

Luku 16

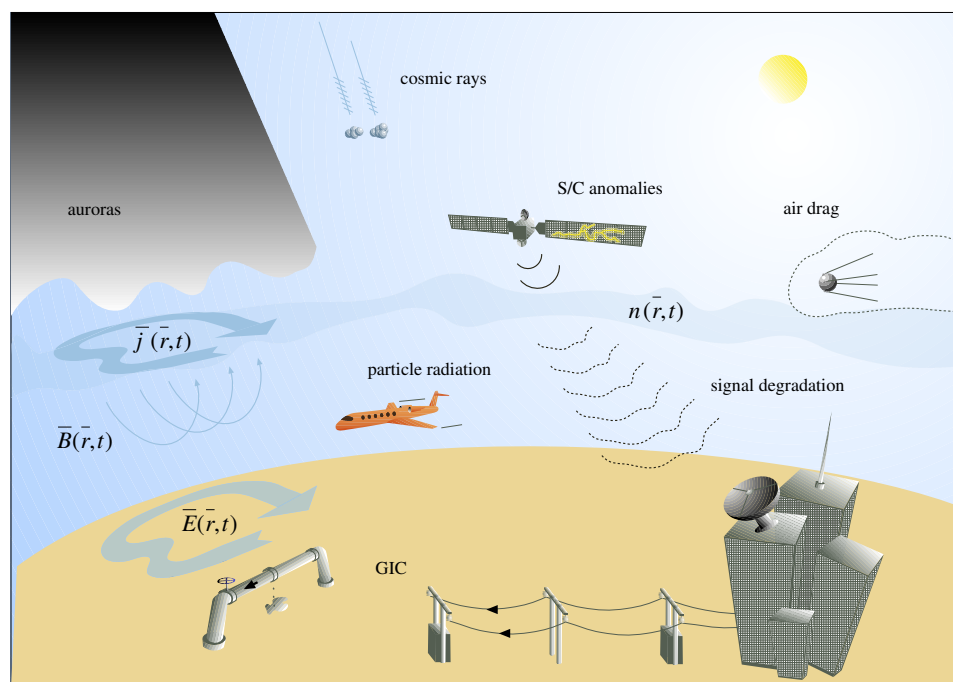
Ihan oikea esimerkki

16.1 Avaruussäästä

Esitellään lopuksi yleissivistävästi geomagnetismiin liittyvä sovellutus: geomagneettisesti indusoidut virrat (GI-virta, geomagnetically induced current, GIC). Ilmiö liittyy avaruussäähän (space weather; kuva 16.1), joka on viimeisten 15 vuoden aikana ollut nopeasti kehittyvä avaruusfysiikan alue.

Avaruussää tarkoittaa Maan lähiavaruuden vaihtelevia sähkömagneettisia ja hiukkasolosuhteita, jotka voivat haitata avaruudessa ja Maan pinnalla olevia teknologisia laitteita ja joissain tapauksissa myös ihmisten terveyttä. Ilmiöiden tärkeimpinä aiheuttajina ovat auringosta peräisin olevat varaukselliset hiukkaset, jotka kulkevat aurinkotuulen mukana. Maan magneettikenttä muodostaa suojan aurinkotuulta vastaan, ja kentän vaikutuksesta hiukkaset pyrkivät ohjautumaan napa-alueille, jossa ne synnyttävät revontulia. Auringon aktiivisuuden 11 vuoden pituinen auringonpilkkujakso näkyy tilastollisesti myös avaruussääilmiöissä. Edellinen maksimi saavutettiin kesällä 2000. Auringon aktiivisuus vaikuttaa myös Maahan kohdistuvaan kosmiseen säteilyyn, ja pitkäaikaisvaihteluilla on ilmeinen yhteys ilmastoon.

Maanpinnalla avaruussään vaikutukset ovat selvimpiä revontulialueiden lähellä, missä ionosfäärin sähkövirrat ovat voimakkaita ja nopeasti vaihtelevia. GIC:tä havaittiin lennätinlaitteissa jo 1800-luvun puolivälissä Englannissa, mutta merkittävimmät haitat esiintyvät sähköverkoissa. Tunnetuin tapaus sattui maaliskuussa 1989, jolloin Kanadassa oli usean tunnin sähkökatkos ja Yhdysvalloissa tuhoutui suurjännitemuuntaja. Lokakuun lopussa 2003 Etelä-Ruotsissa oli noin tunnin sähkökatkos GIC:n takia. Suomessa havaitut haitat ovat olleet vähäisiä ja esimerkiksi sähköverkossa merkityksettä. Tavallisen sään haittoihin verrattuna GIC on varsin vähäinen riskitekijä yleismaailmallisestikin. Ilmiönä se on kuitenkin opettavainen ja antaa aihetta monipuoliseen lähiavaruuden tutkimukseen.



Kuva 16.1: Avaruussäätelmiöitä. Kuva: Antti Pulkkinen, Ilmatieteen laitos.

Ilmatieteen laitos on tehnyt korkeajänniteverkkoa ja maakaasuputkea koskevaa GIC-yhteistyötä suomalaisen teollisuuden (Fingrid, Gasum) kanssa yli 25 vuoden ajan. Tutkimuksessa on kehitetty mallit, joiden avulla GIC voidaan laskea johdinjärjestelmissä, kun geofysikaaliset olosuhteet tunnetaan. Suomalaisten yliopistojen (Helsinki, Turku, Oulu) ja Ilmatieteen laitoksen tutkimusaiheet kattavat auringosta maan pinnalle ulottuvan plasmafysikaalisen vuorovaikutusketjun monta osa-aluetta.

16.2 GI-virran laskeminen sähköverkossa

GI-virran laskeminen sähköverkossa on kätevä jakaa kahteen osaan. Ensin määritetään maanpinnan sähkökenttä, joka aiheutuu maan magneetikentän nopeista vaihteluista Faradayn lain mukaan. Sen jälkeen lasketaan sähkökentän synnyttämä virta tarkasteltavassa johdinjärjestelmässä.

Sähkökentän mallintamisessa tarvitaan kuvaus ionosfääriin ja magnetosfääriin virroista, jotka ovat GIC-ilmiön ensisijaiset aiheuttajat. Lisäksi sähköä johtava maa on otettava huomioon. Koska avaruusvirrat ovat monimutkaisia ajan ja paikan funktioita ja maan johtavuus paikan funktio, tarvitaan käytännössä runsaasti yksinkertaistavia oletuksia.

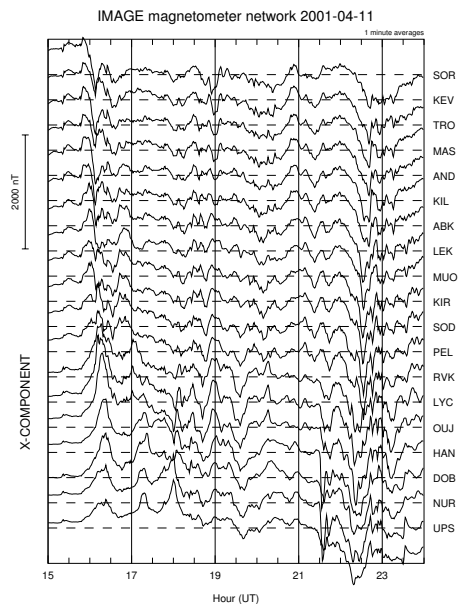
Yksinkertaisimmassa mallissa maan magneettikentän vaihteluja kuvataan tasoaalolla, joka etenee maanpintaa vastaan kohtisuorassa suunnassa. Voidaan rajoittua paikalliseen tarkasteluun, jossa maanpinta on ääretön taso. Maan sähkömagneettisten parametrien oletetaan riippuvan vain syvyydestä, ja maa kuvataan koostuvaksi homogeenisista kerroksista. Nyt on mahdollista ratkaista sähkömagneettinen kenttä kaikkialla, kun kokonaismagneettikenttä oletetaan tunnetuksi pinnalla. Aaltoyhtälö palautuu maassa diffuusioyhtälöksi, koska geomagneettisten vaihteluiden tapauksessa siirrovirtatermi on häviävän pieni verrattuna johtavuusvirtaan. Tasoaalomallissa maanpinnan sähkökenttä voidaan ilmaista pintaimpedanssin ja magneettikentän tulona. Vaihteluiden hitaus on myös perussy sille, että GIC voi olla haitallinen sähköverkoille: muuntajat on suunniteltu toimimaan vaihtovirralla (50 Hz), mutta tyypilliset GIC-taajuudet ovat alle 1 Hz luokkaa. GIC on siis sähköverkon kannalta tasavirtaa.

Kun sähkökenttä on määritetty, mallinnetaan sähköverkko tasavirtapiirinä, jonka solmupisteet ovat maadoitettuja muuntajia. Solmupisteiden välinen jännite saadaan integroimalla sähkökenttää pitkin johdinten määrittelemää tietä. On tärkeää huomata, että tasavirtatarkastelusta huolimatta sähkökenttä ei yleensä ole pyörteetön, joten jännite riippuu integroimistiestä. Ohmin ja Kirchhoffin lakien soveltaminen johtaa matriisiyhtälöön maadoitusvirroille. Vastaava mallinnus on mahdollinen maahan haudatulle putkiverkolle (esimerkiksi Suomen maakaasuputki), mutta laskennallisesti ongelma on monimutkaisempi, koska maadoitus on jatkuva eikä diskreetti.

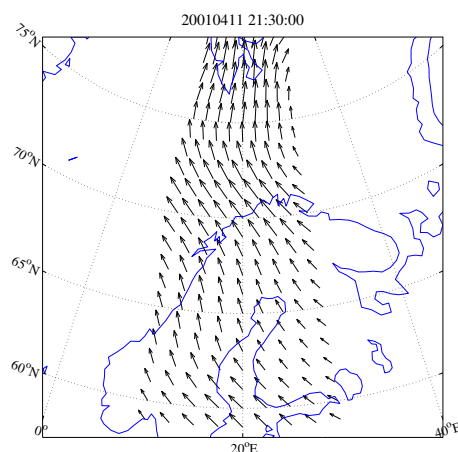
Tasoaalomalli ei sellaisenaan ole hyvä revontulialueen lähellä, missä ionosfäärivirrat aiheuttavat hyvin epähomogeenisen kentän. Käytännölliseksi on havaittu ratkaisu, jossa mitatun magneettikentän avulla ensin mallinnetaan ionosfäärin ekvivalenttivetilat. Se on virtajärjestelmä, joka selittää täysin ionosfäärin alapuolella havaittavan magneettikentän (todistus potentiaaliteorian avulla). Kun ekvivalenttivetilat tunnetaan, voidaan maanpinnan magneettikenttä laskea missä tahansa pisteissä. Sen jälkeen sovelletaan paikallisesti tasoaalomallinnusta sähkökentän laskemiseksi.

Esimerkkinä on magneettinen myrsky huhtikuussa 2001. Pohjoismaiden alueella mitataan maan magneettikenttää yli 20 paikassa ja kentän pohjoiskomponentin vaihtelut on esitetty kuvassa 16.2. Havainnoista voidaan määrittää ionosfäärin ekvivalenttivetilat ja niistä puolestaan interpoloida kenttä maanpinnalla. Kuvassa 16.3 esitetään maanpinnan horisontaalienttä yhtenä ajanhetkenä. Kenttävektorit on ionosfääritutkimuksen tavanomaisen käytännön mukaan käännetty 90 astetta myötäpäivään. Tällöin ne antavat karkean kuvan ionosfäärin horisontaalivirroista (HT: miksi näin?).

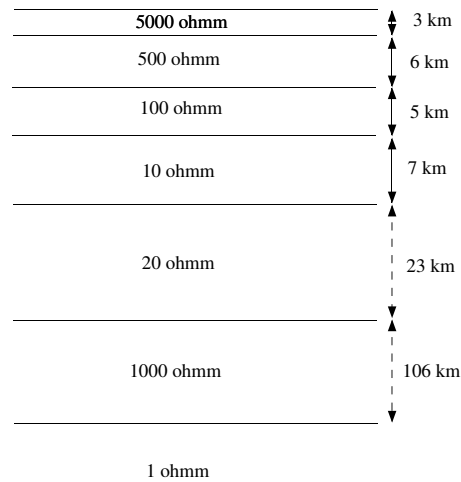
Sähkökentän laskemiseksi tarvitaan maalle johtavuusmalli, joita Suomessa on kehitetty erityisesti Oulun yliopistossa. Yksinkertainen Etelä-Suomelle sopiva malli on kuvassa 16.4. Tasoaalomenetelmää sovellettaessa tarkastelu



Kuva 16.2: Maan magneettikentän pohjoiskomponentin vaihtelut 11.4. 2001 Fennoskandian manneralueella IMAGE-magnetometrinen verkko mittaamana. Asemat ovat järjestyksessä etelästä (UPS) pohjoiseen (SOR).



Kuva 16.3: Maan magneettikentän interpoloitu horisontaalikomponentti maanpinnalla 11.4. 2001. Vektorit on käännetty 90 astetta myötäpäivään.

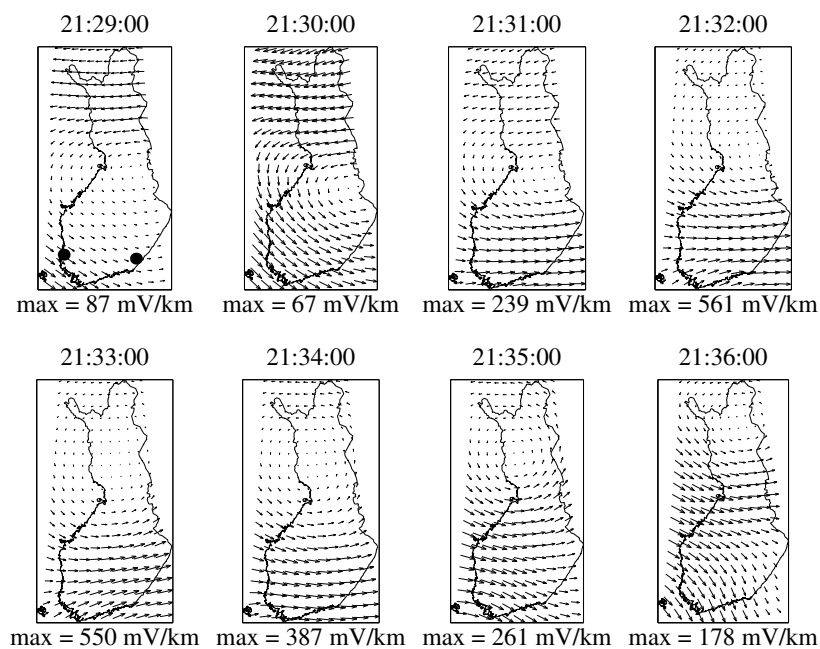


Kuva 16.4: Yksinkertainen maan johtavuusmalli Etelä-Suomessa. Kuvassa annetaan resistiivisyyden eli johtavuuden käänteisluvun arvot. Maan permeabiliteetti voidaan suurella tarkkuudella olettaa samaksi kuin tyhjiössä. Permittiivisyyden tarkalla arvolla ei ole merkitystä matalataajuusaprosimaatiassa (HT: totea tämä kuvan lukuarvoilla, kun taajuudet ovat alle 1 Hz).

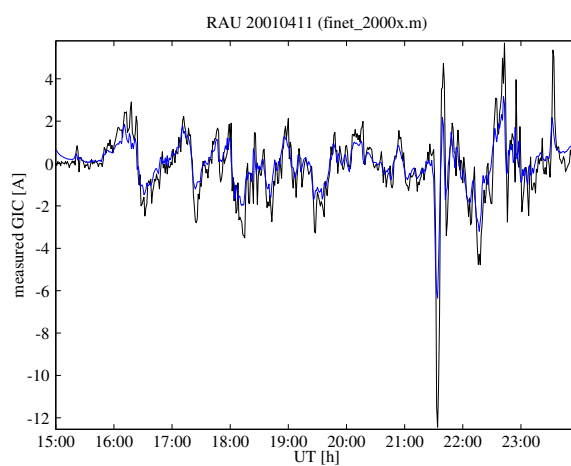
on helpointa taajuusalueessa. Aikasarjana mitattu magneettikenttä Fouriermuunnetaan (FFT), minkä jälkeen se kerrotaan taajuudesta riippuvalla pinta-impedanssilla. Näin määritetty taajuusalueen sähkökenttä käänneismuunnetaan lopuksi aika-alueeseen (kuva 16.5).

GI-virran laskemiseksi tarvitaan tiedot sähköverkon geometriasta ja vastusarvoista. Tarkastelu voidaan rajoittaa 220 kV ja 400 kV verkkoihin Suomessa, koska alempijännitteisten verkkojen suuremmat vastukset rajoittavat tehokkaasti virran kulkua. Mitattua ja laskettua virtaa verrataan kuvassa 16.6 Rauman 400 kV muuntajalla. Käytetyt oletukset huomioon ottaen tulos on erinomainen. (HT: Laskettu virta on systemaattisesti hieman pienempi kuin mitattu. Miten yhteensopivuus saataisiin vielä paremmaksi johtavuusmallia muuttamalla?)

Yhteenvetona todetaan, että GIC osataan laskea sähköverkossa, jos käytettävissä on magneettikentän mittauksia maanpinnalta, maan johtavuusmalleja ja sähköverkon tasavirtamalli. Tutkimuksella on silti vielä paljon haasteita. Suuria GIC-tapahtumia aiheuttavat ionosfäärin virrat tunnetaan huonosti eikä erilaisia tapahtumatyyppejä ole luokiteltu kovinkaan tarkasti. Vielä suurempi työ on sellaisten ennusteiden kehittäminen, että aurinkotuulihavaintojen perusteella pystyttäisiin ennustamaan tarkasti magneettikentän käyttäytyminen maanpinnalla. Tämä aihepiiri tarjoaa siis huomattavan paljon työtä puhtaassa perustutkimuksessa.



Kuva 16.5: Kuvasarja lasketusta horisontaalisesta sähkökentästä 11.4. 2001. Kuvan 16.4 johtavuusmallia on sovellettu koko alueelle.



Kuva 16.6: Mitattu (musta) ja laskettu (sininen) GIC Rauman 400 kV muuntajalla. Positiivinen arvo tarkoittaa verkosta maahan kulkevaa virtaa.