

PE-menetelmä ja kanavoituminen kolmessa ulottuvuudessa

**MATINE-rahoitus: 94944 euroa
Hankkeen kesto: 2025–2026**

Tommi Dufva, Arto Hujanen

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

20. marraskuuta 2025 VTT – beyond the obvious

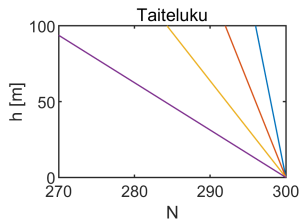
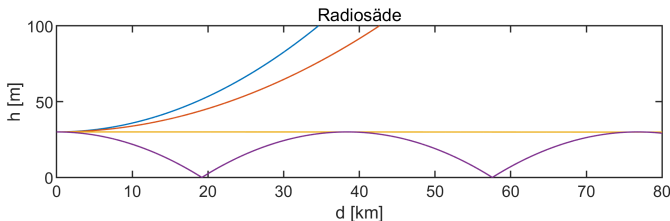
Tutkimuksen aihe ja tavoite

Kanavoituminen

Radioaallot eivät etene troposfäärissä suoraviivaisesti, mikä johtuu troposfäärin taitekertoimen epähomogeenisuudesta.

Standarditroposfäärissä taitekerroin pienenee hitaasti korkeuden funktiona, mikä saa radioaallon kaartumaan loivasti alaspäin.

Jos taitekerroin pienenee korkeuden funktiona riittävän nopeasti, radioaalto kaartuu alaspäin jyrkemmin kuin maanpinta. Tällöin radioaalto voi edetä maanpinnan lähellä huomattavasti tavanomaista kauemmaksi. Tätä kutsutaan kanavoitumiseksi.



Moskva-laivan uppoamisen jälkianalyysi¹

Ukraina upotti Venäjän Moskva-laivan Mustallamerellä huhtikuussa 2022.

Moskvan on arvioitu olleen tutkasta etäisyydellä noin 135 km, eli selvästi radiohorisontin takana.

Jälkeenpäin analysoitujen säätietojen ja niiden pohjalta suoritettujen radioaallon etenemislaskelmien perusteella on päätelty, että tapahtumahetkellä vallitsi säätila, joka mahdollisti radioaaltojen kanavoitumisen.

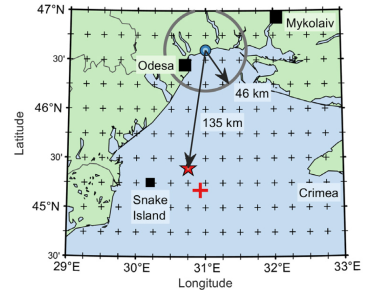


Fig. 2. Map over the Black Sea showing assumed positions of the Mineral-U radar (blue circle) and the warship *Moskva* (red star) at the time of the anti-ship missile launch. A gray circle shows the radar horizon, 46 km from the radar. A large red plus sign marks where the *Moskva* was located by satellite at 1852 LT 13 Apr 2022. Small black plus signs show grid points of the ERA5 reanalysis dataset.

¹L. Norin, N. Wellander, A. Devasthale, "Anomalous Propagation and the Sinking of the Russian Warship *Moskva*," *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 104, no. 12, pp. E2286–E2304, 2023.

PE-menetelmä

Parabolic equation (PE) -menetelmä on soveltuvien menetelmä troposfäärissä etenevän radioaallon mallintamiseen.

Menetelmä on suhteellisen kevyt, etenkin ongelman kokoluokka huomioiden, mutta myös melko tarkka, tietyin rajoituksin.

Epähomogeenisen taitekertoimen lisäksi menetelmällä on mahdollista huomioida maan- tai vedenpinnan sekä maaston vaikutuksia radioaallon etenemiseen.

Kolmas ulottuvuus

Kirjallisuudessa PE-menetelmä esitetään yleensä kahdessa ulottuvuudessa olettaen, että

- radioaallon lähde on pystysuuntainen sähkö- tai magneettidipoli
- troposfäärin taitekerroin, maaston muodot sekä maan- ja vedenpinnan sähköiset ominaisuudet eivät muutu atsimuuttisuunnassa radioaallon vaikutusalueella

Kolmiulotteisesta PE-menetelmästä on oletettavasti hyötyä, jos

- troposfäärin taitekerroin muuttuu voimakkaasti atsimuuttisuunnassa
- lähteen ja tarkastelupisteen välissä on kapeita saaria, saaren tai mäen jyrkkiä reunoja tms.
- tutka katselee samanaikaisesti laajalle atsimuuttialueelle (esim. AESA-tutka)
- lähteen ja tarkastelupisteen välissä on rakennuksia, rakennelmia, tuulivoimaloita tms.

Tutkimuksen tavoite

Tutkimuksen tavoite on yleistää PE-menetelmä aidosti kolmeen ulottuvuuteen.

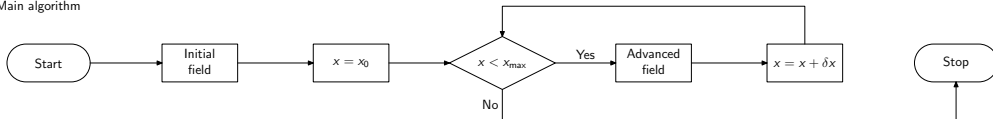
Kaikki saa riippua vapaasti kolmesta paikkamuuttujasta:

- lähde
- troposfäärin taitekerroin
- maaston muodot
- maan- ja vedenpinnan sähköiset ominaisuudet
- kenttä

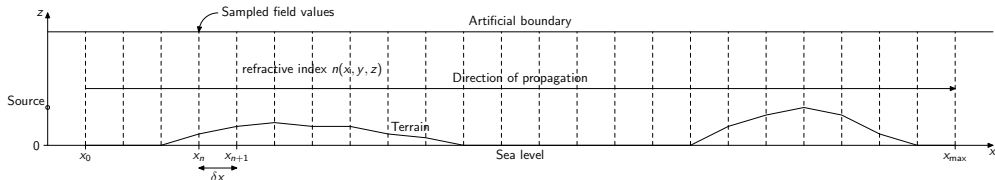
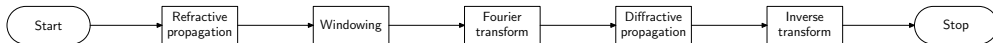
Tutkimuksen tuloksia

PE-SSF-menetelmä

Main algorithm



Advanced field



PE-menetelmän teoria karteesisessa koordinaatistossa (1/2)

Aaltoyhtälö Maxwellin yhtälöistä:

$$\left(\nabla^2 + k_0^2 n^2\right) \mathbf{E} \approx 0$$

Parabolinen yhtälö:

$$\left(\partial_x - i\sqrt{\nabla_{\perp}^2 + k_0^2 n^2}\right) \mathbf{E} = 0$$

“Wide angle”-approksimaatio:

$$\left[\partial_x - ik_0\sqrt{1 + \frac{1}{k_0^2}\nabla_{\perp}^2} - ik_0(n-1)\right] \mathbf{E} \approx 0$$

PE-menetelmän teoria karteesisessa koordinaatistossa (2/2)

Vaihetekijän erotus:

$$\mathbf{E} = e^{ik_0 x} \mathbf{U}$$

Muodollinen ratkaisu:

$$\mathbf{U}(x + \delta x, y, z) = \exp \left[ik_0 \left(\sqrt{1 + \frac{1}{k_0^2} \nabla_{\perp}^2} - 1 \right) \delta x \right] \exp[ik_0(n-1)\delta x] \mathbf{U}(x, y, z)$$

Fourier-muunnos:

$$\mathbf{U}(x, y, z) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_R dk_y \int_R dk_z e^{ik_y y} e^{ik_z z} [\mathbf{u}_d(x, k_y, k_z) + (-\hat{x}\hat{x} - \hat{y}\hat{y} + \hat{z}\hat{z}) \cdot \mathbf{u}_d(x, k_y, -k_z)]$$

Laskentaesimerkki

Lähde:

Taajuus 9.4 GHz
 Korkeus merenpinnasta 30 m
 Aperttuurin koko 3.6 m × 0.8 m
 Vaakapolarisaatio

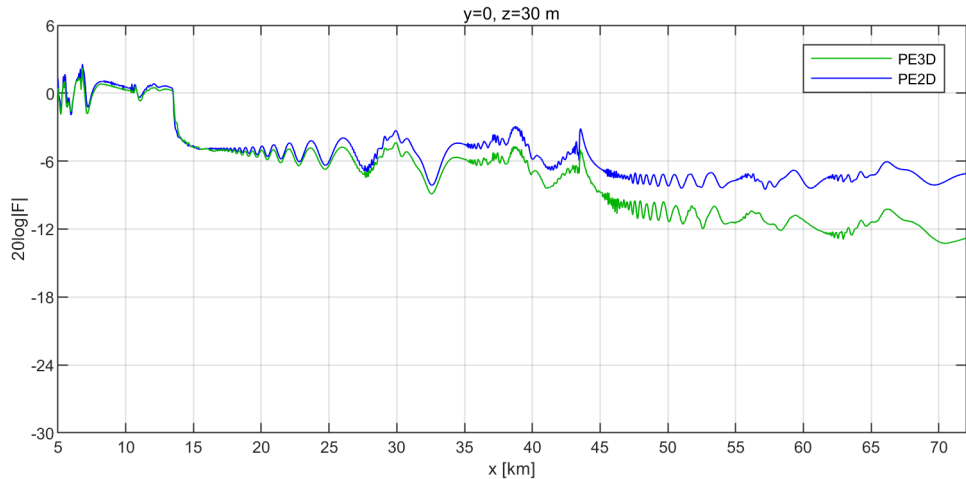
Maaston korkeusmalli Maanmittauslaitoksen Karttapaiikka-palvelusta:



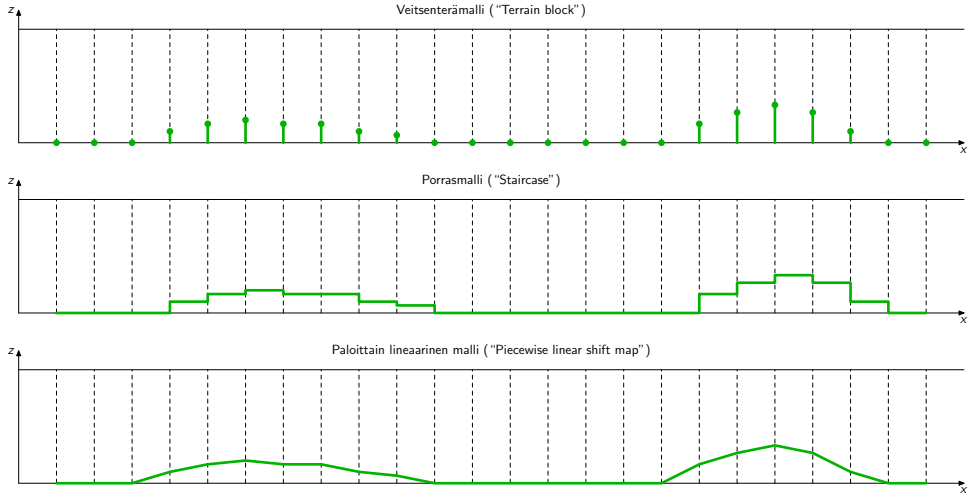
Ilmakehä: $n = 1.000300 - 0.000160 \frac{1}{\text{km}} z - 0.000040 \frac{1}{\text{km}} y$

Laskenta-alue:

$dx = 50 \text{ m}$ $X = 72 \text{ km}$
 $dy = 0.4 \text{ m}$ $Y = 2^9 \cdot 0.4 \text{ m} \approx 200 \text{ m}$
 $dz = 0.4 \text{ m}$ $Z = 2^9 \cdot 0.4 \text{ m} \approx 200 \text{ m}$

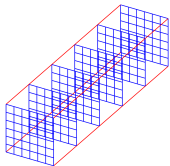


Maaston mallintaminen

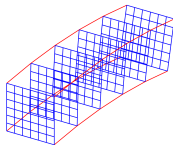


Koordinaatistoja

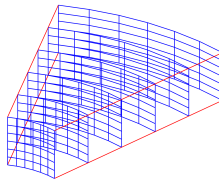
karteesinen



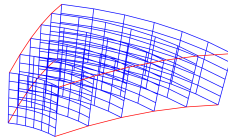
vaakasuuntainen sylinteri



pystysuuntainen sylinteri



pallo



Tutkimuksen jatko ja hyödyntäminen

Tutkimusaiheita toiselle vuodelle

PE-menetelmä formulointi ja toteutus eri koordinaatistoissa

- vaakasuuntainen sylinterikoordinaatisto
- pystysuuntainen sylinterikoordinaatisto
- pallokoordinaatisto

Maaston mallintaminen kolmessa ulottuvuudessa

- porrasmalli
- paloittain lineaarinen malli
- hybridimalli

Maan- ja vedenpinnan sähköisten ominaisuuksien huomioiminen

- homogeeninen pinta
- epähomogeeninen pinta

FESPAN²

VTT johtaa EDF 2023 -hanketta "Forecasting Electromagnetic Signal Propagation Anomalies" (FESPAN).

Hankkeessa kehitetään sähkömagneettisen signaalin etenemismallintamisen työkaluja.

VTT:n tutkimuksellinen osuus hankkeessa liittyy tuulivoimaloiden vaikutusten mallintamiseen.

Hankkeessa on partnereita Suomesta, Itävaltasta, Ranskasta, Italiasta, Norjasta, Saksasta, Ruotsista, Alankomaista ja Puolasta.

FESPAN
Forecasting Electromagnetic Signal Propagation Anomalies

SELECTED PROJECTS EUROPEAN DEFENCE FUND (EDF) 2023

CALL TITLE:	Research actions for advanced passive and active sensors
TOPIC TITLE:	Electromagnetic signal propagation
DURATION OF THE PROJECT:	36 months
TYPE(S) OF ACTIVITIES:	Generating knowledge, Integrating knowledge, Studies, Design
ESTIMATED TOTAL COST:	€ 21,681,521.97
MAXIMUM EU CONTRIBUTION:	€ 21,681,521.97

SHORT DESCRIPTION OF THE PROJECT:
FESPAN will design and develop a unique Electromagnetic Signal Propagation (EMSP) modelling platform which incorporates novel environmental and EMSP models (including hypersonic signatures) as modules.

FESPAN will improve the future situational awareness capabilities of the European defence at tactical and operational levels by contributing to the development of use cases and requirements for the future tactical decision-making aid. The work carried out in FESPAN will pave the way for the study and the development of novel signal analysis and processing capabilities.

@defis.eu

**#StrongerEurope
#EUDefenceIndustry**

© European Union, 2023. Reuse of this document is allowed, provided appropriate credit is given and any changes are indicated.

²EDF 2023: FESPAN (Forecasting Electromagnetic Signal Propagation Anomalies),
https://defence-industry-space.ec.europa.eu/document/download/ecb0cfdb-ca41-4d13-a6f2-62539c0ca982_en?filename=EDF-2023-RA-SENS-EMSP_FESPAN.pdf

bey⁰nd

the obvious

Tommi Dufva
tommi.dufva@vtt.fi
+358 40 758 7926

vttresearch.com