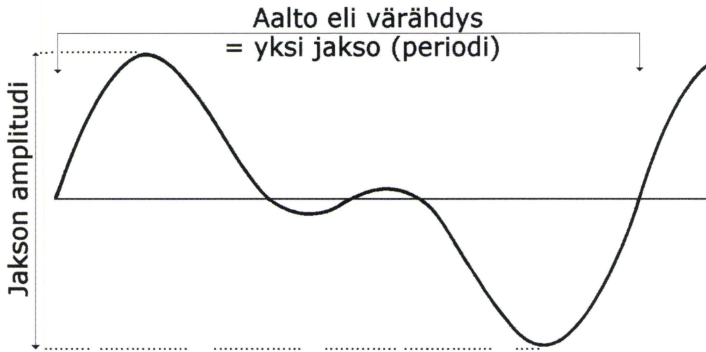


Timo Leisiö

## JOHDATTELUA LANGNERIN ARTIKKELIIN “JAKSOLLISTEN SIGNAALIEN MUOKKAUTUMINEN AJASSA”

Gerald Langnerin seuraavilla sivuilla oleva artikkeli edustaa uutta näkökulmaa siihen, miten kuulokeskus työstää akustista informaatiota ja miten mielessämme syntyy kuva musiikista ja hälystä. Työ pohjautuu vuosikymmenten seikkaperäiselle ja täsmälliselle tutkimukselle. Jotta lukija ymmärtäisi helpommin tekstiä lienee syytä palauttaa mieleen muutamia akustiikan termejä. Anatomiset termit selvinnevät tekstissä olevien kuvien avulla. Artikkelissa keskeisiä käsitteitä ovat sävelen *jakso* eli periodi, sen *taajuus* eli frekvenssi ja *moduloitu* aalto, aaltoliikkeissä tapahtuvien prosessien *yhteensattuvuus* eli koinsidenssi sekä *korrelaatio* eli vastaavuus. Langnerin ajattelussa keskeinen oivallus on siinä, että kuulokeskus mittaa värähtelyjen osaprosesseihin sisältyviä aikayhtäläisyyksiä ja luo niiden kautta kuvaa sävelkorkeuksista.



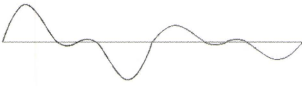
*Jakso* tarkoittaa yhtä värähdystä eli ääniaaltoa ja *jaksollinen* tarkoittaa, että aalto toistuu muuttumattomana. Tätä säännöllisyyden ja muuttumattomuuden ominaisuutta kuvataan akustiikassa termillä *harmoninen*, mikäli jaksolliseen värähtelyyn sisältyy yläsäveliä ja siten myös spektri. Langnerin termi *spektraalinen* ei sen kummempaa tarkoita kuin että yläsävelet asettuvat säännölliseen järjestykseen, jonka tietokoneen analyysiohjelma voi näyttää energiapiikkeinä eli formanteina. Niistä  $F_0$  kuvaa pohjasävelen energiaa,  $F_1$  edustaa ensimmäistä yläsäveltä,  $F_2$  toista jne. Jakson sisältämän energian mitta on *amplitudi*, joka on aallon ääripoikkeamien välinen etäisyys (kuvassa käyrän ylimmän ja alimman pisteen välimatka). Mitä laajempi amplitudi, sitä enemmän jaksossa on energiaa eli sitä kuuluvampi ääni on. Amplitudia voidaan *moduloida*

joko kaventamalla (hiljentämällä ääntä) tai laajentamalla sitä (vahvistamalla ääntä). Koska jakso pysyy kuitenkin pituudeltaan muuttumattomana, sävelkorkeus pysyy muuttumattomana. Toisin sanoen sävel  $a^1$  voidaan laulaa fortessa tai piano pianissimossa. Lagnerin keskeinen oivallus oli siinä, että kuulokeskus erittelee jaksoja ja vertaa niitä aiempiin ja tuleviin jaksoihin. Hermosoluissa prosessit ovat käsittämättömän nopeita, koska ne tapahtuvat sekunnin tuhannesosissa tai miljoonasosissa.

Jos vaihdetaan näkökulmaa, niin jaksoa voidaan tarkastella mittaamalla, *miten taajaan* yksi jakso toistuu yhdessä sekunnissa. Jos yhden jakson kesto on  $1/440$  sekuntia, niin se toistuu sekunnissa 440 kertaa, mikä vastaa sävelkorkeutta  $a^1$ . Tällöin puhutaan *taajuudesta* eli *frekvenssistä*. Taajuuden mittayksikkönä on hertsi (Hz). Toisin sanoen jakso ei voi säilyä muuttumattomana, jos sen värähtelyn taajuus muuttuu. Täten kummankin muutos johtaa sävelkorkeuden muuttumiseen. (Kiintoisesti Langner kuitenkin osoittaa, että toisin kuin on ajateltu, sävelkorkeus ja taajuus ovat toisistaan riippumattomia.)

Jaksollinen ääni voi joskus muodostua pelkästä pohjasävelestä. Esimerkiksi ääniraudassa soi vain yksi jakso ja yksi perustaajuus ilman yhtäkään yläsäveltä. Musiikissa ääni on kuitenkin yleensä harmoninen (ja samalla tietenkin jaksollinen) eli sävel rakentuu pohjasävelestä ja sen kokonaislukujen mukaisista kerrannaisista. Pohjasävel on sinimuotoinen ja niin ovat myös kaikki yläsävelet. Jos pohjasävelen jakso värähtelee 50 kertaa sekunnissa, äänesten 2-6 taajuudet ovat 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, 250 Hz ja 300 Hz. (Saman matemaattisen kaavan mukaan syntyvät myös ylipuhaltamalla aikaan saadut luonnonsävelet, jotka koostuvat omista pohjasävelistään ja yläsävelistään.) Harmoninen ääni edustaa aina ns. monimutkaista ääntä, koska yhden jakson sisässä ei toteudu vain ensimmäisen aallon (pohjasävelen perustaajuuden) värähdys vaan myös sen kerrannaisten värähdykset, joista kullakin on oma taajuutensa jakson sisällä. Näiden kerrannaisten energia on matalampi kuin pohjasävelen energia ja kerrannaisten energia heikkeneminen näkyy äänikuvissa formanttien mataloitumisena vasemmalta oikealle.

Akustiikassa käsite *modulointi* tarkoittaa äänen muuntamista tavalla tai toisella. Modulointia tapahtuu kahdella tavalla. Jos moduloidaan jakson amplitudia, ääni on *amplitudimoduloitu*. Laulaja moduloi vaihtelemalla äänenvoimaansa yhtä ja samaa säveltä laulaessaan ja kuoronjohtaja moduloi pohjasäveltä (perusfrekvenssiä) napauttamalla ääniraudan eri voimakkuuksilla erilaisiin pintoihin. Amplitudimodulaation pohjautuu myös AM-aalloilla tapahtuva radioliikenne siten, että jakson sisään (nopeataajuiseen ja vakiojaksoiseen kanta-aaltoon) lisään muitakin taajuuksia kuten puhetta tai soittoa, jolloin nämä lisätaajuudet muuntavat kaiken aikaa jakson amplitudia. Esimerkiksi oheisessa amplitudimoduloitun sävelen kuvassa vasemman aallon amplitudi on suurempi kuin oikean, mutta kummassakin aallonpituus (jakso) on sama ja niin myös sävelkorkeus.



Modulointi voi kohdistua myös taajuuteen: aaltoliikkeen amplitudi pysyy samana, mutta jaksojen pituudet vaihtelevat, mikä tarkoittaa taajuuksien eli frekvenssien vaihtelua. Puhutaan mm. FM- eli *frekvenssimodulaatioille* pohjautuvista ultralyhyistä aalloista. Alla on neljä aaltoa, joiden loput on osoitettu nuolella. Jokaisen jakson amplitudi on sama, mutta kaikki jaksot ovat eripituisia (ja aaltoilu on epäperiodista eli ei-jaksollista). Täten kukin jakso soi omalla sävelkorkeudellaan. On huomattava, että aaltomuoto on kullakin yksi ja sama. Tätä Langner tarkoittaa todetessaan, että voimme puhuessamme ja laulaessamme tuottaa saman foneemin (esimerkiksi *i:n* tai *a:n*) hyvinkin eri korkeuksilla. Modulaation yleinen ilmentymä on mm. vibrato, sävelen huojunta, joka voidaan toteuttaa sekä taajuus- että amplitudimodulaation avulla.



*Synkronia* (yhtaikaisuus eli *tasatahtisuus*) tarkoittaa, että kuulohermot etsivät automaattisesti samalla hetkellä tapahtuvia prosesseja, lukkiutuvat niihin ja siirtävät tällaiset yhteensattumat (koinssidenssit) tietona eteenpäin tulkintaa varten. Jos kaksi samanaikaista värähdystä kohdistuu yhteen hermoon, ne voivat joko kumota toisensa, jolloin hermo ei lähetä viestiä eteenpäin, tai ne voivat vahvistaa toisiaan, jolloin hermosta lähtee vahvistettu viesti seuraavaan analyysipisteeseen. Toisaalta hermot suorittavat jatkuvaa korrelaatio- eli *vastaavuusanalyysiä*. Langner on työryhmineen kehittänyt mallin, joka selittää kuulokeskuksen eri osien yhteistyön perusteet, mutta itse korrelaatioanalyysi tapahtuu itsensä kuulokeskuksen hermosoluissa monimutkaisilla tavoilla, jotka eivät suinkaan ole ominaisia vain ihmiselle vaan yleensäkin selkärankaisille. Esimerkiksi keskeinen elin, simpukkatumake (Nucleus cochlearis), sijaitsee aivorungossa, mikä sijainti jo sinällään viittaa tumakkeen toimintaperiaatteiden kehittyneen satoja miljoonia vuosia sitten. Ja lopuksi: käsite *representaatio* on käännetty sanalla vaste.

Langnerin artikkelin ytimenä on teoria siitä, miten kuulokeskuksen hermosolut suorittavat jaksollisuusanalyysin. Artikkelin kuvassa 3 näkyy prosessi, joka voidaan yksinkertaistamalla tiivistää seuraavaan. Simpukassa tapahtuvan ensianalyysin tieto siirtyy kuulohermoa myöten neljään analyysikeskukseen, joista kukin käsittelee saman tiedon samanaikaisesti uudelleen ja analyysien synteesi siirtyy aikanaan kuuloaivokuorelle ja siis kuulijan tietoisuuteen. Neljässä analyysi- eli prosessointikeskuksessa tapahtuvan erittelyn pohjana on amplitudimoduloidun signaalin synnyttämän viiveellisen ja viiveettömän reaktion vertaaminen ja sitä kautta signaalin vaiheen määrittäminen.



Signaalin vaihe saa (1) käynnistinneuronin lähettämään tietyllä taajuudella etenevän värähtelyn (2) värähtelypiirin soluihin. Samalla hetkellä (3) yhdistäjäpiirinkin hermosolut reagoivat samaan vaiheeseen mutta nyt pienellä viiveellä. Samalla hetkellä (4) yhteensattumaneuroni saa tietosyötteet kolmesta edellisestä, mutta se aktivoituu vain silloin, kun käynnistäjäneuronista lähtenyt vaihetieto osuu samaan hetkeen kuin sen yhdistäjäpiiristä saama vaihetieto. Koska käynnistäjäneuroni ja värähtelypiiri lähettävät yhteensattumaneuronille yhden ja saman (viiveettömän) vaihetiedon ne kumoavat toisensa eikä yhteensattumaneuronissa synny reaktiota. Tapahtuu siis reaktion *esto* eli inhibitio. Kuten kuvan 3 oikealla puolella olevalta kolmelta alimmalta aaltoriviltä näkyy, tietoisuuteen nousee vain se jakso, joka päättyy samanaikaisesti värähtelypiirissä, yhdistäjäpiirissä ja yhteensattuma- eli koincidenssineuronissa. Tästä tiedosta kuulijan aivokuorella syntyy aikanaan periodotopia eli kuva signaalin sävelkorkeudesta.