

VAIHEKOHINA RADIOJÄRJESTELMISSÄ

Pekka Pussinen OH8HBG - pekka.pussinen @! oulu.fi

Radiotiedonsiirtojärjestelmissä ilmenevät tekniset ongelmat ovat mitä moninaisimpia. Varsinkin vastaanottimen käyttäytymisessä esiintyy monenlaisia mielenkiintoisia ilmiöitä, jotka rajoittavat vastaanottimen kykyä toimia tarkoituksenmukaisesti. Eräs syy ongelmiin on vaihekohina. Se mitä vaihekohina itsessään on jää usein jopa alan ammattilaisille hämärän peittoon.

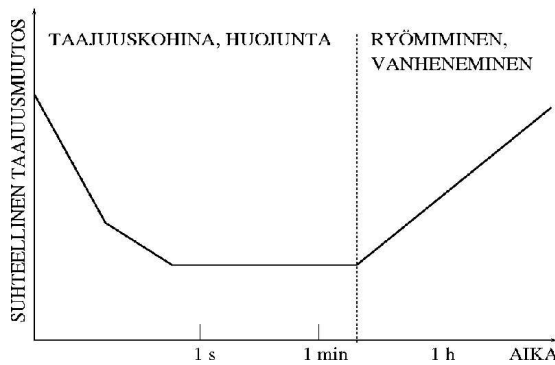
Tämän artikkelin tarkoitus on antaa jonkinasteinen pintaraapaisu vaihekohinaan koskematta sen syvemmin sen pohjalla oleviin matemaattisiin ilmiöihin. Tiettyä matemaattista teknisyyttä ei tietenkään voida välttää, joten desibelien käsite on hyvä olla tuttu käsiteltyjen suuruusluokkien hahmottamiseksi. Samoin tietynlainen perustuntemus radiojärjestelmien rakenteesta auttaa hahmottamaan ongelman kuvausta.

Oskillaattorin kohina

Olennaisena osana radiojärjestelmässä on oskillaattori, jolla muodostetaan yksitaajuinen signaali sekoitettavaksi moduloidun signaalin kanssa. Sekoitustuloksena muodostuu uusi taajuus, joka on joko välitaajuus tai tietyissä erikoistapauksissa lopullinen taajuus. Jokaiselle paikallisoskillaattorille kuitenkin on ominaista, että niiden tarkoitus on tuottaa täysin puhdasta signaalia halutulla taajuudella siinä kuitenkaan täydellisesti onnistumatta.

Oskillaattorien taajuudessa tapahtuu huojuntaa, joko nopeita taajuushyppäyksiä tai tasaista taajuuden muuttumista. Nopeat ja tilapäiset taajuusmuutokset tapahtuvat yleensä ennustamattomasti ja niiden luonne on kohinanomaista. Tasainen taajuuden muuttuminen sen sijaan aiheutuu esimerkiksi oskillaattoriin lämpenemisestä tai kiteen vanhenemisestä. Nämä hitaasti tapahtuvat ilmiöt ovat helpommin hallittavissa ja niiden vaikutus on mahdollista kumota.

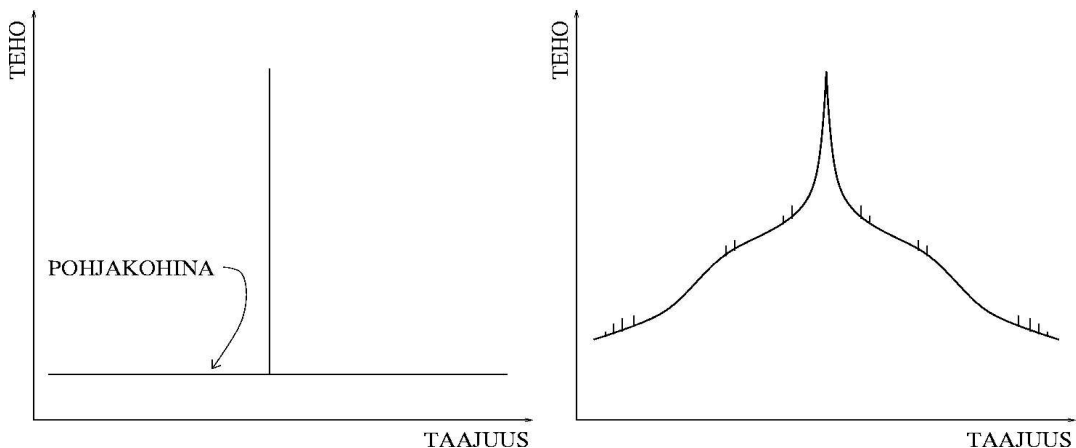
Lisäksi oskillaatorisignaalin puhtauteen voi tulla ikäviä yksittäistaajuisia häiriöitä, harhalähetteitä. Tällaiset häiriöt voivat johtua esimerkiksi verkkovirran taajuuden ja sen monikertojen, käytetyn hakkuriteholähteen hakkaustaajuuden ja sen monikertojen tai taajuussynteesillä toteutettua oskillaattoria käytettäessä vertailutaajuuden vuotamisesta oskillaatorisignaaliin. Nämä yksittäiset kohinapiikit vaikuttavat halutun paikallisoskillaattoritauuden tavoin mutta väärällä taajuudella ja heikommalla tasolla.



Kuva 1. Oskillaattorin taajuuden muuttuminen ja muutosten tyyppien jaottelu ilmiön nopeuden mukaan kohinaan ja ryömimiseen.

Vaihekohinan ja signaalin harhaläheteiden summasta muodostuu jäännös-FM:ksi kutsuttu modulaatio oskillaattorisignaaliin. Tämä aiheuttaa sen, että vaikka varsinaista tulosignaalia ei ole kytketty vastaanottimeen (tai pientaajuista signaalia lähettimeen) näyttää silti siltä, että jossakin järjestelmän osassa tapahtuisi taajuusmoduloinnin ilmaisua (tai lähettimen tapauksessa taajuusmodulointia.) Teoriassa tällainen

jäännös-FM voi olla esimerkiksi huonosti suodatetun DC-virtalähteen aiheuttama "brummi" FM-lähteessä.



Kuva 2. Ideaalisen oskillaattorin (vasemmalla) ja todellisen oskillaattorin spektrikuvaaja. Todellisessa oskillaattorissa on havaittavissa vaihekohinan lisäksi PLL:n silmukkasuodattimen aiheuttamat "olkapäät" sekä harhaläheteitä.

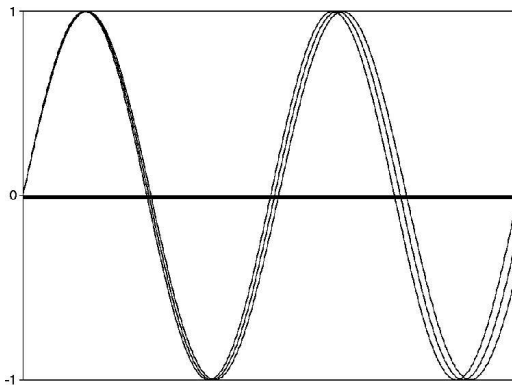
Oskillaattoriin suunnittelulla voidaan vähentää vaihekohinaa huomattavasti. Taajuussyntesoijalla (PLL) toteutetun oskillaattorin vaihekohinaan vaikuttaa erityisesti vaihelukitun silmukan silmukkasuodattimen ominaisuudet. Silmukkasuodattimen ominaisuuksia määriteltäessä tulee ottaa huomioon lukuisia tekijöitä, kuten taajuuden asettumisaikavaatimukset ja oskillaattorin pohjakohinan taso. Siksi silmukkasuodattimien vaikutusta vaihekohinaan ei voida suoraan minimoida, vaan on ajateltava koko järjestelmän vaatimuksia.

Ilmiasu

Oskillaattorisignaalin vaihekohinaksi käsitetään yleensä varsinaista oskillaattoritaajuutta lähellä olevien taajuuksien teho. Tämä teho voidaan ajatella olevan hyvin nopeasti taajuuttaan muuttavan oskillaattorin aiheuttamaa hyppimistä,

joka näkyy mittalaitteen rajallisesta ilmaisutarkkuudesta johtuen tasaisena kohinana taajuuden vieressä. Huomattavaa on, että taajuuskohinalle on ominaista sen esiintyminen samanlaisena oskillaattoritaajuuden molemmilla puolilla. Tämän vuoksi yleensä riittää, että vaihekohinamittaus suoritetaan vain toiselle puolelle paikallisoskillaattoritaajuutta.

Mikäli ajattelemme hyvin nopeita ja pieniä taajuusmuutoksia signaalin aikamuotoisessa esityksessä (esimerkiksi oskilloskoopilla katsottuna) huomaamme, että vaihekohinaksi kutsuttu kohina ei ole mitattavissa helposti perinteisellä aikatasoisella ilmaisulla. Satunnaisen luonteensa vuoksi voidaan oskilloskoopin ruudulle piirtää vain osa vaadittavista näytteistä, eikä kokonaiskäsitystä kohinan suuruudesta ja jakaumasta saavuteta.



Kuva 3. Kolme toisistaan hyvin vähän taajuudellisesti poikkeavaa siniaaltoja, joiden muutos aikatasoisena on hyvin pieni mutta joka riittää aiheuttamaan taajuustasossa selkeän vaihekohinan.

Kun oskillaattorin taajuudesta edetään kauemmas, huomataan vaihekohinan tehon tippuvan huomattavasti. Tämä kauemana varsinaisesta signaalista oleva kohina olisi helpommin havaittavissa aikatasoisena, mutta sen teho on niin pieni että se ilmenee vain hyvin heikkona kohinana varsinaisen signaalin joukossa.

Aikatasoisena signaalin ajattelumallissa on helppo ymmärtää, että pieni taajuuden muuttaminen aiheuttaa vaihevirheen jonkin tarkasteluajanjakson päähän. Tämä siis tarkoittaa, että yhden nimellisen jaksonpituuden päässä signaali on hieman

eri vaiheessa. Koska taajuusvirheen muutos on satunnainen ilmiö jonka keskiarvona on juurikin haluttu oskillaattoritaajuus, voidaan ajatella taajuuden kohisevan hyvin heikosti signaalissa.

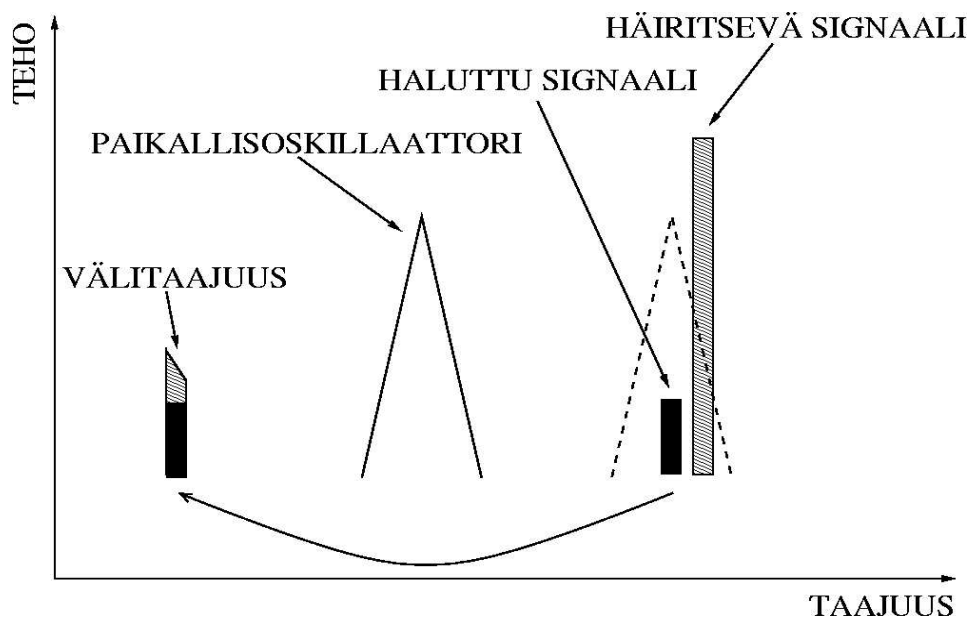
Vaikutus radiolaitteisiin

Ensimmäinen ja monasti näkyvin vaihekohinan vaikutus on tiedonsiirtokyvyn hyvyyden heikentyminen. Vaihe- (PM) ja taajuusmodulaatioissa (FM) tämä tarkoittaa sitä, että signaalin puhtaus (SNR) ei voi kohota vaihekohinasta johtuen äärettömäksi. Yleensä se ei kuitenkaan muodostu ongelmaksi, sillä tällaisissa sovelluksissa täysin puhdas signaalinsiirto ei ole välttämättömyys.

Sen sijaan vaihe- (PSK) ja taajuussiirtomodulaatioissa (FSK) sekä näistä periytyvissä kehittyneemmissä digitaalisissa modulaatiotyypeissä vaihekohina alkaa rajoittamaan parasta saavutettavaa bittivirhesuhdetta tiedonsiirtojärjestelmässä. Tällaisen ilmiön havaitseminen on huomattavasti helpompaa ja se muodostuu

digitaalisen tiedonsiirtojärjestelmän osana hyvin nopeasti rajoittavaksi tekijäksi koko järjestelmälle. Varsinkin reaaliaikaisissa tiedonsiirtojärjestelmissä, esimerkiksi GSM-puhelimissa, bittivirheitä ei voida korjata uudelleenlähetyksellä, joten joudutaan asettamaan tiukat vaatimukset vaihekohinalle.

Koska vaihekohina näkyy ylenmääräisenä signaalinvoimakkuutena myös halutun taajuuden vieressä, aiheuttaa se myös ei-toivottuja sekoitustuloksia. Varsinkin järjestelmän kanavavälin päässä oleva vaihekohina voi aiheuttaa viereisellä kanavalla olevan voimakkaan lähetteen sekoittumista suoraan halutun lähetteen päälle aiheuttaen harhatoiston. Samoin voimakas lähete kauempana varsinaisesta kuuntelutaajuudesta voi aiheuttaa vastaanottimen harhatoiston, mikä voi ilmetä kohinasalvan avautumisena analogisissa puheradiojärjestelmissä tai vastaanotetun signaalin katoamisena digitaalisissa järjestelmissä.



Kuva 4. Vaihekohinainen paikallisoskillaattorisignaali voi sekoittaa halutun lähetteen vieressä olevan signaalin varsinaisen lähetteen päälle välitaaajuudelle. Voimakas häiriölähete voi peittää alleen halutun signaalin.

Yleensä radiolaitteiden oskillaattoreille on määriteltä suurin sallittu vaihekohina. Lähettimien osalta tämän vaatimuksen määrää viereiselle kanavalle vuotavan tehon rajoitus, ja vastaanottimessa viereisen kanavan vaimennusvaatimus (selektiivisyysvaatimus). Käytetyn järjestelmän ominaisuuksista riippuen merkitsevän vaihekohinan leveys vaihtelee muutamista kilohertzeistä useisiin megahertzeihin.

Mittaaminen

Kun vaihekohinaa määritellään käytetään siitä mittayksikköä dBc/Hz. Absoluuttisella tehotasolla ei ole juurikaan merkitystä, sillä halutun

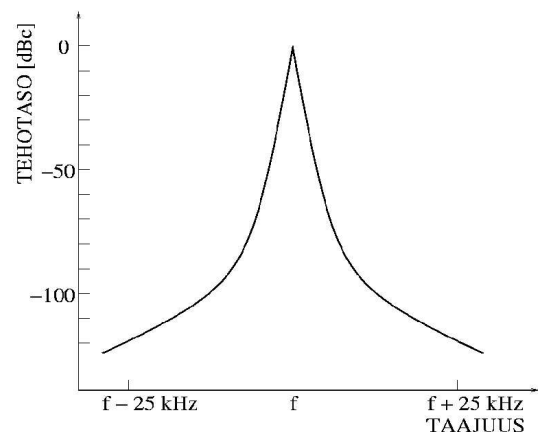
oskillaattorisignaalin voimakkuus peittää alleen vaihekohinan aiheuttaman ei-halutun signaalin, kun erotus on riittävän suuri.

Esimerkiksi FM-pohjaisissa matkaviestinjärjestelmissä vaihekohinan vaatimus saattaa olla jopa -120dBc/Hz 25kHz (eli kanavavälin) päässä kantoaallostasta. Tällaisen tehomuutoksen mittaaminen hyvin pienellä taajuuskaistalla on erittäin vaikeaa, ja sitä varten on mittalaitteiden suorituskyvyille asetettava tiukkoja vaatimuksia. Normaaleilla spektrianalysaattoreilla mitattaessa on tietysti huomioitava myös itse mittalaitteen paikallisoskillaattorin oma vaihekohina, joka saattaa sekoittaa juuri hyötysignaalin tutkittavan signaalin (vaihekohinan) taajuudelle. Myös mittalaitteen oma pohjakohina ja dynaaminen toiminta-alue saattavat aiheuttaa rajoituksia onnistuneille vaihekohinamittauksille.

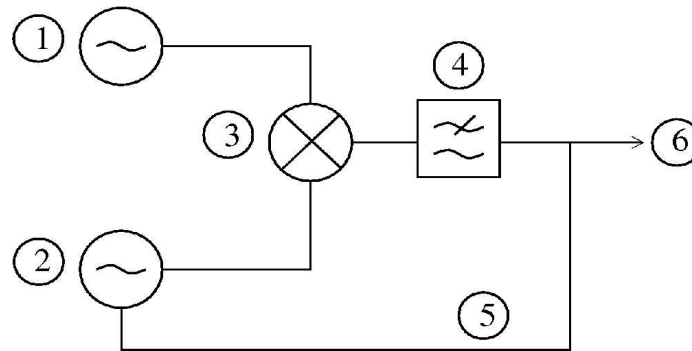
Uudemman sukupolven spektrianalysaattoreissa on usein kohtuullisen hyvät ominaisuudet vaihekohinan mittaamiseen tavallisimmissa järjestelmissä. Lisäksi spektrianalysaattoreihin on saatavilla ohjelmistopäivityksiä, joilla vaihekohinan mittaaminen onnistuu automatisoidusti.

Tarkempaa tietoa vaihekohinasta vaadittaessa on mittaukseen käytettävä erillistä vaihekohinamittapaikkaa, jossa mittalaitteen ominaisuudet on optimoitu

juuri vaihekohinan mittaamista varten. Tällaiset mittalaitteet voivat käyttää myös ulkoista signaaligeneraattoria paikallisoskillaattorina, mikä mahdollistaa laitteen toimintakyvyn (ja kokonaishinnan) määrittelyn jättämisen loppukäyttäjälle.



Kuva 5. Esimerkki vaihekohinaisen oskillaattorin spektrikuvaajasta.



Kuva 6. Yksinkertainen vaihekohinan mittauskytkentä, jossa tutkittava signaali (1) ja vähäkohinainen vertailuoskillaattori (2) sekoitetaan sekoittajassa (3) keskenään ja alipäästösuodattimen (4) jälkeen jaetaan vertailuoskillaattorin ohjauskytkennäksi (5) ja matalataajuiseksi kohinaulostuloksi (6). Tällainen kytkentä antaa suurimmat jännitepulssit vaihemuutoksille mikäli vertailuoskillaattorin vaihe eroaa 90 astetta tutkittavan oskillaattorin vaiheesta. Alkuperäisen signaalin vaihekohina on ulostulossa siirtynyt hyvin lähelle 0-taajuutta.

Vaihekohinamittapaikka voi toimia spektrianalysaattorin tavoin, mutta tällaisen mittaustarkkuus on huono verrattuna vaihekohinan suureen tehotasovaihteluun. Sen sijaan useat vaihekohinamittapaikat käyttävät vaihekohinan mittaamiseen suoraa vaihelukitulla silmukalla toteutettua vaiheilmaisinta tai viivelinjaa hyödyntävää diskriminaattoria. Vaihekohinamittaus voidaan suorittaa myös vapaasti värähtelevälle oskillaattorille lukitsemalla se referenssioskillaattorista otettuun heikkoon signaaliin. Vaihekohinan mittausmenetelmät eivät yleensä huomaa taajuuden hidasta ryömimistä, vaan mittauksessa ilmaistaan vain nopeaa vaihekohinaa.

Mitä jäi käteen?

Vaihekohina on yksi lukuisista radiojärjestelmien toimintaan vaikuttavista ilmiöistä. Normaalisti suunnitelluissa ja toteutetuissa radiolaitteissa sen aiheuttamia epätoivottuja ominaisuuksia ei edes huomaa, mutta tietyissä erikoistapauksissa se voi aiheuttaa todella ikäviä käyttöongelmia.

Normaali käyttäjä ja olohuonesäätäjä ei valmiin radiolaitteen vaihekohinaominaisuuksia juuri pysty järjestelmällisesti parantamaan, vaikka siihen voisi olla kohtuullisen helppoja mahdollisuuksia. Vaihekohinan kuvaamiseen on olemassa lukuisia matemaattisia malleja, kuten myös suunnitteluvaiheessa olevan oskillaattorin toiminnan optimoimiseen. Vaihekohinan syvimmän olemuksen ymmärtäminen liikkuu radioteknisen tietämyksen vaikeimmassa päässä, mutta sen perusteiden käsittäminen tulee hyvinkin helpolla vastaan jokapäiväisessä ammattimaisessa radiotaajuisten järjestelmien suunnittelutyössä.

Taulukko 1. Artikkelissa käytettyjä sanoja ja niiden selitykset

Sana	Selitys
PM	Phase modulation, vaihemodulaatio. Lähetteen vaihetta muuttamalla aikaansaatu audiotiedonsiirtomodulaatio.
FM	Frequency modulation, taajuusmodulaatio. Lähetteen taajuutta muuttamalla aikaansaatu audiotiedonsiirtomenetelmä.
PSK	Phase shift keying, vaihesiirtoavainnus. Vaihemodulaatio, jossa siirretään digitaalista informaatiota, ei ääntä.
FSK	Frequency shift keying, taajussiirtoavainnus. Taajuusmodulaatio, jossa siirretään digitaalista informaatiota, ei ääntä.
PLL	Phase locked loop, taajuuslukittu silmukka. Oskillaattorin ohjaustyyppi jossa oskillaattorin taajuutta säädetään jatkuvasti vertaamalla kulloistakin taajuutta hyvin tunnettuun taajuusstandardiin.
SNR	Signal to noise ratio, signaalinvoimakkuus suhteessa kohinaan. Signaalin hyvyyden mittari, joka ilmaistaa usein desibeleissä.
dBc	Decibel to carrier, signaalinvoimakkuus suhteessa kanta-aaltoon. Verrannollinen tehoilmaus jolla verrataan kahden eri lähetteen keskinäistä tehosuhdetta.
dBc/Hz	Signaalinvoimakkuus 1Hz kaistanleveydellä verrattuna kanta-aaltoon. Laajakaistaista tai kohinanomaista signaalia kuvastava tehoilmaus, jonka avulla voidaan helposti tutkia signaalin kokonaistehoa tietyllä kaistanleveydellä. Esimerkiksi 1kHz kaistalla oleva kohina saadaan lisäämällä dB-lukemaan 30 (tuhatkertaistamalla teho).
pohjakohina	Kaikkialla oleva radiotaajuinen kohina. Rajoittaa pienimmän mahdollisen ilmaistavan signaalin tehotasoa siten, että signaalinvoimakkuuden tippuessa riittävän pieneksi sitä ei enää pystytä millään keinolla erottamaan pohjakohinasta.
dynaaminen toiminta-alue	Radio- tai mittalaitteen toiminta-alue, jolla signaalit käyttäytyvät lineaarisesti. Samalla mittauksella ei voida mitata dynaamisen alueen ylittäviä tehotaseroja, vaan yleensä voimakkain tehotaso heikkenee ja alkaa aiheuttamaan kohinan lisääntymistä viereisillä taajuuksilla.

Sana	Selitys
vaihelukittu vaihekohinan mitta	PLL phase detector phase noise measurement. Mitattavan oskillaattorin signaali sekoitetaan vertailuoskillaattoriin, jota säädetään sekoitustuloksen antamalla ohjausjännitteellä.
viivelinjadiskrimi-naattori vaihekohinan mitta	Delay-line discriminator phase noise measurement. Viivelinjalla toteutettu vaihekohinan mittaustapa jossa tutkittavan oskillaattorin signaali sekoitetaan itsensä kanssa viivästytettynä aallonpituudella. Tällöin nähdään kahden peräkkäisen aallon vaihe-ero.
injektiolukittu vaihekohinan mitta	Injection-locked phase noise measurement. Vapaasti värähtelevän (ohjaamattoman) oskillaattorin lukitseminen vertailuoskillaattoriin syöttämällä oskillaattoriin hyvin heikko näyte vertailuoskillaattorista. Oskillaattoreilla on yleisesti taipumus pyrkiä värähtelemään hyvinkin heikon samantaajuisen signaalin tahdissa.

Tämä artikkeli on julkaistu Skanneri -lehden numerossa 1/2004 (94).

<http://www.skannerilehti.net/>