

## Mittaustekniikan perusteet / luento 9

### Sähkömagneettiset häiriöt Signaali-kohinasuhteen parantaminen



Häiriökysymyksistä myös oma kurssi:  
S-108.3020 Elektroniikan häiriökysymykset

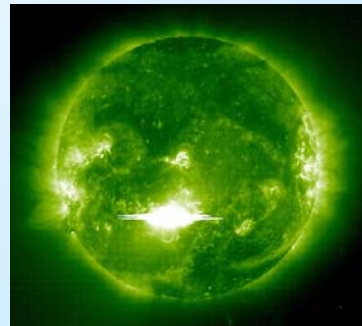
## Sähkömagneettiset häiriöt

Häiriö on ei-toivottu sähköinen signaali,  
joka voidaan poistaa mittauksista

- Häiriö voidaan poistaa esim. suojauksella tai suodatuksella
- Häiriö kytkeytyy usein mittauskohteeseen ulkopuolelta
- **Vertaa:** Kohinalla tarkoitetaan elektronisessa järjestelmässä **spontaania fluktuatiota**, joka aiheutuu jonkin laitteen, komponentin tai materiaalin fysiikasta

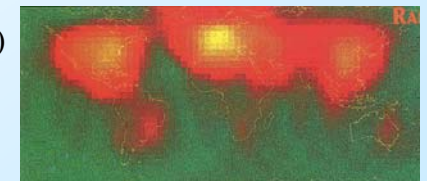
## Sähkömagneettiset häiriöt

- Luonnon aiheuttamat
  - Ukkoshäiriöt
    - 1000 V ylittyä vuosittain pienjänniteverkossa
    - Maadoitus on keskeinen torjuntakeino
  - Atmosfäärinen kohina
  - Aurinko
    - Magneettiset myrskyt
    - Kohina



## Sähkömagneettiset häiriöt

- Ihmisen aiheuttamat
  - Tarkoituksella säteilevät laitteet
    - Radiot, suurtaajuuskuumentimet etc.
    - Kapeakaistaisia
  - Häiriösäteilijät.
    - Periodiset impulssit, kytkimien häiriöt, hakkurit ym.
    - Laajakaistaisia
  - Sähkösiirtoverkko (50 Hz)



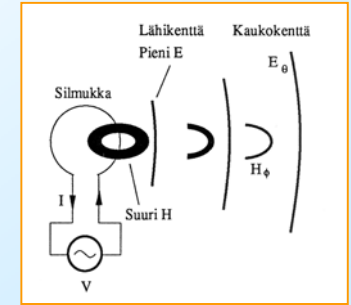
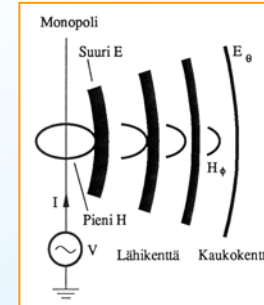
# Häiriöiden kytkeytyminen

- Sähkömagneettisen kentän kytkeytyminen
  - Voidaan ratkaista Maxwellin yhtälöistä
    - Liian monimutkaista käytännön sovelluksiin
  - Yksinkertaistus: lähikenttä (dimensiot  $< \lambda$ )
    - MG-kenttä  $\rightarrow$  keskinäisinduktanssi
    - Sähkökenttä  $\rightarrow$  keskinäiskapasitanssi
    - Usein hyvä approksimaatio, koska valtaosa häiriöistä 1 MHz:n alapuolella ( $\lambda > 300$  m)
- Kytkeytyminen johtamalla yhteisen impedanssin kautta

# Häiriöiden kytkeytyminen

Suuri-impedanssisessa kentässä sähkökenttä dominoi: kytkeytyminen tapahtuu pääasiassa kapasitiivisesti

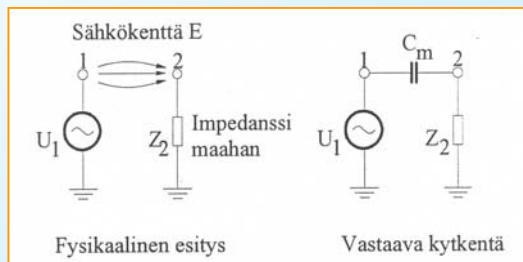
Pieni-impedanssisessa kentässä magneettikenttä dominoi: kytkeytyminen tapahtuu pääasiassa induktiivisesti



Kaukokentässä:  $\frac{E}{H} \approx 377 \Omega$

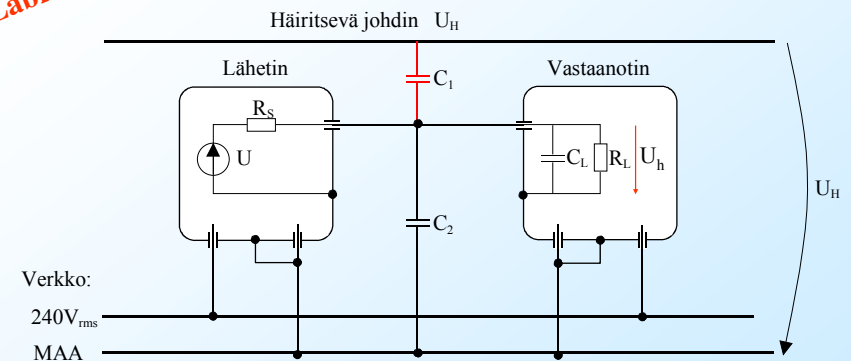
# Kapasitiivinen kytkeytyminen

- Kytkeytyy tyypillisesti johdinten välillä (esim. mittajohto ja verkkojohdin)
- Kytkentä on tyypillisesti ylipäästösuodatin
  - Piirissä tapahtuu jännitteenjako keskinäiskapasitanssin ja piirin impedanssin (osin resistiivinen) välillä
  - Suuret taajuudet kytkeytyvät helposti



# Kapasitiivinen kytkeytyminen

**Labratyössä**

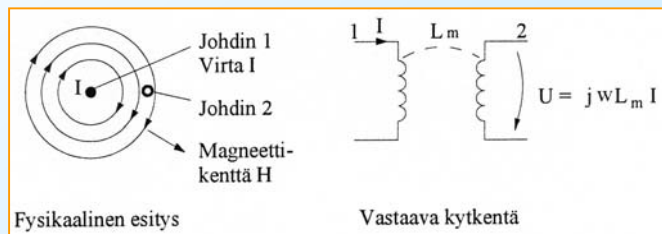


$$U_h = \frac{j\omega C_1}{j\omega(C_1 + C_2 + C_L) + 1/R_s + 1/R_L} U_H \rightarrow |U_h| \approx 2\pi f R_s C_1 U_H$$

$R_s$  pieni

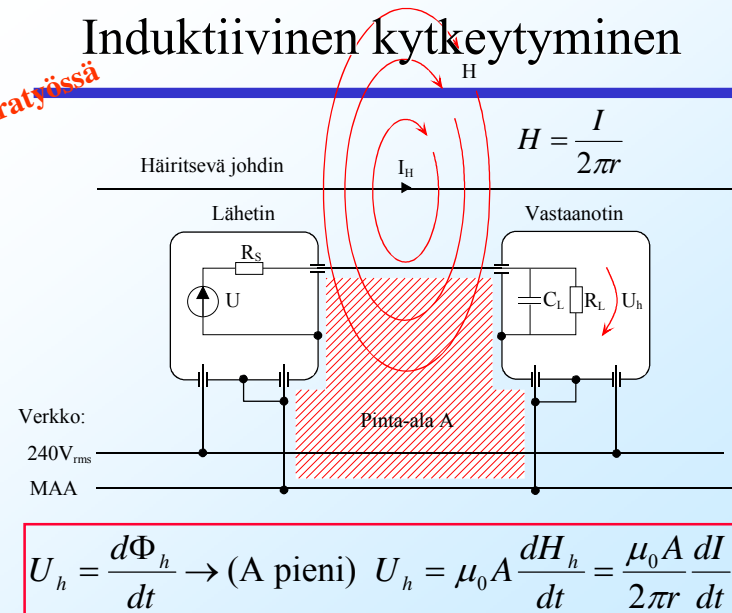
## Induktiivinen kytkeytyminen

- Virta aiheuttaa ympäristöönsä magneettikentän  $H$ 
  - Kenttä kytketty mittauspiirin johdinten muodostamaan **virtasilmukkaan** (mittausjohdot, maajohdot...)
- Piirin koko pieni suhteessa aallonpituuteen  $\rightarrow$ 
  - Kytkeytymistä voidaan tarkastella keskinäisinduktanssin  $L_m$  avulla
  - Häiriöjännite  $U$  kytketty sarjaan mitattavan jännitteen kanssa
  - Suuret taajuudet kytkettyvät helposti:  $U = L_m \frac{dI}{dt} = j\omega L_m I$  (sin)



## Induktiivinen kytkeytyminen

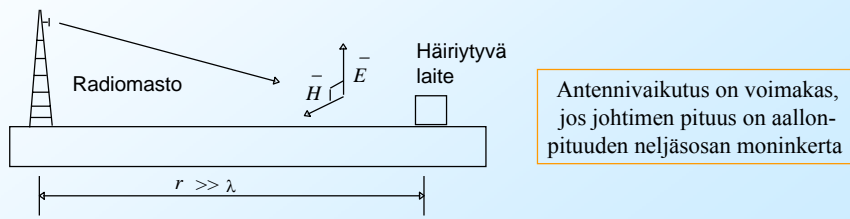
Labratyössä



$$U_h = \frac{d\Phi_h}{dt} \rightarrow (\text{A pieni}) \quad U_h = \mu_0 A \frac{dH_h}{dt} = \frac{\mu_0 A}{2\pi r} \frac{dI}{dt}$$

## Sähkömagneettisen kentän kytkeytyminen

- Merkittävä radiotaajuuksilla
  - Piirin mitat voivat olla aallonpituuden suuruusluokkaa  $\rightarrow$  johdot toimivat vastaanottoantenneina
  - Vaimenee kaukokentässä kääntäen verrannollisena etäisyyteen (kaukokenttä: lähteen etäisyys  $\gg$  häiriön aallonpituus)



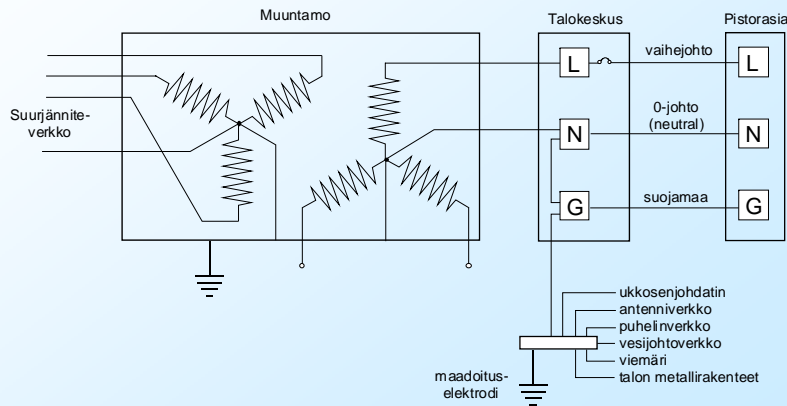
- Epälinearisuuksien takia suuritaajuiset kentät voivat häiritä myös tasasähkömittauksia (tasasuuntautuminen)

## Häiriöiden torjunta

- Kolme tapaa torjua häiriöitä
  1. Estetään häiriöiden syntyminen
  2. Katkaistaan häiriöiden etenemistä
  3. Parannetaan häiriönsietoa
- Toimiva maadoitus on ensiarvoisen tärkeä
- Keinoja (esim.):
  - Johdinten ja piirien järjestely
  - Symmetointi
  - Kotelointi (metalli)
  - Suodatus, eri taajuuksien erottelu
  - Modulaation käyttö
  - Analogia-digitaalimuunnos

# Maadoitus

- Maadoituksen tehtävät:
  - **Tehdä laite turvalliseksi käyttäjälleen**
  - Tarjota sama maapotentiaali järjestelmän eri osille
  - Estää laitteiden vaurioituminen vikatilanteissa

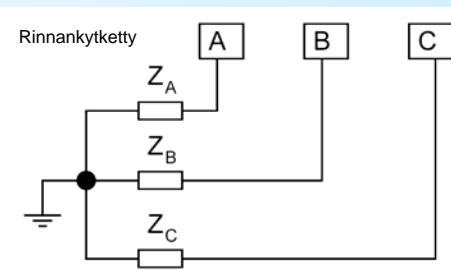
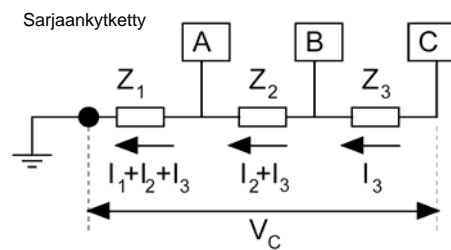


# Kaksi ”eri” maadoitusta

- Sähköverkon maadoitus: suojamaa ja verkon 0-johdin
  - Verkon 0-johdin (Sininen) on osa virtapiiriä ja tarjoaa paluutien kulutuskojeen virralle
  - Suojamaa (KeVi) on normaalitilanteessa virraton
    - Turvallinen reitti vikavirroille (metalliset laitekotelot)
  - Molemmat on kytketty maapotentiaaliin
- Elektronisen laitteen signaalimaa
  - = Jännitteen referenssitaso eri laitteille (voi olla kelluva)
    - Suureen arvo on verrannollinen poikkeamaan referenssitasosta
    - Signaalimaa on usein kytketty verkon suojamaahan
  - Johtimet *epäideaalisia* (resistanssia, induktanssia) → Signaalimaan potentiaali saattaa vaihdella eri puolilla laitteistoa

# Järjestelmien maadoitustapoja

- **Sarjaankytketty** maadoitus (yleensä huonoin vaihtoehto, vältettävä)
- **Rinnankytketty** maadoitus (puumaiset verkot)
- Monipistemaadoitus (suurilla taajuuksilla)
- Signaalimaataso piirikortilla

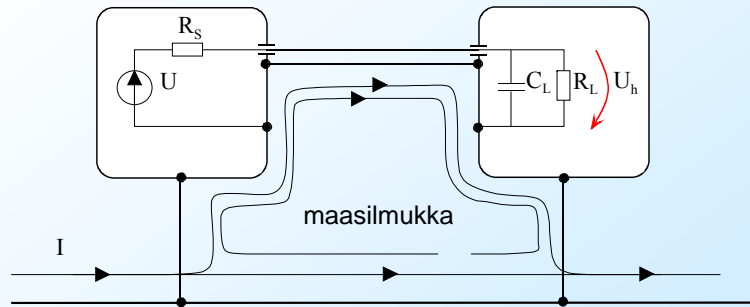


Kuvat: ABB:n TTT-käsikirja

# Maadoitus

- **Maasilmukat**
  - Maasilmukka syntyy, kun järjestelmä on kytketty useammasta kuin yhdestä pisteestä maapotentiaaliin
  - Seuraus: maapotentiaali (referenssitaso) järjestelmän eri osissa vaihtelee → häiriö
  - Syy: maajohtimien virrat × resistanssi (induktanssi) = jännite
    - Mittalaitteiden tehollähteet → 50 Hz häiriö
    - Suuret silmukat → induktiiviset häiriöt
  - Huom: Signaalimaat kytketty laitekoteloihin, jotka taas verkon suojamaahan → maasilmukka saattaa sulkeutua sähköverkossa!

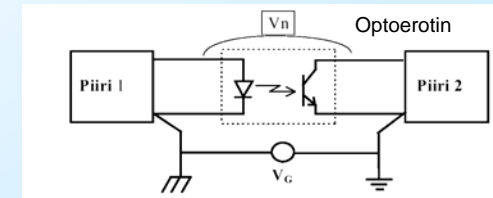
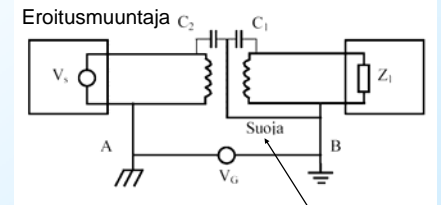
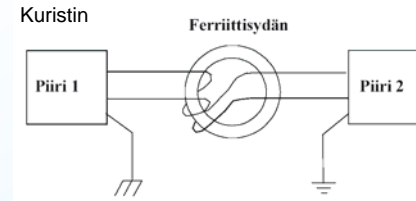
## Maadoitus



Laitekoteloiden välisen maajohdon resistanssi (impedanssi) muuttaa maasilmutkassa kiertävän virran laitekoteloiden väliseksi häiriöjännitteeksi

## Maadoitus

- Maasilmutkoiden katkaisu (esimerkkejä)

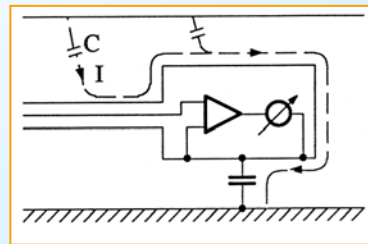


Staattinen suoja

Kuvat: ABB:n TTT-käsikirja

## Häiriöiden torjunta Johdinten ja piirien järjestely

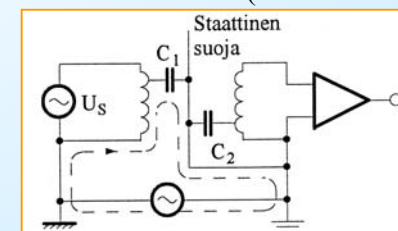
- Kapasitiivisesti kytkeytyvän häiriön pienentäminen
  - Pienennetään johdinten välistä kapasitanssia
    - Johtimien etäisyys ja suunta
    - Metallikotelointi = sähköstaattinen suojaus
  - Johdinten sijoitus lähelle maatasoa



Kapasitiivisesti kytkeytyvää häiriötä voidaan pienentää käyttämällä mahdollisimman matalia impedanssitasoja

## Häiriöiden torjunta Johdinten ja piirien järjestely

- **Sähköstaattinen suojaus:** maadoitettu metallikotelo, -häkki tai -punos, jonka sisällä johto, laite, laitteen osa tai kokonainen huone on (esim. koaksiaalikaapeli)
  - Suojaa kapasitiiviselta kytkeytymiseltä (sekä sähkömagnetiseltä kentältä)
  - Esimerkki: muuntajan käämien välinen kapasitiivinen kytkeytyminen voidaan estää käämien välisellä maadoitetulla metallifoliolla (staattinen suoja)





## Häiriöiden torjunta

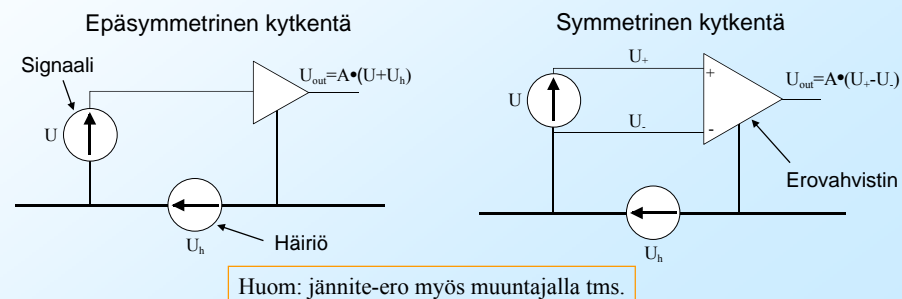
### Johdinten ja piirien järjestely

- Induktiivisesti kytkeytyvän häiriön pienentäminen
  - Pienennetään johdinten välistä induktanssia
    - Vältetään pitkiä yhdensuuntaisia johdotuksia
    - Johtimien suunta
    - Signaalijohdot ja niihin liittyvät maadoitusjohdot (paluujohtot) vierekkäin
    - Hyvin suojatut kaapelit
      - Kierretyt parikaapelit
      - Symmetointi
  - Tiivis metallinen laitekotelo (my-metalli)

## Häiriöiden torjunta

### Symmetointi

- Symmetrisessä kytkennässä
  - Signaali  $U$  välitetään + ja - kanavien jännite-erona (differential-mode)
    - Vahvistuu erovahvistimessa
  - Häiriö  $U_h$  kytkeytyy (pääosin) samalla tavoin yhteismuotoisena (common-mode) molempiin kanaviin
    - Kumoutuu erovahvistimessa



## Häiriöiden torjunta

### Symmetointi

- Symmetrisen jännitteen vaimennusta kuvataan:
  - **CMR**, eli yhteismuotoisen jännitteen vaimennus
  - **CMRR**, eli yhteismuotoisen jännitteen vaimennussuhde
  - Käytännön erovahvistimien vaimennus yhteismuotoiselle jännitteelle ei ole ääretön:

$$U = A_e U_e + A_y U_y$$

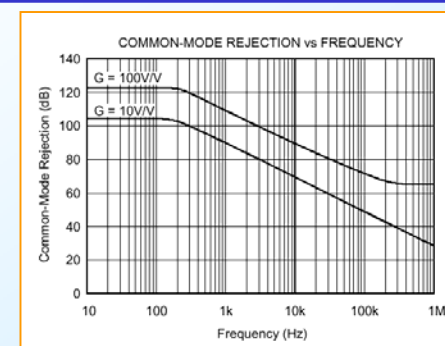
Määritellään:

$$CMRR = \frac{|A_e|}{|A_y|} \quad \text{tai} \quad CMR = \frac{1}{|A_y|}$$

## Häiriöiden torjunta

### Symmetointi

- CMR ja CMRR
  - CMR ja CMRR pienenevät taajuuden kasvaessa
  - Riittävän suuri yhteismuotoinen jännite kyllästää piirin



- Mikäli mittapiirissä on epäsymmetriaa, muuttuu yhteismuotoinen jännite ero-muotoiseksi ja järjestelmän CMRR ja CMR pienenevät



Kuvat: Burr-Brown

## Häiriöiden torjunta

### Suodatus

- **Kohinan ja häiriöiden vaikutusta mittaukseen voidaan pienentää kaventamalla taajuuskaistaa**
  - Kohinajännitteen tai -virran tehollisarvo riippuu mittauksen kaistanleveydestä.
    - Terminen kohina:  $u_n = \sqrt{4kTRB}$   $B$ =kaistanleveys
    - Raekohina:  $I_n = \sqrt{2eI_{dc}B}$
    - Valkoinen kohina yleisesti:  $u_n = A \cdot \sqrt{B}$
  - Häiriöille kaistanleveysriippuvuus usein voimakkaampi.
    - Häiriö voi olla kokonaan kaistan ulkopuolella
    - Impulssihäiriö:  $\hat{u}_n = A \cdot B$

## Häiriöiden torjunta

### Suodatus

- Muistin virkistykseksi: signaali-kohinasuhde

Kohinattoman signaalin tehon  $P_s$  ja kohinatehon  $P_n$  suhde:

$$SNR = 10 \log \left[ \frac{P_s}{P_n} \right] \text{ [dB]}$$

tai signaalin tehollisarvon  $V_{RMS}$  ja kohinan tehollisarvon  $e_n$  suhde:

$$SNR = 20 \log \left[ \frac{V_{RMS}}{e_n} \right] \text{ [dB]}$$

Signaali-kohinasuhdetta laskettaessa sisällytetään kohinaan usein kaikki ei-toivottu signaali - myös häiriöt

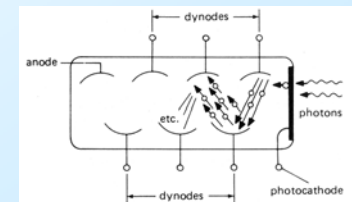
## Häiriöiden torjunta

### Suodatus

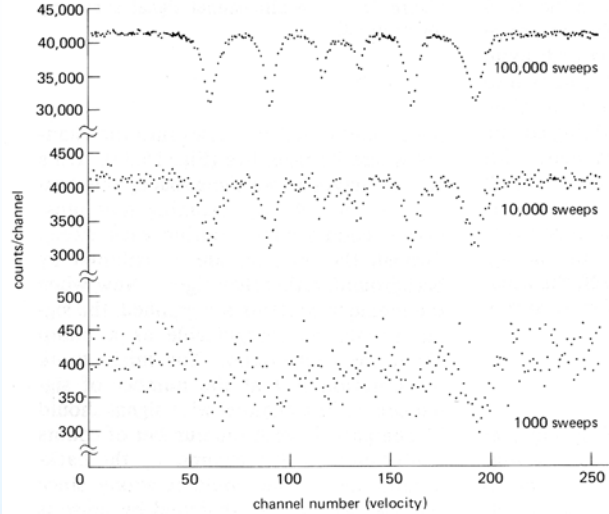
- Menetelmiä signaali-kohinasuhteen parantamiseksi:
  - Aktiiviset ja passiiviset suotimet
  - Keskiarvoistus
    - Jaksolliset signaalit, voidaan tehdä digitaalisesti.
  - Korrelaatiotekniikka
    - Jaksolliset signaalit, tehdään digitaalisesti.
  - Vaiheherkkä ilmaisu, lock-in vahvistin
    - Signaalin modulointi
- Suotimen kaistanleveys ei voi olla signaalin kaistanleveyttä pienempi.

## Keskiarvoistus

- Mittaus mahdollista toistaa (tai mitattava ilmiö on luonteeltaan toistuva) → signaali-kohinasuhdetta voi parantaa keskiarvoistamalla
- Esimerkkejä
  - Pilvenkorkeusmittari
  - Spektroradiometri (valomonistinputki)
- Signaali/kohina-suhde paranee suhteessa  $\sqrt{t}$ :hen (tai  $\sqrt{N}$ :ään)



## Keskiarvoistus



### Mössbauer-resonanssi

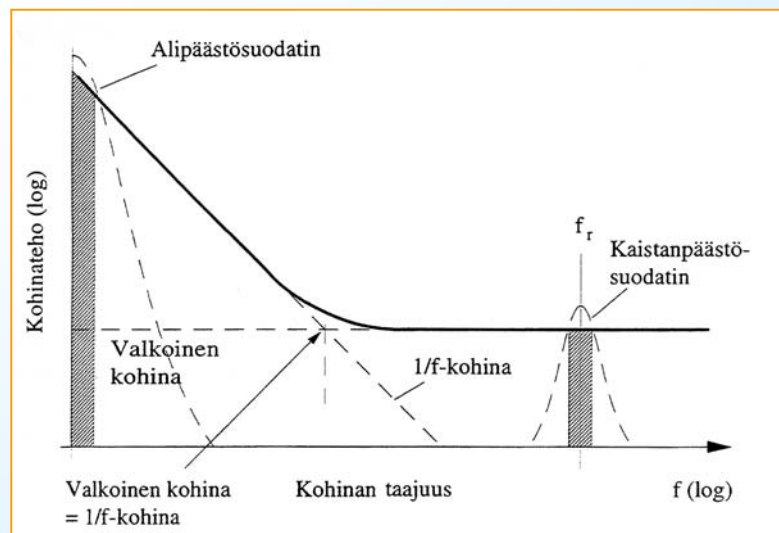
Co 57:n lähettämän  
gamma-säteilyn absorptio  
Fe 57 kalvossa

$$n_s = 0.1$$
$$n_k = 0.4$$

## Modulointi

- Häiriöt ja kohina eivät ole jakautuneet tasaisesti eri taajuuksille
  - $1/f$ -kohina
  - Suurin osa häiriöistä alle 1 MHz:n taajuuksilla
    - ⇒ Häiriöiden ja kohinan vuoksi AC-signaalin amplitudin pieni muutos on paljon helpompi mitata, kuin DC-signaalin tason pieni muutos.
- Tämän vuoksi monissa mittauksissa käytetään moduloituja signaaleja
  - Moduloimalla mittaus siirretään esim. DC:ltä korkeammille taajuuksille

## Modulointi



## Lock-in -vahvistin

- Vaiheherkkä ilmaisu on eräs kokeellisen fysiikan tärkeimmistä mittausmenetelmistä.
  - Lock-in vahvistin siirtää mittauksen suuremmille taajuuksille moduloimalla
  - Kaistanleveys on mahdollista valita hyvin pieneksi.
    - Kaistanleveys voi olla esim. 1 mHz.
    - Signaali-kohinasuhde paranee
    - Häiriöiden vaikutus pienenee
- Mahdollistaa nV-tasoisten signaalien mittauksen, sekä mittaukset kohinaisissa ympäristöissä.



## Lock-in -vahvistin

- Miksi käyttää lock-in vahvistinta?

Esimerkki: mitataan  $10 \text{ nV}_{\text{RMS}} / 10 \text{ kHz}$  siniaaltoa

Vahvistus 1000  $\Rightarrow$  signaali:  $1000 \times 10 \text{ nV} = 10 \text{ } \mu\text{V}$

- **Tavallinen mittausvahvistin:**

Kohina  $5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ , kaistanleveys  $100 \text{ kHz}$

$\Rightarrow$  kohina:  $1000 \times 5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} \times \sqrt{(100 \text{ kHz})} = 1.6 \text{ mV}$  😞

- **Sama mittausvahvistin + hyvä suodatin:**

Kaistanleveys  $100 \text{ Hz}$

$\Rightarrow$  kohina:  $1000 \times 5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} \times \sqrt{(100 \text{ Hz})} = 50 \text{ } \mu\text{V}$  😞

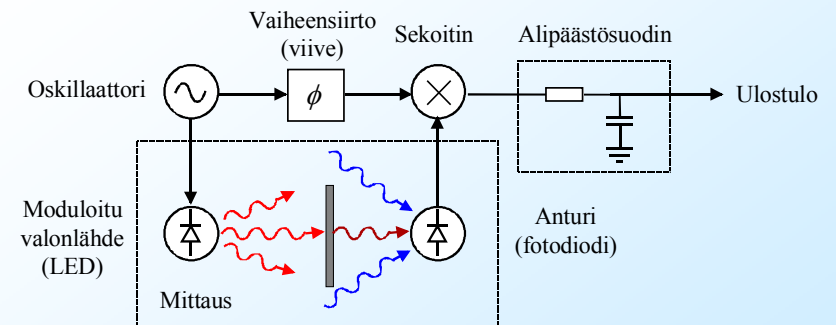
- **Lock-in vahvistin:**

Kaistanleveys esim.  $10 \text{ mHz}$ , vahvistus ja kohina kuten ed.

$\Rightarrow$  kohina:  $1000 \times 5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} \times \sqrt{(0.01 \text{ Hz})} = 0.5 \text{ } \mu\text{V}$  😊

$\Rightarrow$  signaali-kohinasuhde:  $26 \text{ dB}$

## Lock-in -vahvistin



## Sekoitin (mikseri)

- Sekoitin **muuttaa signaalin taajuuden** siten, että signaalin informaatio säilyy

- Perustapaus: analoginen kertoja

$$\sin(\omega_1 t) \xrightarrow{\text{sekoitin}} \begin{cases} \sin(\omega_1 t) \times \sin(\omega_2 t + \varphi) = \\ \frac{1}{2} [\cos(\omega_1 t - \omega_2 t - \varphi) - \cos(\omega_1 t + \omega_2 t + \varphi)] \end{cases}$$

Erotaajuus                      Summataajuus

- Sekoitin on **epälineaarinen** komponentti
- Digitaalisissa lock-in vahvistimissa signaali näytteistetään ja tulo lasketaan prosessorilla

## Lock-in -vahvistimen toiminta

- Signaalit:

- Modulointisignaali ja referenssisignaali samalla taajuudella

$$u_m = U_m \sin(\omega t) \quad u_r = U_r \sin(\omega t + \varphi)$$

- Näiden tulo kertojalla:

- Erikoistapaus, koska molemmat samalla taajuudella

$$u_m \times u_r = \frac{U_m U_r}{2} (\cos(-\varphi) - \cos(2\omega t + \varphi))$$

Vaihe-erosta riippuva DC-termi

- Alipäästösuodatus:

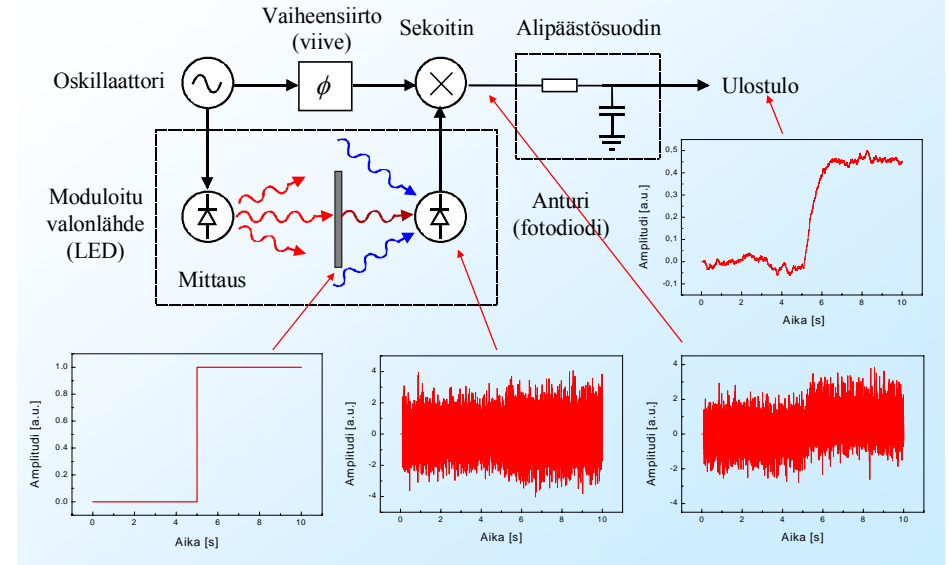
- Poistetaan **toinen harmoninen** (+ korkeammat harmoniset)

$$u_m \times u_r = \frac{U_m U_r}{2} \cos(-\varphi) = \text{Vaiheherkän ilmaisun perusyhtälö}$$

# Lock-in -vahvistimen toiminta

- Mitä lock-in vahvistin mittaa?
  - Lock-in vahvistin kertoo sisääntulevan signaalin (mahdollisiman) puhtaalla siniaallolla
  - Alipäästösuodatin 'keskiarvoistaa' tuloksen
  - kahden siniaallon **tulon keskiarvo on nolla**, elleivät signaalit ole tasan samalla taajuudella
  - Eli:** lock-in vahvistimen DC-ulostulo on verrannollinen sisääntulevan signaalin siihen komponenttiin, jonka taajuus on sama kuin referenssitaajuus
  - Voidaan käyttää etsimään tunnetun muotoista signaalia kohinasta

# Lock-in -vahvistimen signaalit



# Lock-in -vahvistimen signaalit

