

Kursbrev 7

Extremt känsliga sensorer.

Genom att utnyttja ny fysik som ofta involverar kvantfysik kan man skapa extremt känsliga sensorer. Ofta måste dessa sensorer också arbeta vid mycket låga temperaturer. Här kommer vi att diskutera tre sådana sensorer. Två av dessa, nämligen Enelektron-transistorn (benämns ofta SET Single Electron Transistor) och den så kallade SQUIDen (Superconducting Quantum Interference Device) liknar varandra väldigt mycket. SETen kan mäta laddning extremt noggrant (laddnings förändringar som är mindre än en elektronladdning) medan SQUIDen kan mäta magnetiskt flöde extremt noggrant. På sätt och vis kan man säga att de är två sidor av samma mynt. Laddning och magnetiskt flöde är nämligen vad man kallar konjugerade variabler. Båda sensorerna utnyttjar tunnelövergångar, dvs två metaller separerade av en mycket tunn oxid. Ett sätt att beskriva detta är med den så kallade Kvanttriangeln där man med hjälp av tre kvanteffekter kan omvandla frekvens ström, och spänning till varandra enbart med hjälp av natur konstanter. Josephson Effekten, utgör basen för SQUIDar, Coulomb blockad utgör basen för SETar och Kvant Hall Effekten (vi behandlar in den här) är en effekt som utnyttjas för att definiera resistans.

SET

På hemsidan under "Kursbrev" hittar du en artikel från Kosmos (på Svenska) som behandlar enelektrontransistorn.

SQUID

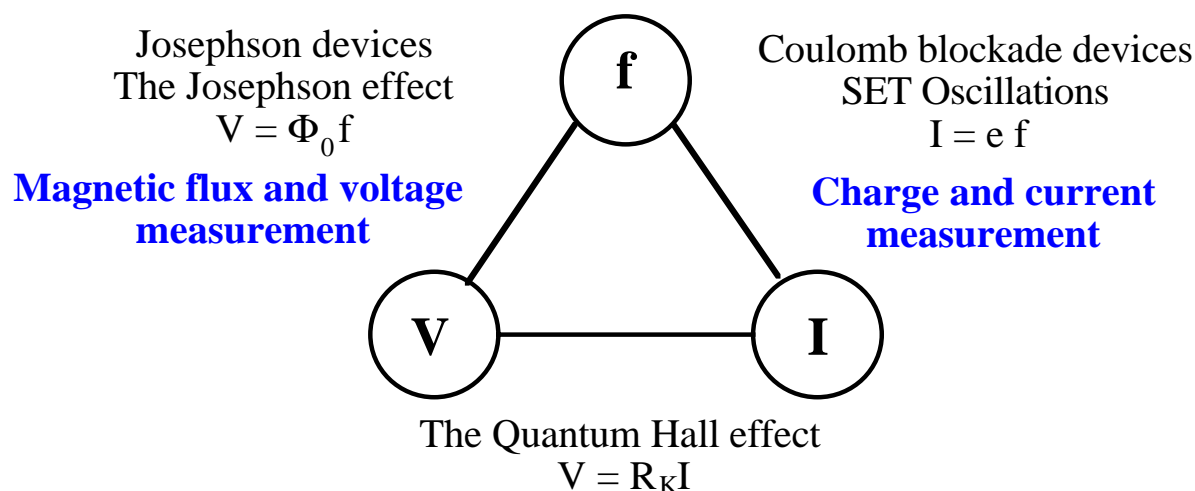
Nedan finns en beskrivning av SQUIDar. SQUIDar utnyttjar supraledande metaller och den som vill veta lite mer om supraledning kan gå till Dag Winkler's hemsida:

<http://fy.chalmers.se/~winkler/Research/Intro/SCintro.html>

SIS

Dessutom finns nedan en beskrivning av en annan supraledande komponent som är extremt känslig för mikrovågs strålning den så kallade SIS-blandaren med vilken enstaka fotoner kan detekteras.

The Quantum Triangle



Kortfattad beskrivning av SQUID-principen

SQUIDar baserar sig på kvantfenomen i supraledare och de används företrädesvis för mätningar av ytterst svaga magnetfält. Eftersom SQUIDar arbetar i kvantgränsen där grundläggande kvantmekanik (Heisenbergs osäkerhetsrelation) sätter gränsen kan man teoretiskt sett upplösa förlopp motsvarande den energi som motsvarar fritt fall för en väteatom i gravitationsfältet på 200 Å. I praktiken ligger upplösningen på ca $1\text{-}5\cdot 10^{-32}$ J/Hz (eller 100-500 ϕ_0 , ($\phi_0 = h/2\pi = 1.05\cdot 10^{-34}$ Js).

Det visar sig att om man har en supraledande ring eller loop, så kan enbart kvantiserade magnetflöden existera i ringen, dvs en, eller två, eller flera sk flödeskvanta (ϕ_0) kan finnas i ringen. Flödeskvantat är mycket litet, $\phi_0 = h/2e = 2\cdot 10^{-15}$ Vs. I en SQUID har man brutit av ringen på ett eller två ställen med sk Josephsonelement (supraledande tunnelement). (Har man ett Josephsonelement talar man om en *rf* SQUID och har man två Josephsonelement talar man om *dc* SQUID.)

På liknande sätt som för ljus eller ljud kan man beskriva det supraledande tillståndet med en enda vågfunktion för de elektroner som deltar i supraledandet. Detta gör att man kan få interferenseffekter. Från optiken har vi den kända interferenseffekten i Youngs dubbelspalt (koherent, monokromatiskt ljus som passerar två parallella spaltöppningar i en skärm ger upphov till ljusmaxima på en skärm bakom dubbelspalten i de områden där ljuset har gått lika långt eller med en skillnad på ett helt antal våglängder från de två spalterna).

För en *dc* SQUID motsvaras de två spaltöppningarna helt analogt av de två Josephsonelementen som ligger i var sin arm av den supraledande ringen. Istället för att vi får ljusmaxima som funktion av rumsläget, får vi för en *dc* SQUID strömmaxima som funktion av magnetflödet i ringen (magnetfält motsvaras av en rotation i rummet).

Med SQUIDar kan man mäta extremt små fält, som bäst experimentellt ca $1\text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ (dvs $10^{-15}\text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$) [1,2]. Den teoretiska energiupplösning motsvarar fritt fall för en elektron i gravitationsfältet på 6 μm . Vidare kan man koppla SQUID-kretsarna så att man kan mäta extremt små strömmar ($1\cdot 10^{-13}$ A/ $\sqrt{\text{Hz}}$) eller spänningar ($2\text{ pV}/\sqrt{\text{Hz}}$) [3,4].

Det finns ett antal parametrar som omsorgsfullt måste väljas för att man skall erhålla den bästa känsligheten hos en SQUID. Dels måste den kritiska strömmen, I_c , (eller Josephsonkopplingen mellan de supraledande ringhalvorna) göras större än det termiska brus som finns vid arbetstemperaturen (vanligen 4 eller 77 K). Vidare måste ringen begränsas i storlek så att de cirkulerande strömmarna genom ringens induktans (L) tillsammans med biasströmmen (ca $1.4 \cdot I_c$) inte mättar SQUIDen ($2I_c L \approx \phi_0$ för bästa respons). Dessa villkor gör att den effektiva ytan för att koppla magnetfält blir liten, och för att få hög känslighet för fält kopplar man vanligtvis en större pick-up spole till SQUIDen genom en transformatorkoppling. För de traditionella kretsar som görs i lågtemperatur-supraledande (LTS) material, är detta inga svårigheter, medan för de keramiska högtemperatur-supraledarna (HTS) är det betydligt besvärligare.

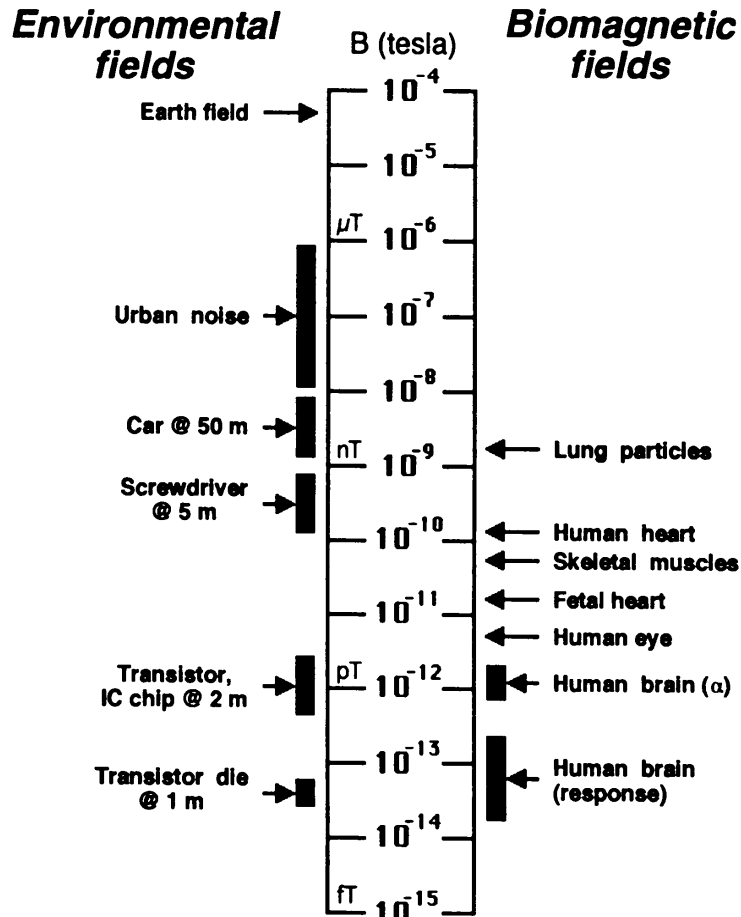
Tillämpningar idag och tillämpningar under utveckling

SQUID-magnetometrar i LTS säljs idag kommersiellt för flera tillämpningar. Inom medicinen används SQUIDar [5] för undersökningar av ströminducerade fält från hjärnan och hjärtat och för diagnos av sjukdomar hos dessa organ och för en del leversjukdomar. Svenska läkare (Karolinska sjukhuset) undersöker epilepsipatienter med SQUID-utrustning för att lokalisera centrat som utlöser epileptiska anfall. Utan kirurgiska ingrepp lyckas man bota majoriteten av de behandlade patienterna med hjälp av en sk strålkniv. Vidare säljs instrumentation för mätning av magnetiska moment för forskningsändamål och för andra avancerade mätningar. Inom mineralprospektering, ubåts-detektion samt kommunikation och kartläggning med hjälp av satellit undersöks möjligheterna att använda SQUIDar. I USA lär man ha installerat SQUID-sensorer som varningssystem för jordbävningar. Ett stort intresse finns nu också för att använda sig av SQUIDar som känsliga förstärkare för lågfälts och lågfrekvens NMR [6-8], samt för brustermometri. I flera forskningslaboratorier undersöker man också möjligheterna att använda sk scanning SQUID (svep-SQUID-mikroskop) för icke-förstörande materialprovning [9,10] (t ex för att upptäcka dolda sprickor i hjulfälgar eller runt pop-nitar i flygplanskonstruktioner). Fördelen med SQUIDar jämfört med konventionell teknik (virvelströmsprobar) är att man kan arbeta vid mycket lägre frekvens vilket ger ett betydligt större sk inträngningsdjup ("skin-depth"), cm i stället för mm. Denna typ av utrustning för att karakterisera integrerade halvledarkretsar på kiselskivor har införskaffats vid INTEL. Genom att mäta magnetfältet som uppstår från strömmarna i halvledarkretsarna och deras ledningsmönster, kan man exempelvis hitta kortslutningar eller andra problem som har uppstått i tillverkningskedjan och rätta till processlinan. Vidare undersöks möjligheten att karakterisera

dopningsnivåer och kvalitet hos kiselskivor före produktion genom att belysa skivorna med korta ljuspulser och studera de rekombinationsströmmar som uppstår i materialet från de exiterade laddningsbärarna (elektroner och hål).

Konkurrerande teknologi

Inom flera tillämpningar finns konkurrerande teknologi. Eftersom detta kräver en egen utredning skall vi här enbart beskriva magnetometer-alternativ till SQUID-magnetometern. I Fig. 2 har vi återgett data från ref. [11].



Comparison of selected biomagnetic fields and environmental disturbances.

Forskningsläget för HTS-SQUID

Flera review-artiklar har publicerats inom SQUID-området [2,6,11,12]. Mycket intensiv forskning och utveckling pågår för tillfället i hela världen för att förverkliga motsvarande komponenter i HTS. Medicinska tillämpningar (såsom avbildande MEG) såväl som icke förstörande materialprovning är av stort intresse. Demonstrationsenheter för undervisning säljs av ett företag i Californien. I USA och Tyskland har man demonstrerat MKG-mätningar (magnetokardiogram) [13] med HTS kretsar. Ett problem som måste lösas innan ett kommersiellt genombrott nås, är att kunna växa flera lager av supraledare separerade av lämpliga isolatormaterial. Ett flertal laboratorier påstår sig behärska denna teknologi, men man kanske skall ta dessa uttalanden med en nypa salt. Visserligen går det säkert bra att växa multilager med supraledare med god kvalitet både i det nedre och övre lagret och med hyfsad isolation mellan lagren inom begränsade områden. Men sedan skall man även implementera Josephson-elementen, skapa kontakt mellan de olika lagren, och låta den övre filmen "vandra" över kanterna till de tidigare mönstrade filmerna utan avbrott eller sk svaga länkar. I motsats till flerlagerteknologin, fungerar enlagerteknologin mycket väl, och det finns koncept för att åstadkomma hyfsat bra kretsar med denna metod för ett flertal tillämpningar.

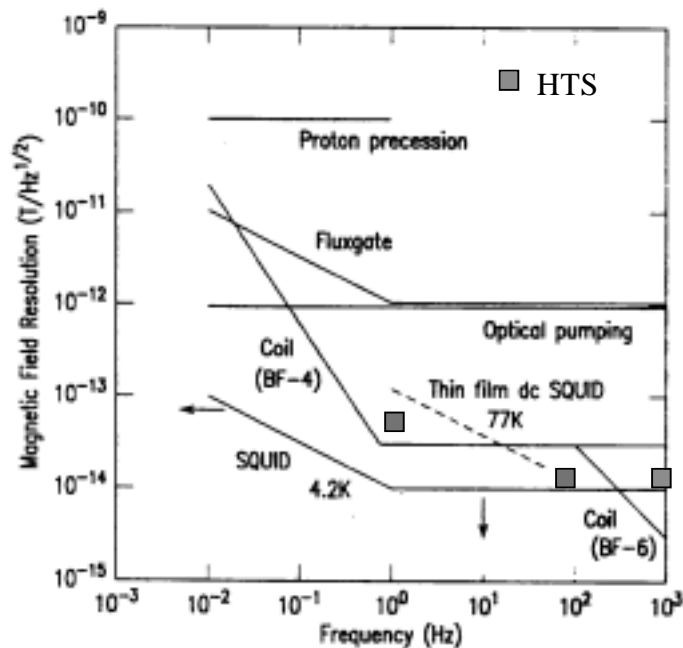


Fig. 2. Data på olika magnetometrar

Referenser

- [1] M.B. Ketchen and J.M. Jaycox, "Ultra-low-noise tunnel junction dc SQUID with a tightly coupled planar input coil", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 40, pp. 736-738, April 1982.
- [2] D. Drung, "Recent low temperature SQUID developments", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 4, pp. 121-127, September 1994.
- [3] V. Polushkin, D. Drung, and H. Koch, "A broadband picovoltmeter based on the direct current superconducting quantum interference device with additional positive feedback", *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 65, pp. 3005-3011, September 1994.
- [4] A.H. Miklich, D. Koelle, F. Ludwig, D.T. Nemeth, E. Dantsker, and J. Clarke, "Picovoltmeter based on a high transition temperature SQUID", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 66, pp. 230-232, 9 January 1995.
- [5] K. Shimizu, Y. Yoshida, Y. Ito, and M. Hosoba, "Medical Image Measurement - MRI, SQUID, Light Beam CT", *Systems Control and Information*, vol. 38, pp. 34, 1994.
- [6] J. Clarke, "Low frequency nuclear quadrupole resonance with SQUID amplifiers", *Z. Naturforsch.*, vol. 49a, pp. 5-13, 1994.
- [7] D.M. TonThat, J. Clarke, and M. Hurlimann, "DC SQUID Fourier transform spectrometer for Nuclear Quadrupole Resonance at 0-1 MHz", *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, to be published 1995.
- [8] S.L. Thomasson and C.M. Gould, "High slew rate large bandwidth integrated dc SQUID magnetometer for NMR applications", *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, to be published 1995.
- [9] L.N.C. Morgan, C. Carr, A. Cochran, D.M. McKirdy, and G.B. Donaldson, "Electromagnetic nondestructive evaluation with simple HTS SQUIDS: Measurements and modelling", *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, to be published 1995.
- [10] J.P. Wikswo(Jr), Y.P. Ma, N.G. Sepulveda, S. Tan, I.M. Thomas, and A. Lauder, "Magnetic susceptibility imaging for nondestructive evaluation," in *Applied Superconductivity*, Chicago, Sept. 1992.
- [11] J. Clarke and R.H. Koch, "The impact of high-temperature superconductivity on SQUID magnetometers", *Science*, vol. 242, pp. 217-223, 1988.
- [12] F. Wellstood, J. Kingston, and J. Clarke, "Thin-film multilayer interconnect technology for YBa~2Cu~3O~7~x", *Journal of Applied Physics*, vol. 75, pp. 683, 1994.
- [13] Y. Tavrín, Y. Zhang, W. Wolf., and A.I. Braginski, "A second-order SQUID gradiometer operating at 77 K", *Supercond. Sci. and Tech.*, to be published 1995.

Kort om SIS-blandare för radioastronomi

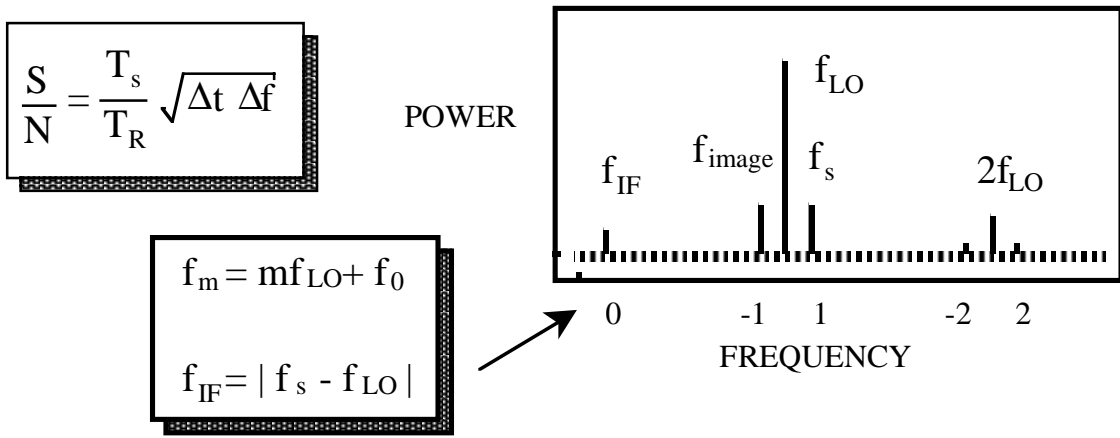
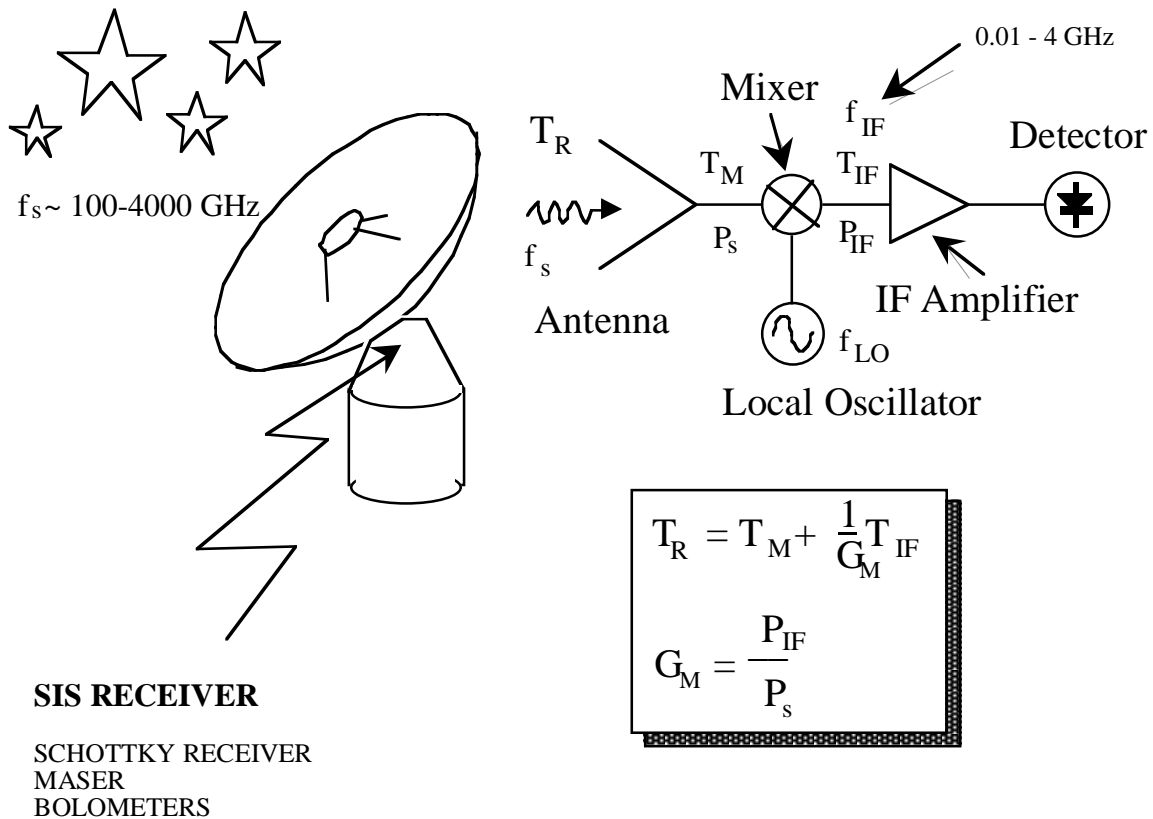


Fig. 1. Princip för blandarmottagare

Figur 1 visar schematiskt en del viktiga koncept som gäller för ett mottagarsystem. Såsom exempel ska vi se på ingångssteg hos ett mottagarsystem som används inom t ex radioastronomi. Det som visas i Fig. 1 är en sk blandarmottagare, och dessa används bl a då den inkommande frekvensen är för hög för att förstärkare baserade på ordinär halvledarteknologi skall hänga med. Man använder sig då av exempelvis ett mycket olinjärt krets-element, t ex en Schottkydiod, eller ännu bättre ett sk SIS-element (Supraledare-Isolator-Supraledare), vilket är en supraledande tunnelövergång. Se hemsidan:

<http://fy.chalmers.se/~winkler> och

<http://fy.chalmers.se/~winkler/Research/Intro/SCintro.html>

Gränsen då blandarmottagare måste användas flyttas med tiden högre upp i frekvens då man lyckas bygga bättre och bättre halvledarförstärkare. Idag ligger gränsen då man måste blanda ner frekvensen till en lägre kring drygt 100 GHz, men inom ett par år gissar jag att man är uppe nära 300 GHz. Rekordet för halvledarförstärkare ligger idag är vid 800 GHz ("unity-gain"), men brusegenskaperna kanske inte talar till kretsens fördel.

Inom radioastronomin tittar man spektroskopiskt på förekomsten av olika ämnen i Universum genom att plocka upp de svaga signaler som utsänds från molekyler som energimässigt går mellan två kvantiserade rotationsnivåer. Frekvensen hos den utstrålade eller upptagna energin är karakteristisk för den molekyl som avger eller upptar energin. Rotationsövergångarna ($\Delta E_{\text{rot}} = hf$, där h är 6.64×10^{-34} Js är Plancks konstant och f frekvensen) som studeras idag ligger i frekvens kring 10 – 1 000 GHz, eller i våglängd 3 cm ner mot 0,3 mm. Vidare ger dopplerskift en uppfattning om hur ämnena rör sig i förhållande till jorden.

Om vi tittar på Fig. 1 så ser vi att den signal som vi vill plocka upp tas in via en stor antenn (meter till tiotals meter i diameter) för att sedan kopplas in till mottagarkretsen. Antennens storlek bidrar dels till att plocka upp mer av den strålning som sänds ut och dels till att ge bättre riktningsegenskaper (den sk antennförstärkningen), vilket gör att man bättre kan kartlägga var de olika ämnena finns. När vi väl har fått strålningen dit vi vill koppla den, nämligen till det icke-linjära elementet, så kan där blanda ner den i frekvens till den sk mellanfrekvensen, MF (eller på engelska IF = intermediate frequency). Detta görs genom att man lägger på ytterligare en mycket starkare signal på blandarelementet, den sk lokaloscillatorn, LO. Den inkommande signalen, f_s , blandas då med den "kraftiga" LO till IF genom $f_{\text{IF}} = f_s - f_{\text{LO}}$. Effekterna vi pratar om här ligger under 10^{-12} W, dvs pW, och beroende på det icke-linjära elementet är LO-effekten mW ner mot nW. Generellt sett är det svårt att åstadkomma LO-element med hög uteffekt, så SIS-blandarna med mindre effektkrav är betydligt attraktivare än andra tekniker.

Du kan lätt verifiera att man åstadkommer blandningsprodukter (t ex mellanfrekvensen) av två signaler genom att göra följande matematiska övning. Antag att strömmen ges i det icke-linjära elementet genom:

$$I(V) = a_0 + a_1 V + a_2 V^2 + a_3 V^3 + \dots \quad (1)$$

Låt sedan spänningen V representeras av $V(t)$, där

$$V(t) = V_s \cos(\omega_s t) + V_{\text{LO}} \cos(\omega_{\text{LO}} t) \quad (2)$$

där ω är vinkelfrekvensen hos respektive signal. Vi har här lagt på två tidsberoende signaler för att se vad resultatet blir för strömmen som flyter i det icke-linjära elementet. I verkligheten är det betydligt besvärligare att ge en bra och korrekt bild över hur det hela blir, t ex eftersom de impedanser som verkar vid de olika frekvenserna är olika. Korsprodukterna i den tredje termen i ekv (1) kan sedan utvecklas till skillnadsfrekvensen.

Klassiska blandarelement, t ex Schottky-dioder, ger alltid en konversion till lägre frekvenser med förluster dvs förstärkningen $G_M = P_{\text{IF}}/P_s < 1$. SIS-blandarna kan i vissa fall ge förstärkning däremot. Om vi ser på vad som är viktigt för en radioastronom, så är det att få in så mycket data som möjligt under en mätning innan nästa experiment skall ta vid. (Antennerna och instrumentparken är dyrbara installationer och flera forskare måste samsas.) Det som bestämmer hur bra instrumentet är i detta avseende är signal-brusförhållandet, och detta ges av Dicks radiometerformel:

$$S/N = (T_s/T_R) (\Delta t \Delta f) \quad (3)$$

där T_s är signalens ekvivalenta brustemperatur (representerad av en svartkroppsstrålare) och T_R är mottagarens ekvivalenta brustemperatur på ingången. Vi ser att om mottagarens ekvivalenta brustemperatur på ingången kan minskas med en faktor två, så kan man tjäna en faktor 4 i den integrationstid, Δt , som behövs för att erhålla samma signal-brusförhållande. Vidare ser vi att signal-brusförhållande förbättras med större bandbredd, Δf , om vi tittar på svartkroppsstrålning (i princip vitt brus över ett begränsat frekvensområde). (Har vi en monokromatisk signal, så är resonemanget om Δf inte tillämpligt i en enkel överläggning, men resonemanget om integrationstid är det.)

I en förenklad uppställning kan vi tänka oss enbart blandarelementet, lokaloscillatorn och den efterföljande mellanfrekvensförstärkaren. Systembrustemperaturen refererad till ingången ges då av

$$T_R = T_M + T_{IF}/G_M \quad (4)$$

Vi ser här att blandarelementets brustemperatur är mycket viktig, men även konversionsförstärkningen, G_M , eftersom om denna kan minska bidraget från den efterföljande mellanfrekvensförstärkaren om $G_M > 1$. De sk SIS-blandarna har visat sig i bästa fall kunna göras så att de uppnår det lägsta möjliga brus som naturen (kvantmekaniken) sätter som gräns, den sk kvantbrusgränsen som ges av:

$$T_Q = hf/k_B \quad (5)$$

där $k_B = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K är Boltzmanns konstant.

Hur bestämmer man brustemperaturen hos ett mottagarsystem som vi beskrivit ovan. Ett sätt är att använda sig av den sk varm/kall-lastmetoden, där man tittar på hur utsignalen från mottagaren varierar som funktion av temperaturen hos en svartkroppsstrålare som används som signal. Systembrustemperaturen för mottagaren definieras som den temperatur som en svartkroppsstrålare måste ge på ingången för att man skall erhålla den dubbla signalen på utgången. Om vi exempelvis riktar mottagaren mot en svart skiva som har en temperatur vid 4.2 K och sedan riktar mottagaren mot en svart skiva vid 300 K, och signalen på utgången ändras från 20 mW till 40 mW, så ligger systembrustemperaturen på ca 300 K.

Idag arbetar de bästa mottagarsystemen med systembrus som ligger ca 5 - 10 ggr högre än kvantgränsen.

Övningsuppgifter (Skickas in)

1. En SET-transistor består av två tunnelövergångar som har en area av $50 \times 50 \text{ nm}^2$, och en kapacitivt kopplad gate-elektrod. Kapacitansen domineras av tunnelövergångarna, tunnelbarriären är 10 Ångström tjock och har en dielektricitetskonstant på $\epsilon=10$. Beräkna laddningsenergin för SET-transistorn och ange ungefär vilket temperaturområde den kan arbeta vid.
2. Visa hur man med trigonometri kan erhålla skillnads- och summafrekvenser från ekvation (1)–(2) i SIS dokumentet.
3. (a) Om ett mottagarsystem har en brustemperatur på 400 K och blandarelementet har en brustemperatur på 200 K och mellanfrekvensförstärkaren har 20 K, vad är konversionsförstärkningen (eller hellre konversionsförlusten, som det blir i det här fallet) för blandarelementet.

Extra uppgift

Fortsättning på uppgift 3 ovan. Om signalen som man tittar på ligger på 1000 GHz, hur mycket sämre är blandarelementets brustemperatur jämfört med den sk kvantgränsen?