

SQUIDs mærker dine tanker

Jørn Bindslev Hansen, NKT Research Center A/S.

Forestil dig neuro-sensorer indbygget i hovedtelefonen, - sensorer i et interface mellem menneske og computer, som får en lille pc til at registrere og tolke reaktioner og tanker, endnu inden du selv når at fatte dem. Om 15 år vil superledende sensorer kunne indgå i denne både fascinerende og skræmmende vision, som kunne være en del af en avanceret virtual reality fremtid.

Alle menneskelige sanseindtryk, tanker og handlinger genererer svage, lavfrekvente elektriske og magnetiske felter. De elektriske strømme i neuronerne er ansvarlige. Blandt kroppens mange neuroelektriske og neuromagnetiske aktiviteter er det nok de komplekse felter fra hjernen, som er de mest interessante. Samtidig er de også blandt de svageste signaler, den menneskelige organisme udsender (se figur 1).

De biologiske signaler ligger karakteristisk i et frekvensområde mellem 0,1 Hz og 1000 Hz. Hjernemåling i form af et *elektro-encephalogram* (EEG) eller et *magneto-encephalogram* (MEG) kræver måleinstrumenter med følsomheder på henholdsvis 0,1 - 100 μV og 1 - 100 fT (1 fT = 1 femtoTesla = 10^{-15} Tesla). Til lokalisering af hjerneaktivitet er magnetiske målinger langt mere effektive end elektriske. Årsagen hertil skal søges i hjernevæskens forholdsvis høje elektriske ledningsevne (ca. 80 gange lavere); denne opbygning medfører, at detaljer i de elektriske felter i hjernebarken (cortex) udviskes på kranietts yderside. Derimod udviser hjernevæsken og -skallen ingen væsentlig magnetisk susceptibilitet.

Indenfor de sidste 22 år er det blevet muligt at måle de magnetiske signaler fra nervestømmene i den menneskelige hjerne. Instrumentet, der har gjort dette muligt, er et *superledende kvanteinterferometer*, en SQUID (en forkortelse af det engelske "Superconducting Quantum Interference Device", sikkert valgt for at få et godt engelsk ord, der iøvrigt betyder en tiarmet blæksprutte).

En SQUID¹ består af en superledende ring med en eller to Josephson dioder. En SQUID er det hidtil mest følsomme måleinstrument til detektion af magnetiske og elektriske signaler i frekvensområdet under 100 Hz. For kommercielle 4,2 Kelvin SQUIDs er typiske følsomheder 3 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ og 1 fV/ $\sqrt{\text{Hz}}$. Prototype niobium SQUIDs kølet til nogle få Kelvin fungerer ned til den såkaldte kvantegrænse bestemt af Plancks konstant, $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J·s. Dette skal forstås sådan, at i en båndbredde på 1 Hz er energiopløsningen for SQUID'en ca 10^{-33} J; det svarer til den energi, der kan løfte en elektron 1/100 millimeter i jordens tyngdefelt). Disse modeller er dog ikke egnede til magnetiske målinger. En mere detaljeret forklaring på en SQUIDs opbygning og funktion findes i Thorsten Holst's artikel i dette blad.

Det kræver naturligvis en særlig teknik at måle svage magnetiske felter på baggrund af de meget kraftigere magnetiske felter, der findes i byområder (fig.1). Hertil benyttes dels balancerede spolesystemer (gradiometer-spoler), der kun er følsomme for *feltforskelle* (feltgradienter), dels magnetisk og elektrisk skærmning med plader af my-metal og af kobber eller aluminium.

Fluxtæthed/fT	Kilde
10^{10}	Jorden
10^9	
10^8	Storby
10^7	
10^6	Magnetiske partikler i lungerne
10^5	Strømme: i bughulen
10^4	i hjertet (voksne)
10^3	i hjernen, fosterhjerne, muskler
10^2	i nethinden
10	i hjernebarken (stimuleret respons)
1	i rygmarven (stimuleret respons)

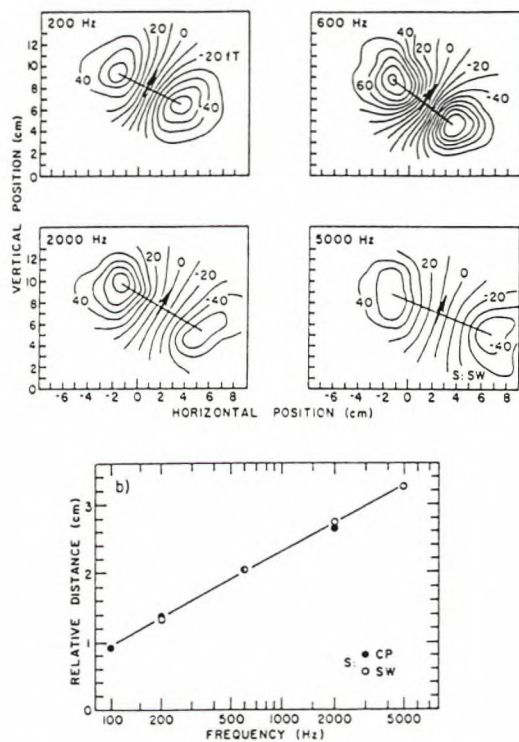
Figur 1. Typiske værdier af den magnetiske fluxtæthed fra de bedst studerede biomagnetiske kilder sammenlignet med jordfeltet og den magnetiske støj i bymæssige områder. Den magnetiske fluxtæthed er angivet i femtoTesla (fT). De bedste SQUID systemer har en følsomhed på nogle få fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$.

Til MEG bruges gerne flere SQUID sensorer fordelt over hjernebarken for at opnå bedre rumlig opløsning. Den elektromagnetiske baggrundstøj er den største hindring for virkeliggørelsen af den vision, jeg skitserede i starten af artiklen. Til detaljeret udmåling af MEG i bymæssig bebyggelse benyttes magnetisk skærmede rum, som typisk dæmper amplituden af eksterne signaler i frekvensområdet mellem 0,1 og 1000 Hz med en faktor 100.000 eller mere. Et sådant rum koster 3 - 5 mill. Kr. De nærmeste står i Helsinki og Berlin.

I Danmark findes et 7-kanals SQUID udstyr på DTU i Lyngby. Dette udstyr er placeret i et træhus i "landlige omgivelser", hvor den magnetiske baggrundsstøj kun er ca. 11 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ i frekvensområdet mellem 1 og 100 Hz. På DTU har professor Knud Særmak og hans gruppe i samarbejde med læger i 15 år gennemført MEG og magnetocardiogram (MCG) studier.

I de førende lande (Japan, Tyskland, USA og Finland) går udviklingen nu mod integrerede sensor-systemer med mellem 60 og 120 SQUIDs, som kombineres med andre 3-dimensionale "billed"-teknikker baseret på kernemagnetisk resonans (NMR) og radioaktive sporstoffer (tracer-teknik). Hensigten er at kortlægge hjerneaktiviteter og -lidelser både biokemisk og elektrisk.

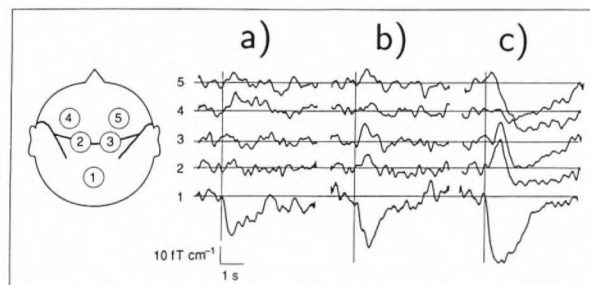
Der er to hovedtyper af MEG målinger: med eller uden ydre stimuli, også benævnt vakt (stimuleret) eller spontant MEG. Vakte respons udviser som regel større signalstyrke end de spontane, som dog ved hjernelidelser (f.eks. epilepsi) kan være særdeles kraftige og stærkt lokaliserede.



Figur 2. Resultater af MEG udmåling af den rumlige organisation af hørecentret¹ (den tonale topografi). a) Serie af kort over det magnetiske felt uden på hjerneskallen i tindingeregionen: kurver ved konstant felt (i fT) for forskellige frekvenser. b) positionen (afstand fra et referencepunkt) af den beregnede strømdipol som funktion af frekvens, for to forskellige individer (CP og SW)

Det er i alle tilfælde vanskeligt på basis af et MEG at regne sig tilbage til fordelingen af nervestrømmene i hjernen. Det normale er at kende strømmenes fordeling og at beregne magnetfeltet derudfra. Men her er problemet det omvendte: givet et magnetisk felt, beregn strømkildernes position og styrke. En entydig løsning findes ikke. Tolkning af et MEG bygger derfor nødvendigvis på modeller for hjernens nervestrømme. Tilfredsstillende resultater kan i mange tilfælde nås ved at bruge en simpel model af en strømdipol placeret i et homogent ledende medie. Modellen fører til et dipolbillede med intracellulære strømme (lokaliseret til neuronbunder) med stor strømtæthed (som primært giver B-feltet) kombineret med lav strømtæthed for volumenstrømme (som primært giver E-feltet). For eksempel kan MEG af spontane signaler fra fokal (lokaliseret) epilepsi og af vakte signaler fra hjernecentre for den primære analyse af sanseorganers data tolkes vha sådanne simple strømdipolmodeller. På DTU har specielt hørecentrets vakte respons været studeret (se figur 2).

Det vil føre for vidt at opregne de resultater, der er opnået vha MEG. Metoden er veludviklet. Den kunne blive mere udbredt, hvis det blev billigere at etablere den nødvendige magnetiske skærmning, eller hvis de gradiometriske feltmålinger blev mere selektive. Måske kan de keramiske superledende materialer finde anvendelse. Disse materialer tilbyder en række fordele såsom billigere, mere "holdbar" køling og mindre krav til mængden af termisk isoleringsmateriale omkring den kryostat, der indeholder SQUIDS og pick-up spoler. Det sidste vil være en fordel, fordi spolesystemet i så fald vil kunne anbringes tættere på hjerneskallen, hvor MEG signalerne er tydeligere.



Figur 3. MEG målinger foretaget 5 forskellige steder under visuelt stimulus ved a) passiv betragtning; b) aktiv betragtning med henblik på undertrykt (skjult) udtale af navnet; c) som b), men med højlydt (åben) udtale af navnet.

Til slut en enkelt illustration af, hvor langt MEG med 4,2 K SQUIDS er nået. Figur 3 viser målinger foretaget af den biomagnetiske gruppe ved Helsinkis Tekniske Højskole med et nyt 122 kanal MEG system, som gruppen har udviklet i samarbejde med IBM Research Center i New York. Ved hjælp af et tæt net af samtidige MEG målinger er det lykkedes at følge nogle hjernecentres dynamiske opførsel under syns/tale-aktivitet. Forsøgspersonen har været placeret foran en skærm og har i forsøgsserie a) skullet koncentrere sig om på et punkt midt på skærmen, mens 80-100 stregtegninger af simple genstande (f.eks. en vase, en bog, en kat) med 5 sekunders mellemrum er blevet vist forneden på skærmen, til højre eller til venstre ("passiv betragtning"). I en følgende serie, vist som c), har personen skullet sige højt, hvilken genstand, der blev vist ("åben udtale af navnet"). Endelig er der gennemført en serie, b), hvor personen blot har skullet tænke på, hvad genstanden hed, men ikke sige noget ("skjult udtale af navnet"). Tidsopløsningen er 10 ms, og feltopløsningen er 1 fT.

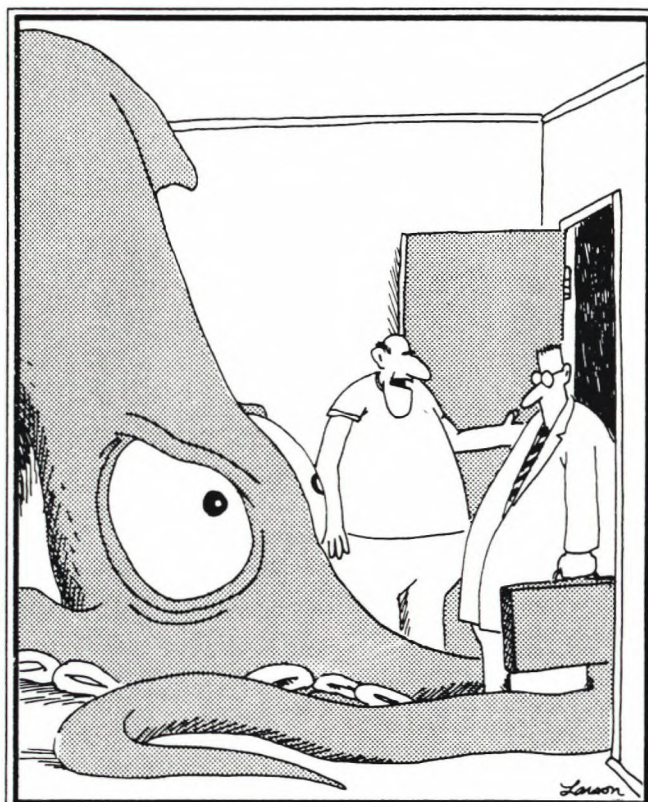
Som det ses, flytter centeret for aktiviteten fremad og til højre i hjernen, når forsøgspersonen tænker på eller udtaler navnet på genstanden for et visuelt indtryk. Dette neuromagnetiske målesystem kan aflæse impulserne fra synscentret, inden de når et bevidsthedsniveau, der fører til skjult eller åben udtale af genstandens navn. SQUIDS kan mærke, hvad jeg vil tænke, inden jeg selv ved det. De kan sikkert også mærke, hvis du er bange for dem.

Referencer:

- 1) G.L. Romani: "The Use of SQUIDs in the Study of Biomagnetic Fields", i "Superconducting Electronics", NATO ASI Series, vol. 59 (Springer, Berlin), 1989.
- 2) Thorsten Holst: "Superledende ringe med fart på", KVANT 1994 nr.2 (dette nr.).
- 3) R. Salmelin, R. Hari, O.V. Lounasmaa og M. Sams: "Dynamics of Brain Activation during Picture Naming", Nature 368, p. 463-465 (31. marts 1994).



Jørn Bindslev Hansen er lic.scient. (1981) fra Københavns Universitet. Han arbejder med superledning og diamanter og er ansat på NKT Research Center.



"Oh, no, he's quite harmless. ... Just don't show any fear. ... Squids can sense fear."

balzers



Heliumlæksøger HLT 160

Følsomhed 3×10^{-11} mbar l/s

Måler efter Twin-Flow-Princip

Indbygget interface RS 232

2 separate måleporte

Undertrykkelse af baggrundsstøj

Software TOPSTAR til styring og databehandling

Nordiska Balzers AB
Baunegårdsvej 7 L
DK-2820 GENTOFTE
Tel: 31 68 32 61
Fax: 31 68 22 55

Box 10412
S-434 24 KUNGSBACKA
Tel: *46-300 710 80
Fax: *46-300 172 85