

ÄÄNEN ETENEMINEN ULKONA — RETROSPEKTIO

Tapio Lahti

Insinööritoimisto Akukon Oy
Kornetintie 4 A, 00380 HELSINKI
tapio.lahti@akukon.fi

1 PROLOGI

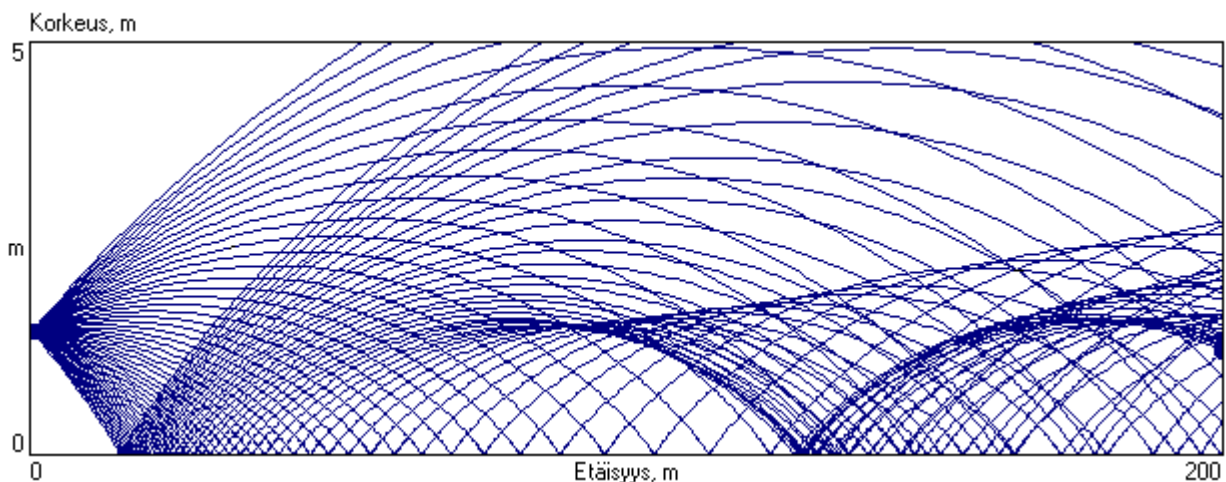
Äänen eteneminen ulkona pitkin maanpintaa eri sääoloissa näyttää ponnahtavan kiinnostuksen kohteeksi säännöllisin välein, ja nyt sen aika näyttäisi taas koittaneen [1,2]. Sykli on kuitenkin niin rauhallinen, että tuoreet tutkijat saattavat kenties kuvitella keksineensä jotakin uutta. Mutta aihepiirin tietämys on sittenkin jo kauan tunnettua oppikirjatason asiaa, johon ei ole tuotavissa juuri muuta uutta kuin tietokoneiden kasvaneen tehon avaamat mahdollisuudet.

Parikymmentä vuotta sitten teimme yhdessä Heikki T. Tuomisen kanssa pohjoismaisten ympäristömelun laskentamallien laatimiseen löyhästi liittyneen ”tieteellisen” laskentaohjelman [3,4]. Myöhemmin sitä käytettiin lyhyesti Nordtestin sääoloja koskeneiden mittausohjeiden määrittämisessä [5]. Ohjelman ensimmäinen versio toimi DG Nova -minikoneessa, toinen HP-85 -pöytäkoneessa. Tässä esitelmässä nähtävien kuvien laskenta kesti tuolloin aluksi useita tunteja, taa-juusvasteen tyypillisesti koko yön. Kolmas versio, vietynä HP 300 -työasemaan, oli jo ”interaktiivinen”: koneen vierestä ei enää tarvinnut poistua, kunhan hieman malttoi odottaa.

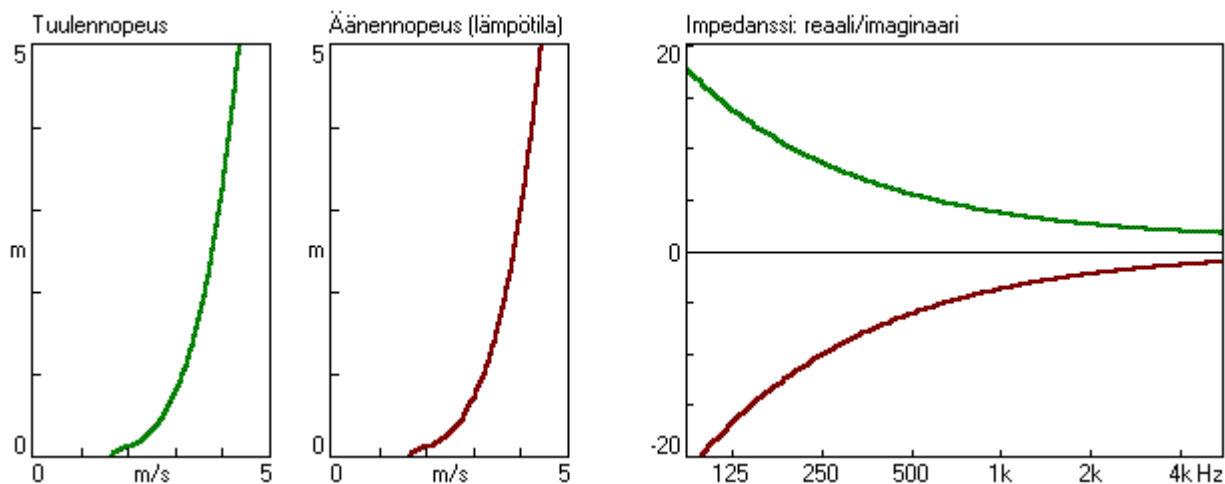
Nostalgisena kesäloma-ajanvietteenä kaivoin tuon museo-ohjelman esiin koipussista tätä esitelmää varten. Alunalkujaankin Basicillä kirjoitettu koodi istui vaivatta Visual Basiciin. Ja riemastuttavaa oli nauttia tietotekniikan kehityksestä! Ikkunan venyttäminen hiirellä päivittää sädekuvaavaa lennosta (laskien sen joka nykyäksellä uudestaan) vain hieman välkkyen — onhan nykyisen eturivin PC:n nopeus HP 300 -koneeseen verrattuna noin 400-kertainen.

2 ETENEMISEEN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ

Esitelmässä tarkastellaan äänen etenemistä tasaista maanpintaa pitkin; tarkastelussa ovat mukana vain pehmeän pinnan impedanssi ja säätötila. Muista tekijöistä kasvillisuuden läpäisyvaimennus on käytännössä vähäinen, kasvit vaikuttavat etenemiseen maanpinnan impedanssin kautta.



Kuva 1. Äänisäteitä, kun äänennopeuden korkeusgradientin aiheuttaa joko 5 m/s myötätuuli 10 m korkeudessa tai 4°C lämpötilan kasvu korkeusvälillä 2 – 10 m.



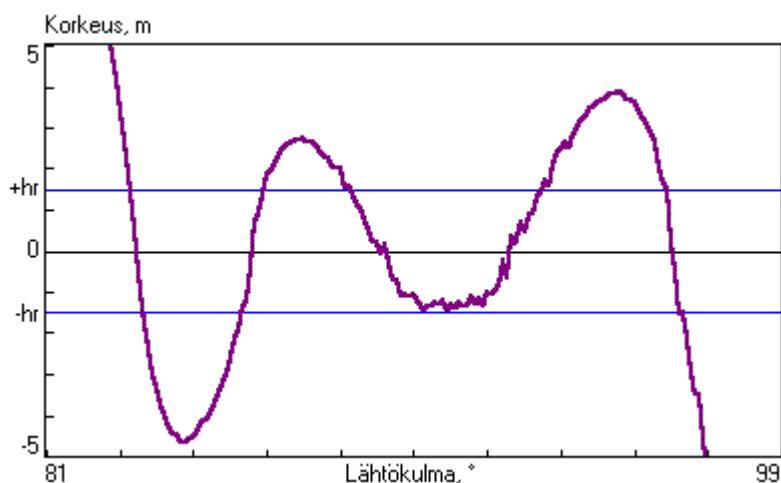
Kuva 2. Esimerkit keskeisistä tekijöistä: tuulennopeusgradientti ja lämpötilagradientin aiheuttama äänennopeusgradientti sekä pehmeän maanpinnan tyypillinen impedanssi.

Esteet ja muut maaston muodot jätetään tämän tarkastelun ulkopuolelle. Näillä rajauksilla tärkeimmät äänen etenemiseen vaikuttavat tekijät ovat impedanssin määräämä maavaimennus sekä tuuli- ja lämpötilagradienttien aiheuttama äänen kulkureittien *refraktio* eli *taipuminen*. Keskiuurilta etäisyyksiltä (n. 200 – 300 m) alkaen ilman absorptio nousee myös merkittäväksi. Tämä ilmiö on niin hyvin tunnettu, että siitä on voitu laatia kansainvälinen standardi.

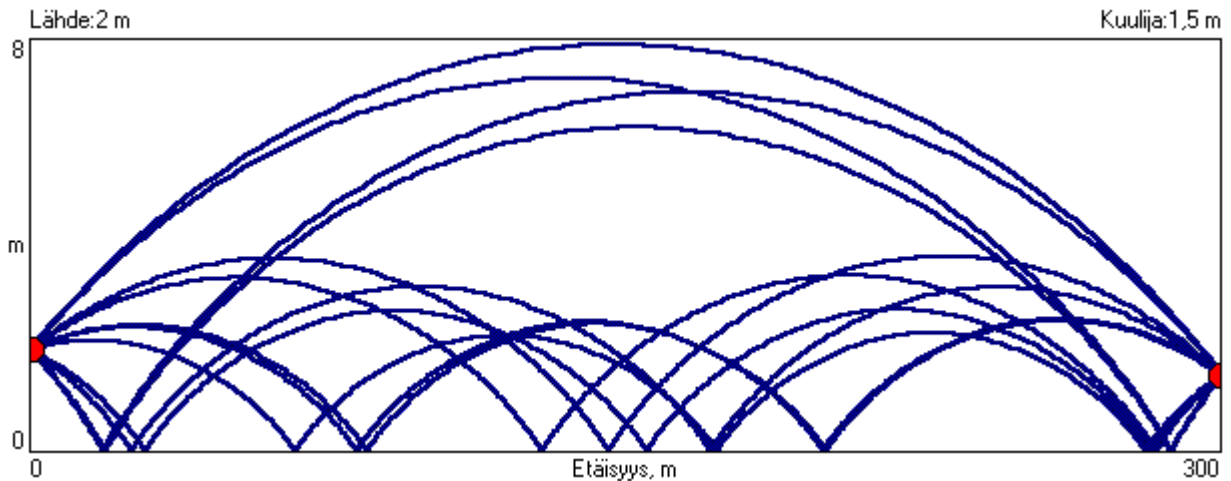
3 SÄDEAKUSTIIKKA

Aikojen kuluessa on kehitetty lukuisia etenemisen laskentatapoja vaihtelevassa väliaineessa, mm. integraalimuunnoksia, paraboliset yhtälöt ja FEM:n sukuinen kentän ekstrapolointi. Eturintamassa on ollut sukellusveneakustiikka, josta ideat ovat suodattuneet melupuolelle. Sädeakustiikan teoreettisista rajoituksista ja muiden menetelmien periaatteellisista hienouksista huolimatta sädeseuranta on usein edelleenkin verrattomasti tehokkain käytännössä. Laskenta aloitetaan Snellin lain tavallista tarkemmalla sädeseurantaversiolla:

$$\frac{c}{\sin \mathbf{j}} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c} \cos \mathbf{j} \right)^2} - \frac{u \cos^2 \mathbf{j}}{c \sin \mathbf{j}} \right)^{-1} + u = \text{vakio} \quad (1)$$



Kuva 3. 'Tuomisen käyrä': kuulijaan osuvien säteiden etsimistä on helppo jatkaa, kun ensin piirretään lähetettyjen säteiden lentokorkeus kuulijan etäisyydellä lähtökulman funktiona. Jos korkeus on negatiivinen, heijastuksia on pariton määrä ja säde on peilikuvan puolella.



Kuva 4. Kuulijaan osuvat äänisäteet ratkaistuna iteroimalla, lähtien kuvan 3 käyrästä.

Samalla tarvitaan meteorologiaa. Tuuli- ja lämpötilaprofiileista tiedetään, että stabiilissa säässä tasaisen maanpinnan lähellä ne noudattavat seuraavankaltaista potenssilakia:

$$u(z) = u_0(z/10)^{0,2} \quad (2)$$

Useiden heijastusten laskenta helpottuu, kun ilmakehästä tehdään peilikuva maanpinnan alapuolelle. Seuraavaksi on huolehdittava profiilin epäjatkuvuudesta maanpinnalla. Äärelliset taajuudet eivät noudata orjallisesti sädeakustiikkaa eivätkä seuraa yllä esitettyä terävää profiilia. Sille on tehtävä taajuudesta riippuva paikka-aaltoluku -alipäästösuodatus eli pehmenys.

4 AALTOAKUSTIIKKA

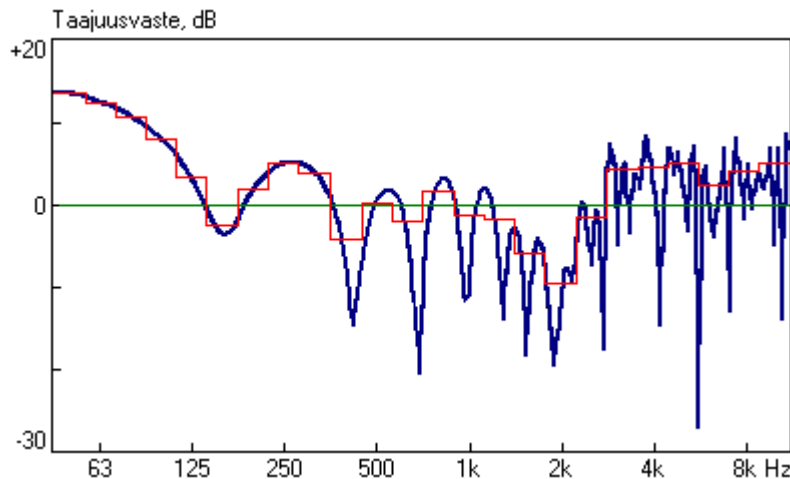
4.1 Impedanssi, palloaallon heijastuskerroin ja moninkertaiset heijastukset

Vaikka kuulijaan osuvat säteet selviävätkin, säde seuranta ei tuota taajuusvastetta eli *etenemisvaimennusta*. Kentän ratkaisu, jonka ytimenä on palloaallon kompleksinen heijastuskerroin, tunnetaan neutraalissa ilmakehässä. Äärellisen impedanssin (pehmeän maan) tapauksessa se on matemaattisesti erittäin raskas. Mitä tehdä, kun ilmakehä onkin epähomogeeninen? Laskennallisesti käypä tapa jatkaa eteenpäin on modifioida palloaallon heijastuskerrointa muuttuneella heijastuskulmalla. Paikallinen heijastus ”luulee” ”säde-aallon” tulevan näennäisestä suunnasta.

Tähän tulkintaan nojaten kaikille säteille ja niiden kaikille heijastuksille lasketaan impedanssin ja erikseen kunkin heijastuskulman (siis ei neutraalin sään geometrian) perusteella palloaallon heijastuskerroin. Kutakin sädettä kohti tulee siis yleisessä tapauksessa usean heijastuskertoimen tulo. Ns. pinta-aalto (joka matemaattisesti on heijastuskertoimen viimeinen termi ja joka fyysikaalisen selityksen mukaan kytkeytyy maanpintaan ilmakehästä riippumatta) sen sijaan tulkitaan nimenomaan geometriaan liittyväksi ilmiöksi, ja sille ei säätä oteta huomioon.

4.2 Sädeputkien intensiteetti ja lentoajan vaihe

Tähän asti jokainen säde on laskettu siten, että heijastus on käsitelty aaltoakustisesti. Mutta koko aaltokentän yhdistämiseksi on lisäksi tunnettava etenemispolkujen intensiteetit ja niiden keskinäiset vaiheet. Intensiteetit voidaan ratkaista tulkitsemalla säteet sädeputkiksi ja laskeamalla niiden poikkileikkaukset. Kun vaakasuunnassa oletetaan ympyräleviäminen, putken ala määräytyy pystymitasta, joka saadaan kuvan 2 derivaatasta dz/dj_0 .



Kuva 5. Esimerkki lopputuloksesta: etenemisvaimennus normalisoituna vapaan kentän leviämismuunnokseen (voimakas gradientti, etäisyys 300 m).

Sädeputkien kulkureittien vaiheet lasketaan lentoajasta, eli oppikirjan vaihetermin $\exp(jkR)$ korvaa $\exp(j\omega T)$. Kompleksiseksi kokonaiskentäksi tulee

$$\mathbf{p} = \sum_{i=1}^m A_i e^{j\mathbf{f}_i} ; \quad A_i = \frac{I_i}{I_0} \cdot \frac{T_0}{T_i} \prod_{j=1}^n Q_{ij}(f) ; \quad \mathbf{f}_i = \omega T_i + \sum_{j=1}^n \mathbf{y}_{ij} ; \quad i = 2, 3, \dots \quad (3)$$

missä $i..m$ ovat säteitä, $j..n$ heijastuksia, $Q_{ij} \exp(j\mathbf{y}_{ij})$ on palloaallon heijastuskerroin, I_i sädeputken intensiteetti ja T_i lentoaika; suoralle säteelle ($i=1$) toisen ja kolmannen yhtälön summa ja tulo jäävät pois. Kun kokonaiskenttä normalisoidaan vapaan kentän paineeseen, saadaan etenemisen taajuusvaste. Laskennallisesti raskain vaihe on Q_{ij} :n ratkaiseminen.

5 LOPPUHUOMAUTUKSIA

Toistaiseksi ei käsitelty ilman *pyörteisyyttä* eli turbulenssia, joka käytännössä tarvelee kentän tiukat vaihesuhteet. Kuvatussa ohjelmassa pyörteisyys on myös mukana säädettävänä tekijänä.

Itse Akustiikkapäivien esitelmässä näytetään kuvatus ”teoreettisen” ohjelman rinnalla esimerkkejä todellisista ympäristömelun mittauksista suurilla etäisyyksillä eri sääoloissa. Tarkoituksena on valaista, mitkä tekijät ovat käytännössä hallitsevia ja mitkä vähemmän merkittäviä. Lyhyenä yhteenvedona voidaan todeta, että äärellisen impedanssin määräämä maavaimennus keskitaajuuksilla (n. 200 – 400 Hz) esiintyy lähes aina, mutta voimakkaan gradientin aiheuttama stabiili vahvistuminen on tavallisen ympäristömelun ollessa kyseessä äärimmäisen harvinainen.

VIITTEET

1. BJÖRK E, Erittäin vähän ääntä vaimentavat olosuhteet. *Akustiikkapäivät 1999*, Tampere 4–5.10.1999, 123–126.
2. HOFMANN J, Outdoor sound propagation using combined ray tracing. *INTER-NOISE 2001*, Haag, 26–30.8.2001, paper 482.
3. LAHTI T & TUOMINEN H T, Combined ray and wave calculation of outdoor noise propagation. *NAS-80*, Turku 10–12.6.1980, 233–236.
4. LAHTI T & TUOMINEN H T, Calculation of noise propagation with multiple ground reflections in an inhomogeneous atmosphere. *INTER-NOISE 81*, Amsterdam 6–8.10.1981, 271–274.
5. LAHTI T, Computer simulation of worst case excess attenuation. *NORDTEST workshop: The meteorological window for noise immission measurements*, Borås 8–9.6.1988.