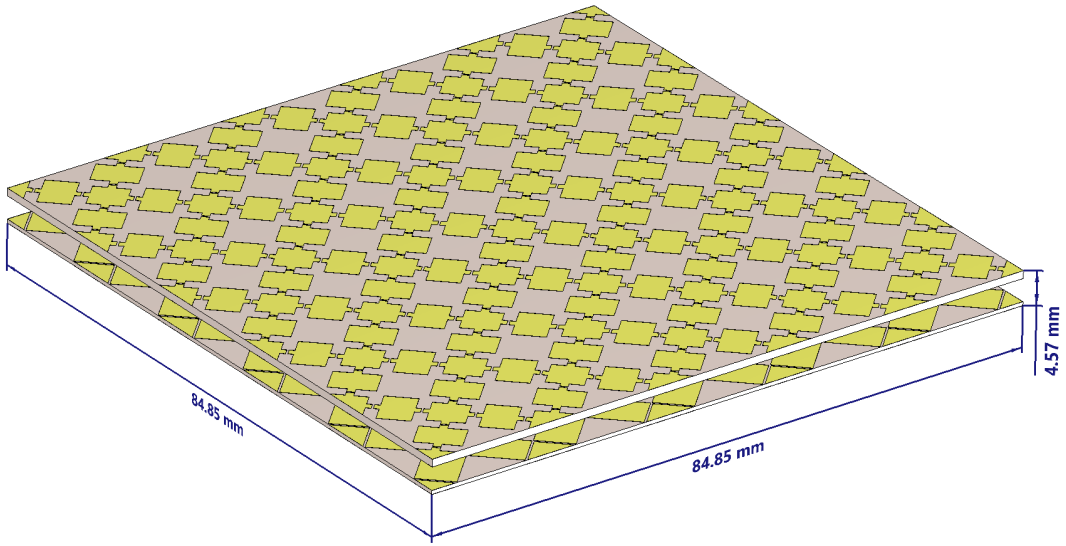




Falstaad piirisimulaattori

Tampereen yliopisto

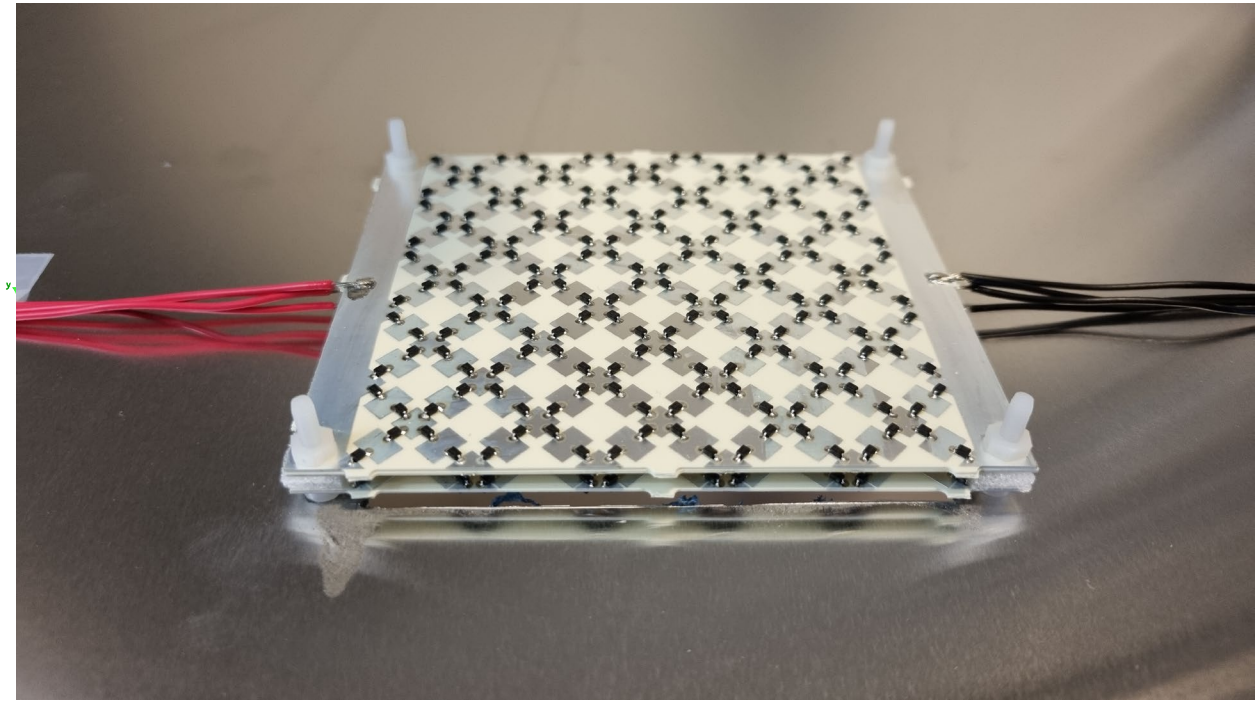
Prototyypin rakenne



1mm Rogers RO4350B

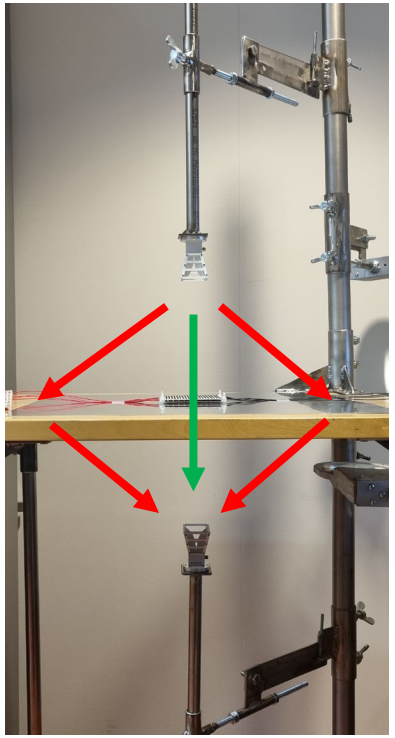
3mm ilma/vaahto

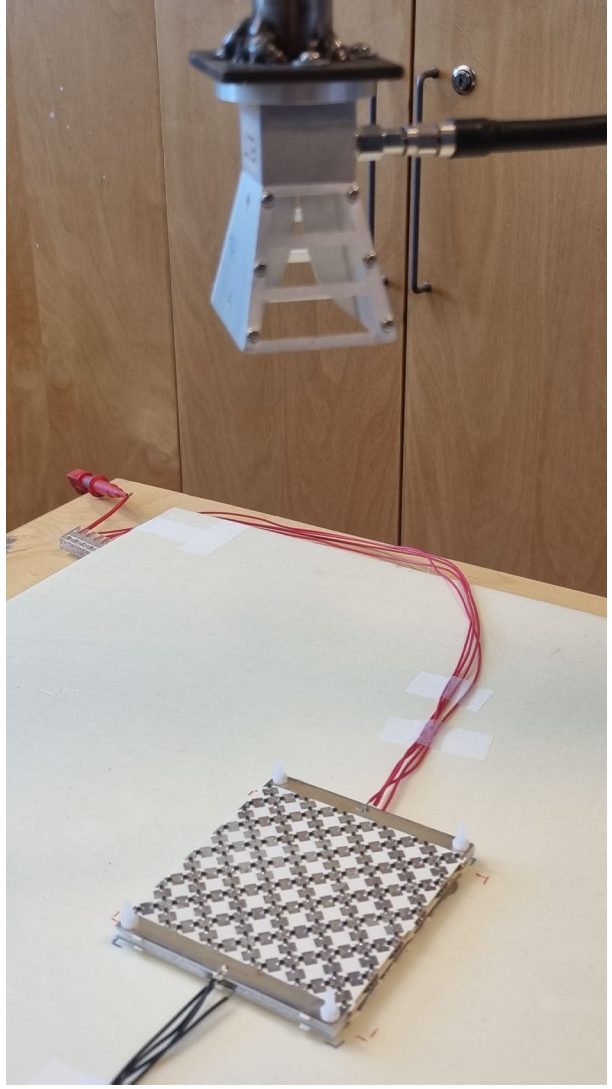
0.5mm Rogers RO4350B



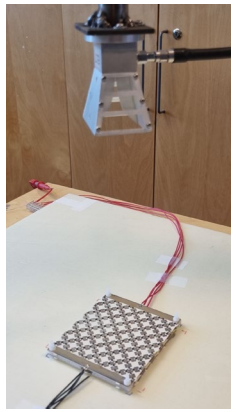
Prototyypin mittausjärjestely

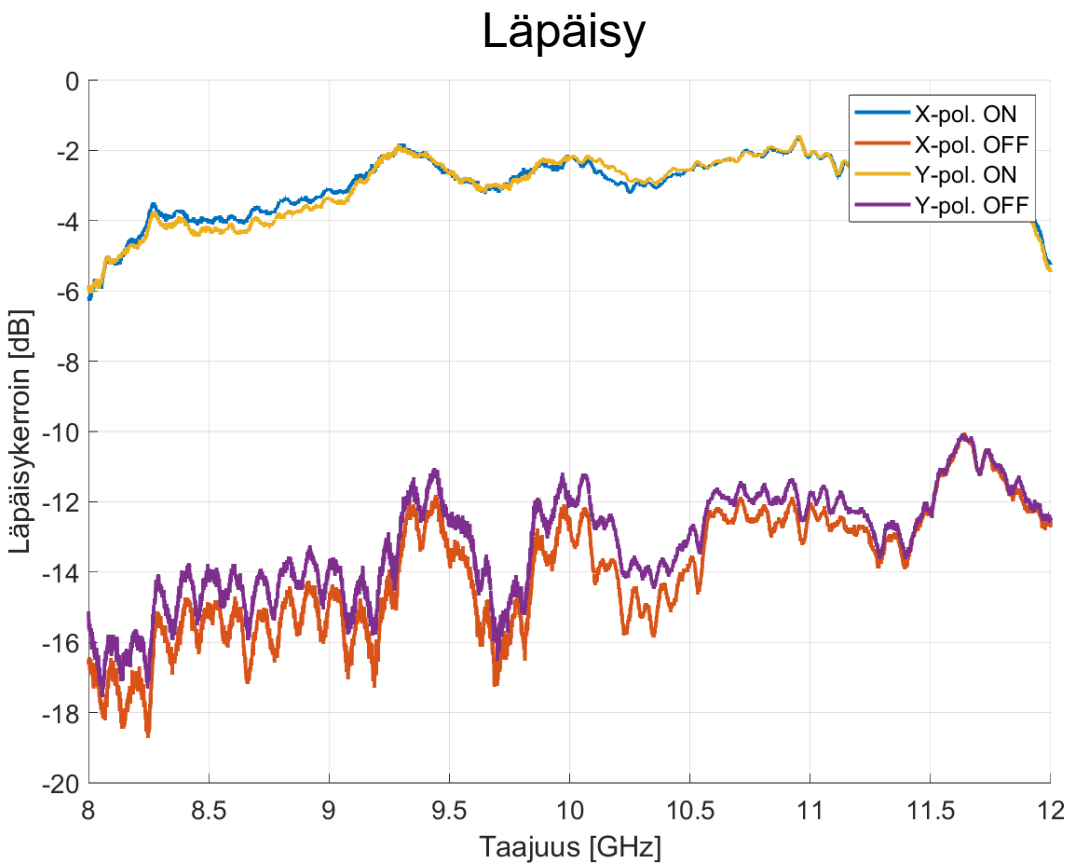
- Kytkimien johtavuuden ohjaaminen DC-jännitteillä levyn reunalta
- Läpäisykertoimen mittaus torviantenneilla mittauspöydän läpi
  - Mittausjärjestelmää kehitetty ensimmäisten mittauksien metallikehyksestä vaahtomateriaaliin
- Kalibrointimittaukset ilman prototyyppiä sekä metallilevyn kanssa
  - Poistaa diffraktion ja ylimääräisen sironnan vaikutukset
- Aikasuodatus tehty mittaustulosten tarkentamiseksi
  - Suodatetaan vain suora läpimenevä signaali

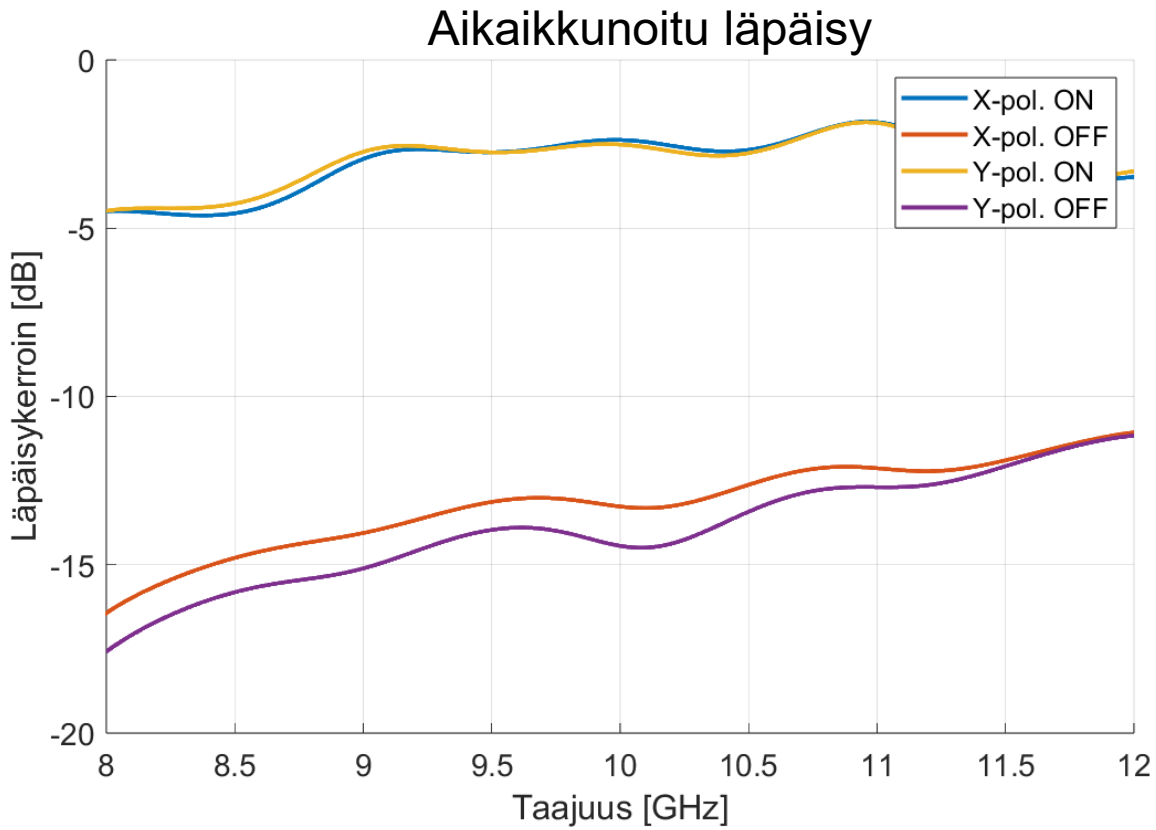




Mittaustulokset



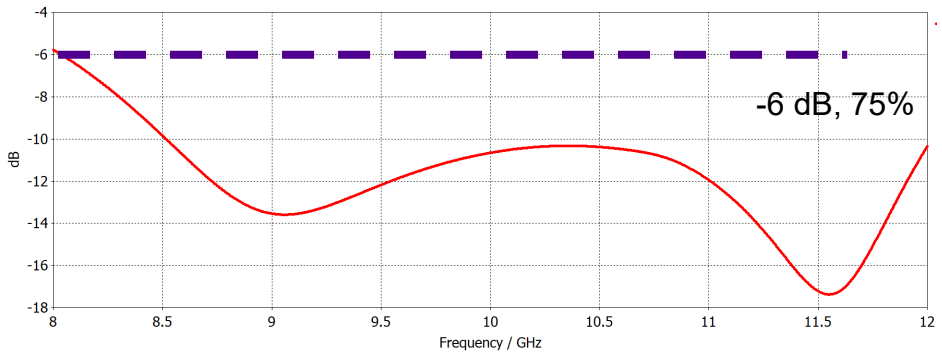


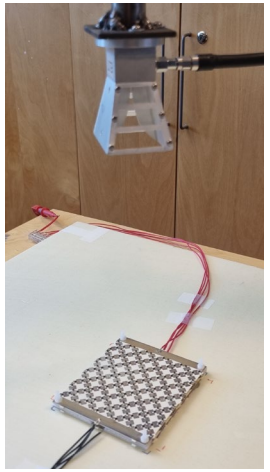


Tampereen yliopisto

Mittaustulokset

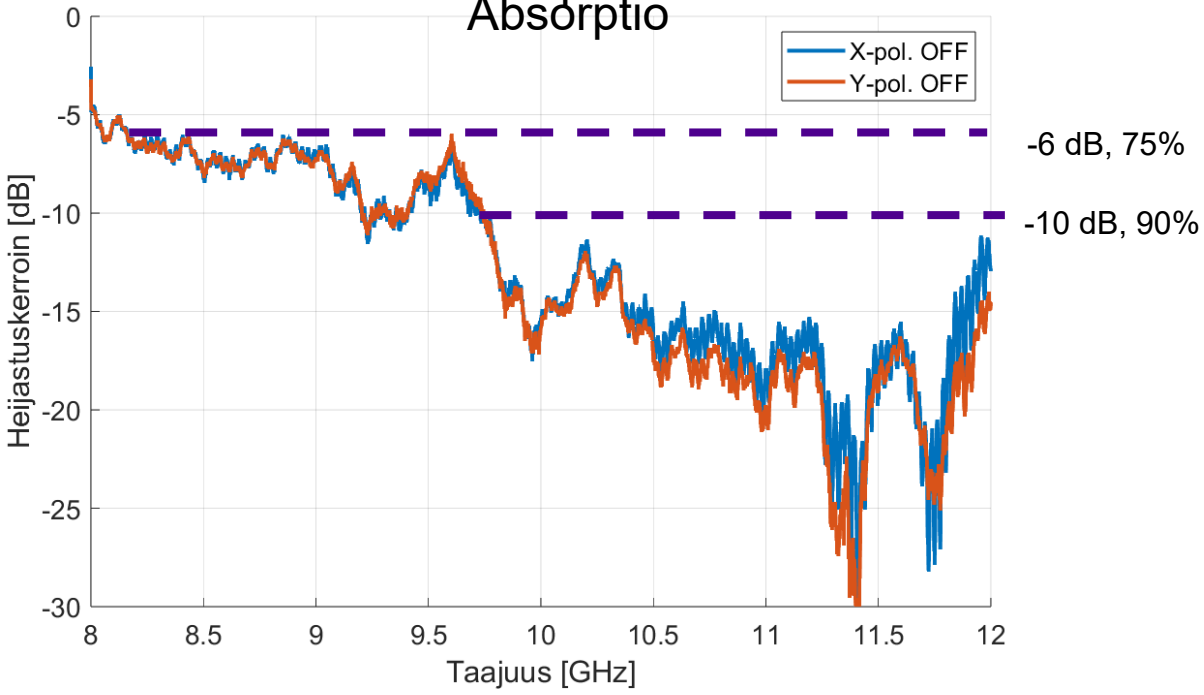
Simuloitu absorptio

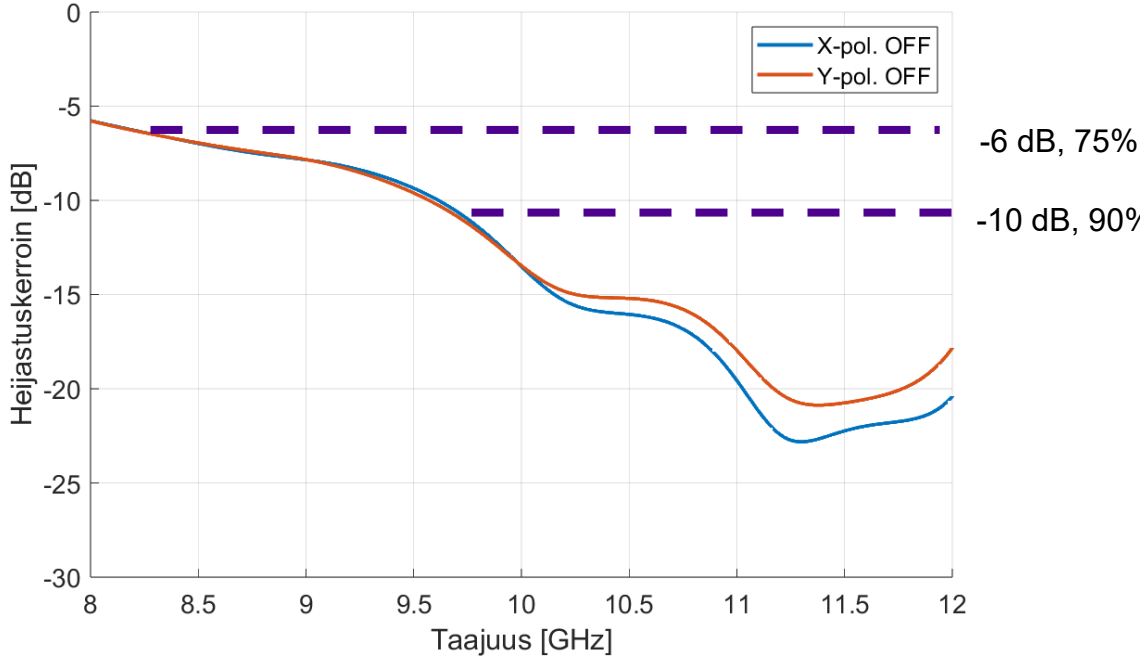




Absorptio

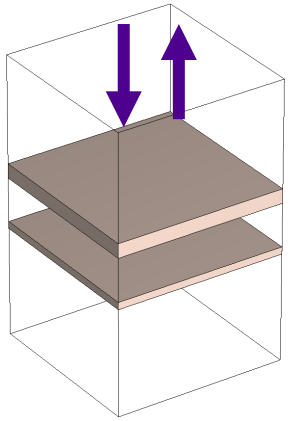
Absorptio

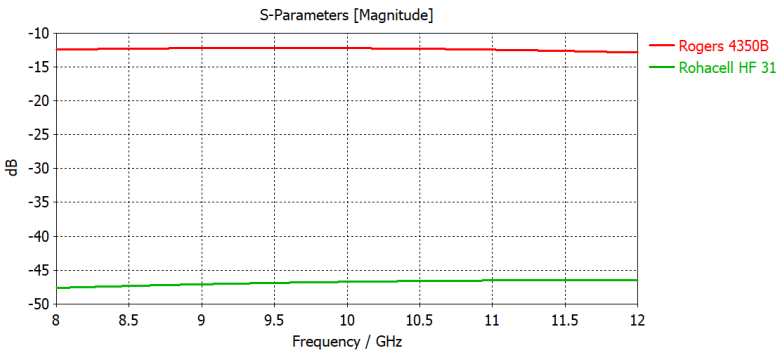




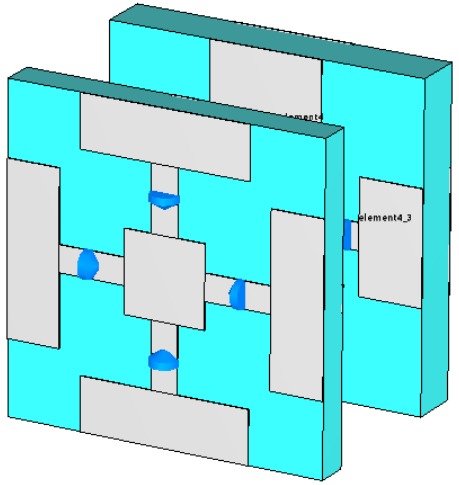
Koko X-kaistan vaahtopohjainen radomi

- Havaittiin että piirilevymateriaali rajoittaa heijastavuuden n. -12 dB tasolle





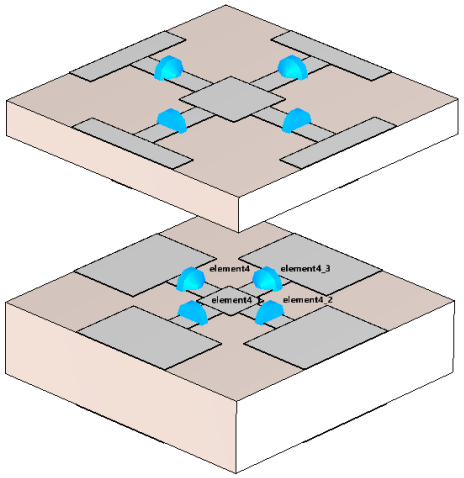
- Rakennetta optimoitiin lisää, n. -19 dB heijastavuus X-kaistalla
  - Piirilevyjen sijaan metallijohtimet Rohacell HF – vaahtomateriaalin päällä



- Valmistusta kokeiltiin suoraan vaahtomateriaalille
  - Johtava maali uppoaa solurakenteeseen vaihtelevassa määrin
  - Kalvolle tulostaminen vaikutti heijastavuuteen

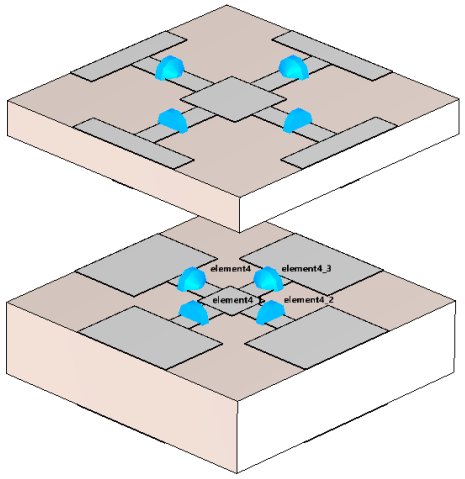
Vaihtoehto vaahtopohjaiselle radomille

- Vaahtomateriaali vaikutti epävarmalta aikatauluun nähden
  - Vaatisi kattavia materiaalikokeiluja
- Kokeiltiin vaihtoehtona Duroid 5880-piirilevymateriaalia
  - Permittiivisyys 2.2 vs 3.7 vanhalla piirilevymateriaalilla, lähempänä ilmaa
- Heijastavuudessa saavutettiin sama n. -19 dB heijastavuus
  - Läpäisyvaimennus parani alakaistalla (8-9.5 GHz)
- Päädyttiin Duroidiin helpomman valmistettavuuden vuoksi

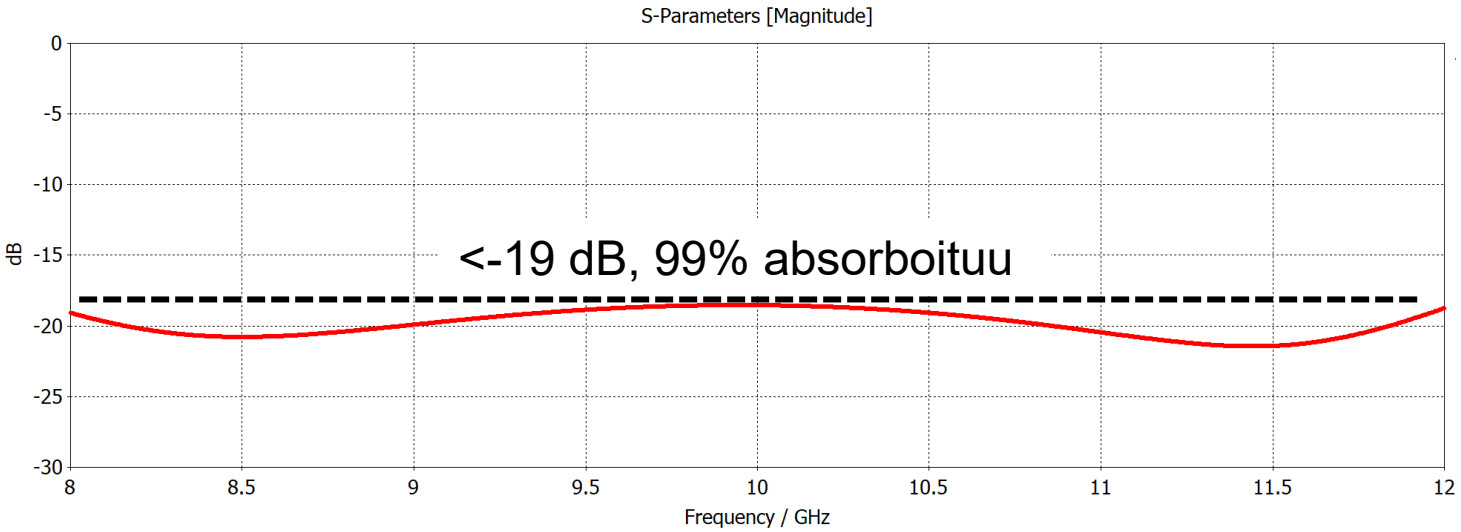


Tampereen yliopisto

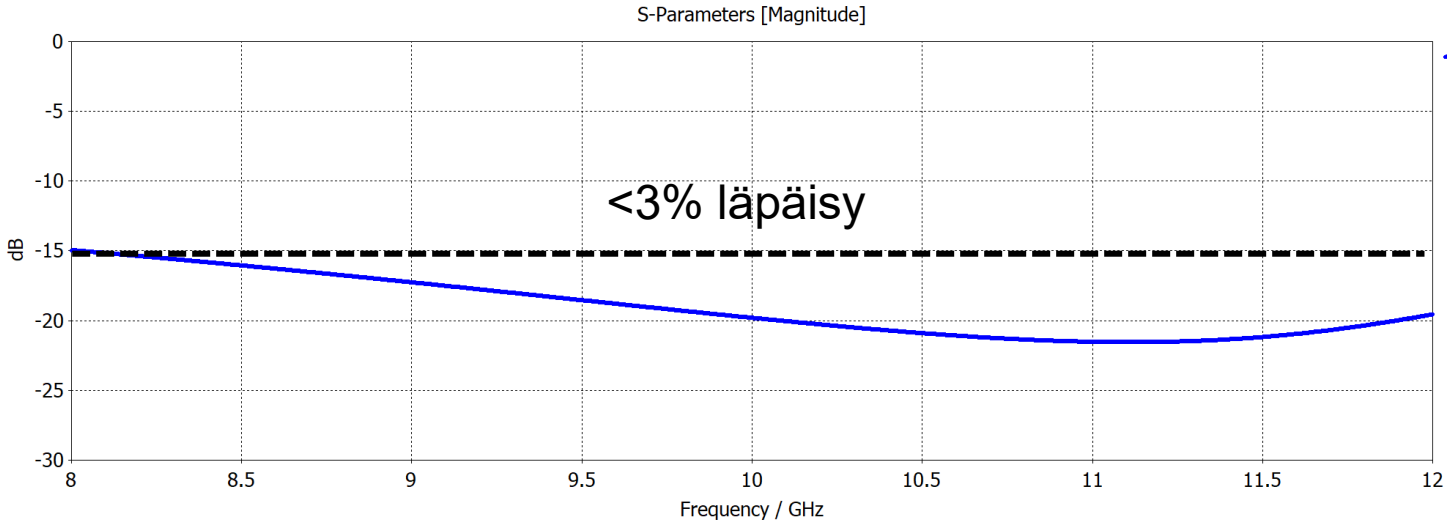
S-parametrit OFF-tilassa



Heijastavuus

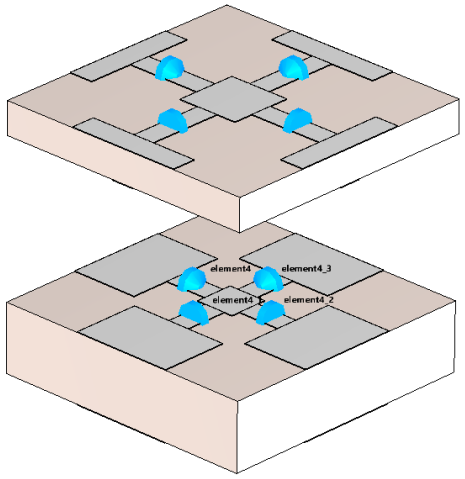


Läpäisy



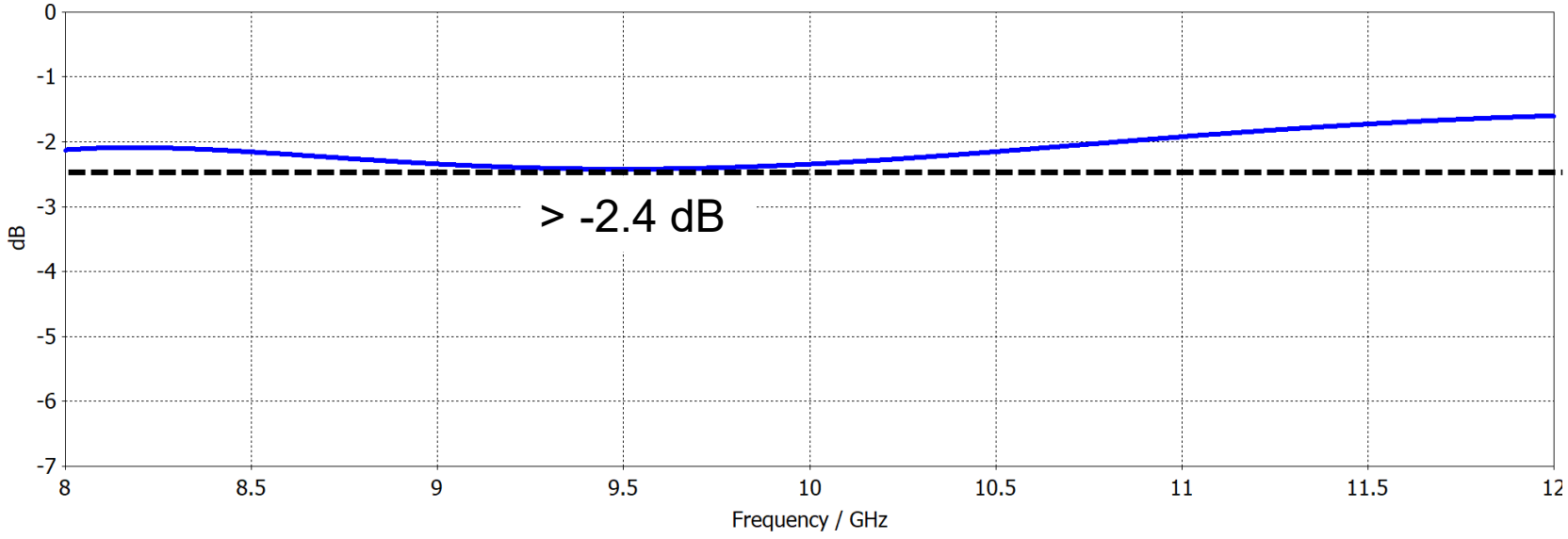
Tampereen yliopisto

S-parametrit ON-tilassa

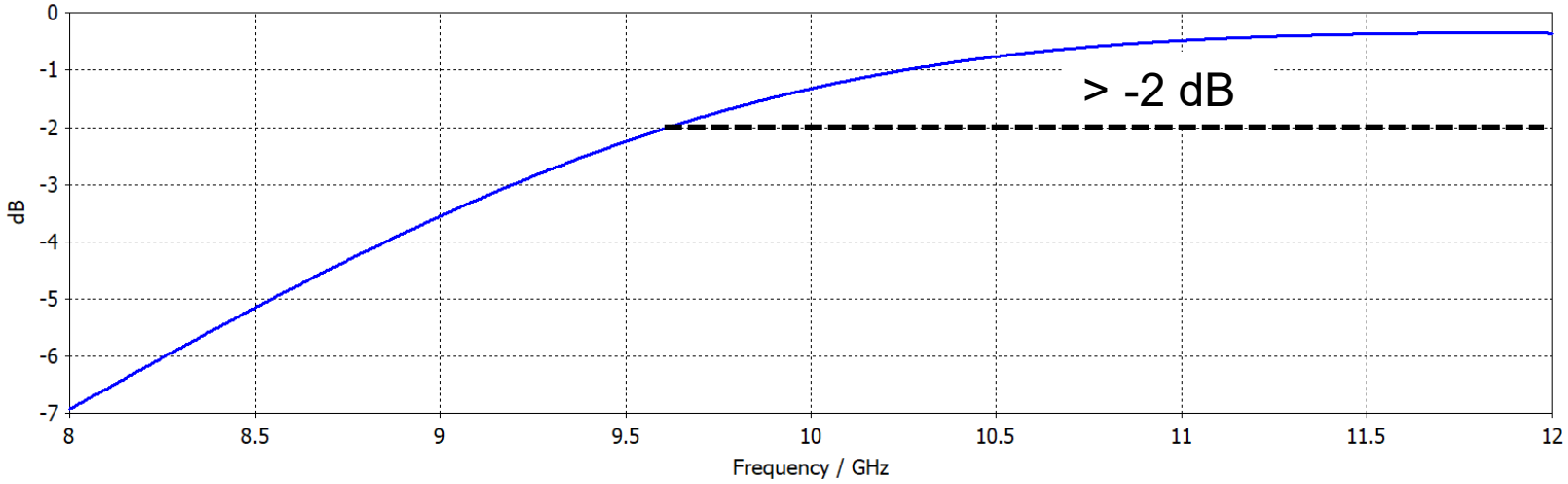


Läpäisy

Rogers Duroid



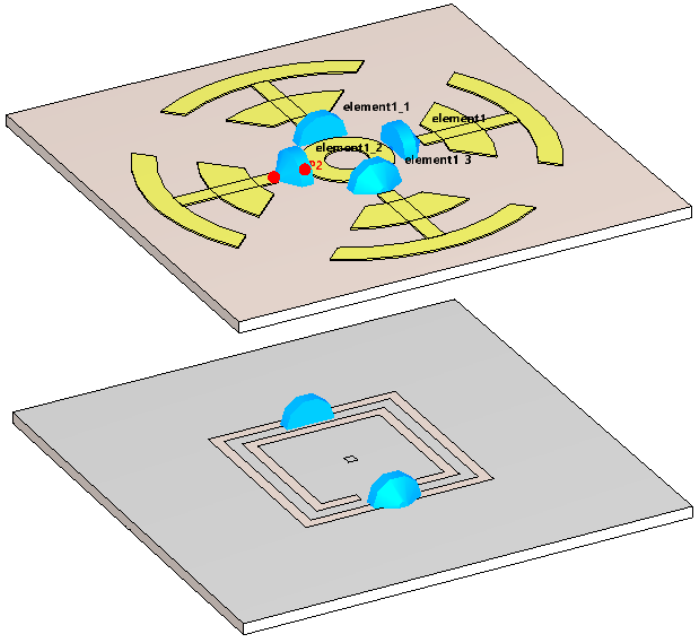
Vaahtomateriaali

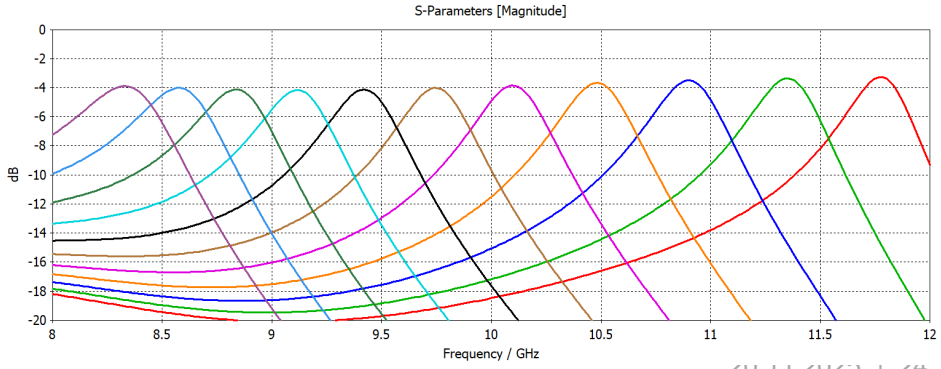


Absorboiva radomi taajuushypintään

- Absorboivat metamateriaalit toimivat maatason avulla
  - Maataso ei mahdollista läpäisyä

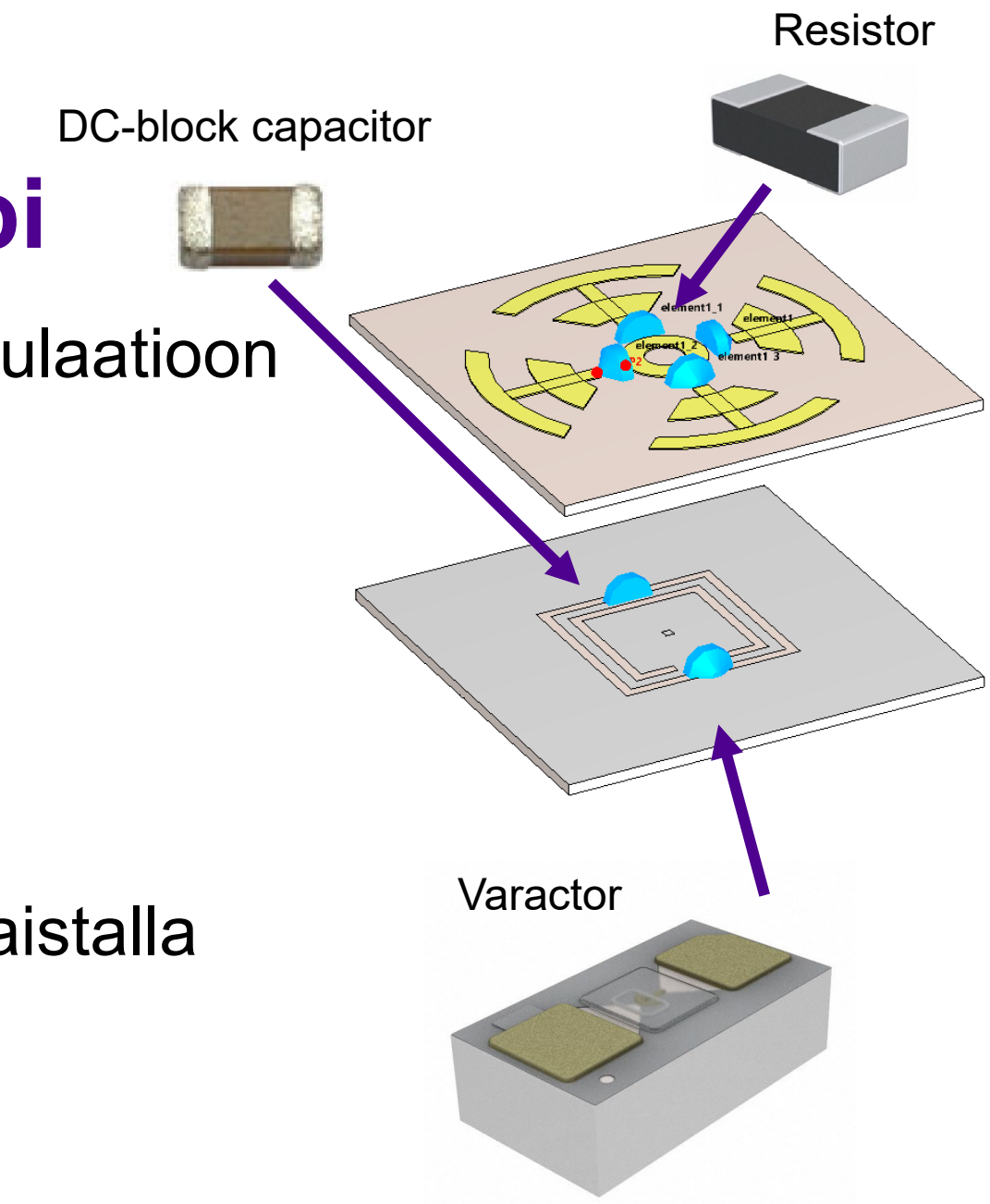
- Lähtökohtana kaksoispolarisoitu absorberirakenne
  - Lisätty varaktorilla säädettävä taajuusselektiivinen maataso, kytkentänopeus > 100 MHz
  - Absorptio katoaa kapealla kaistalla ja rakenne päästää läpi säteilyn



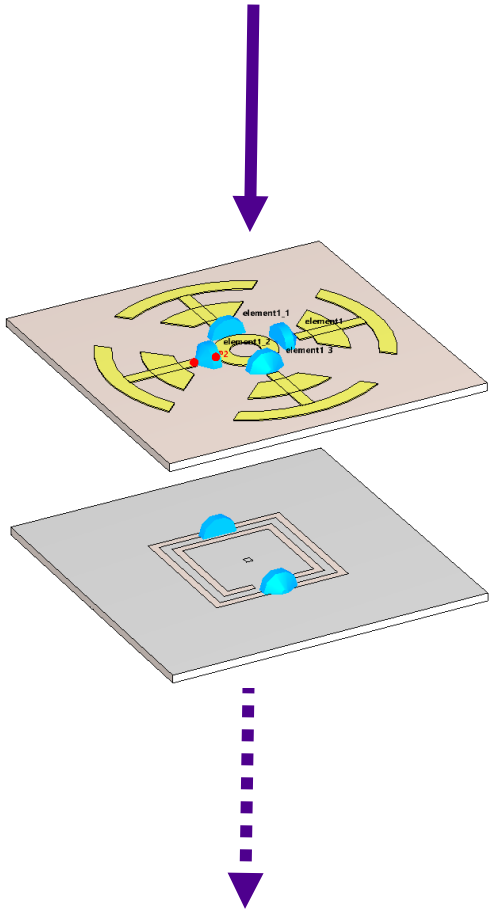


Taajuushyppivä prototyyppi

- Oikeiden komponenttien lisääminen simulaatioon toi lisähaasteita
  - Äärelliset kapasitanssin arvot
- Valittu Macom MAVR–varaktori
  - Säätoalue 0.03-0.2 pF, 12-0 V jännitteellä
- Keskitytty taajuushypintään 8-10 GHz kaistalla

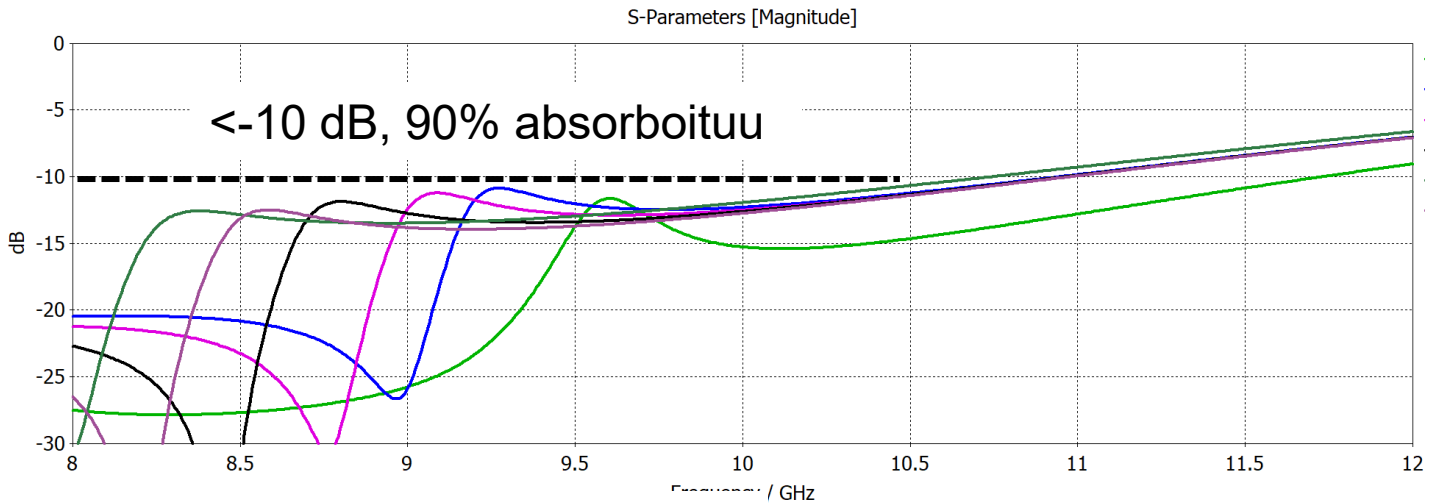


S-parametrit ON-tilassa

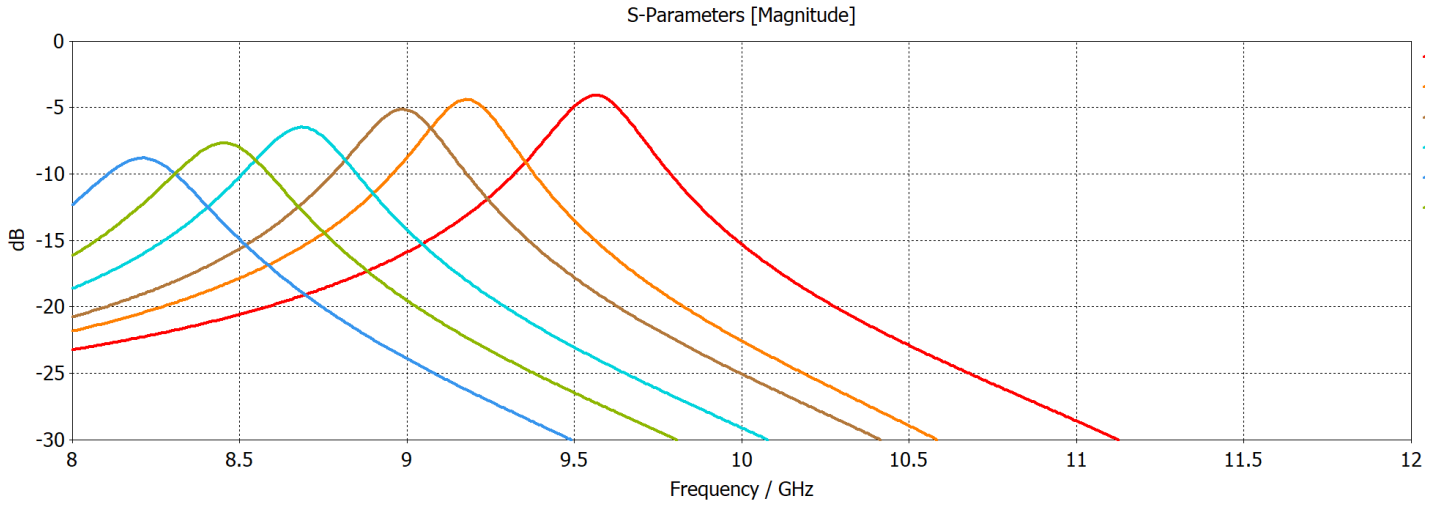


Heijastavuus

C=0.03pF – 0.2 pF



Läpäisy



Yhteenveto

- Koko X-kaistan prototyyppi valmistettu ja mitattu
  - **90% absorptio** 9.7-12 GHz kaistalla molemmille polarisaatioille OFF-tilassa
    - **75 % absorptio** 8.2-9.7 GHz kaistalla
    - **2 dB läpäisyhäviö** kaistan keskellä
- Jatkokehitetty koko X-kaistan prototyyppi simuloitu
  - **98% absorptio** koko kaistalla, vastaa passiivisia absorbereita
  - Voidaan toteuttaa kevyemmällä piirilevymateriaalilla
- Absorboivasta taajuushyppivästä rakenteesta prototyyppi
  - Kaistan ulkopuolella **90% absorptio**
  - Vielä yli 5 dB läpäisyhäviö realistisilla komponenteilla, 100-300 MHz päästökaista

- Tieteellinen uutuusarvo
  - -10 dB kytkettävää absorptiota ei aiemmin saavutettu laajalla kaistalla
  - Realistisia mitattuja rakenteita ei esitetty kahdelle polarisaatioille
  - Jatkuvasti säädettävää taajuushyppivää radomia ei julkaistu

Päätelmät

- Koko X-kaistan aktiivinen radomi vaikuttaa lupaavimmalta
  - Potentiaalia jatkokehitykseen ja kokeiluun yhdessä tutkien kanssa
  - Yli 90% absorptio absorboivassa tilassa. Pienentää tutkapoikkipinta-alaa merkittävästi.
  - 2-3 dB läpäisyhäviö kun läpäisevässä tilassa. Voidaan pienentää optimoimalla materiaaleja.
  - Seuraavan sukupolven radomit

- Taajuushyppivä absorboiva radomi
  - Komponenttien häviöt aiheuttavat haasteita
  - Vielä suurempi >5 dB läpäisyhäviö
  - Potentiaalia jatkokehitykselle