

Magnetická rezonance (4)

J. Kybic, J. Hornak¹, M. Bock, J. Hozman

2008–2018

¹<http://www.cis.rit.edu/htbooks/mri/>

Hardware

Magnet

Gradientní cívky

RF cívky

Kvadraturní detekce

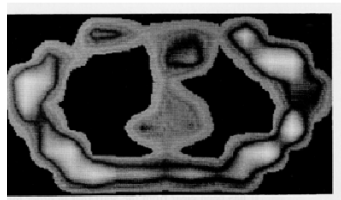
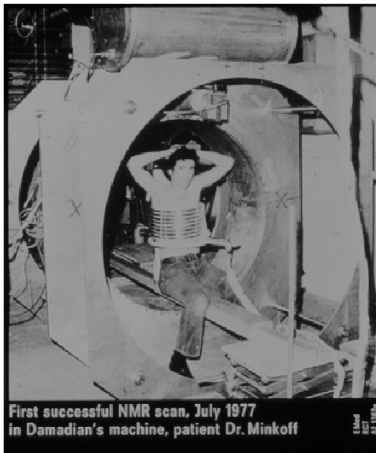
Fantom

Artefakty

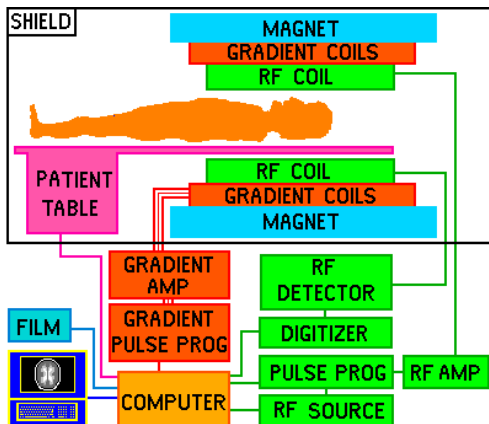
Bezpečnost

MR přístroje

První obraz člověka (1977)



Blokové schéma



Místnost

- Dostatečná nosnost podlahy (několik tun)
- Magnetické stínění proti vnějšímu magnetickému poli
- Magnetické stínění proti pronikání pole magnetu vně
- Stínění proti pronikání rádiových vln dovnitř
- Stínění proti pronikání rádiových vln vně

Posuvný stůl

- Posun pacienta v ose z s přesností ~ 1 mm

Pracoviště operátora

- Mimo místnost magnetu, za speciálním sklem

Řídící počítač

- Kvůli rušení mimo místnost magnetu
- Často několik počítačů/procesorů
 - Komunikace s operátorem, zobrazování
 - Řízení snímací sekvence (gradienty, snímání, RF pulzy, řízení snímacích a výkonových zesilovačů)
 - Často specializovaný procesor (DSP, array procesor) pro rychlou FFT

Hardware

Magnet

Gradientní cívky

RF cívky

Kvadraturní detekce

Fantom

Artefakty

Bezpečnost

Magnet

- Intenzita magnetického pole 0.2 T ~ 10 T
- Nejčastěji 1.5 T
- Typy magnetů:
 - Permanentní magnet (nejslabší)
 - Elektromagnet
 - Supravodivý elektromagnet (nejsilnější)
- Tvary magnetů:
 - Otevřené (tvar C) — slabé pole, snadný přístup k pacientovi
 - Sloupové — silnější pole, horší přístup
 - Uzavřené (solenoidální) — silné pole, pacient není přístupný

Permanentní magnety - architektura „OPEN“



Elektromagnety - architektura „OPEN“



**Philips-Marconi
Panorama 0.23T a 0.6T**

FONAR Stand-Up MRI



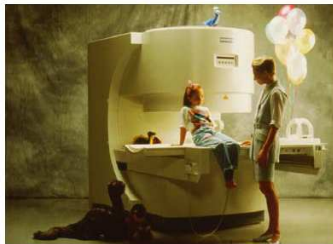
1.5 T MRI skener



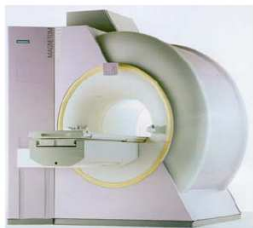
MR přístroje



MR přístroje



Siemens, přístroj s klasickým elektromagnetem pro intervenční radiologii - možnost zobrazování operace v reálném čase.

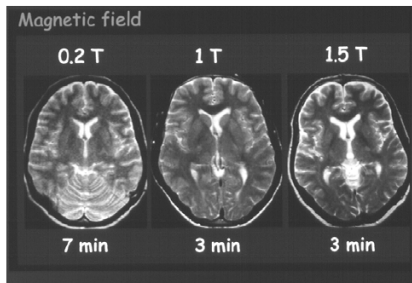


Siemens Magnetom

Dnes běžná velikost magnetu je 1.5 T (60 MHz).

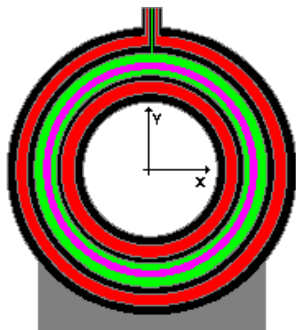


Magnetické pole



Vliv velikosti magnetického pole.

Supravodivý magnet



- Vacuum**
- Liquid Helium**
- Liquid Nitrogen**
- Container & Support**
- Superconducting Coil**

Supravodivý magnet

- Spouštění magnetu
 - postupně zvyšujeme proud až do jmenovité úrovně
 - cívku spojíme nakrátko
 - proud bude probíhat stále (pokles intenzity jen několik ppm/rok)
- Normální zastavení (nepoužívá se, magnet běží stále)
 - do obvodu vřadíme rezistor, proud postupně klesá
- Havarijní zastavení
 - Stop tlačítko pro případ nehody
 - Obvod se okamžitě přeruší → nashromážděná energie se změní v teplo → He se zahřeje a odpaří

Heliové chlazení

Teplota:	4.2 K (tekuté helium)
Objem:	1700 l
Cena He:	3.5 ~ 15 USD/l
Výpar:	0.03 l/h
Interval doplňování:	4 roky (po odpaření asi 1000 l)

- Dříve mezistupeň chlazení tekutým dusíkem (77.4 K)
- Dnes speciální kryobox ('mrazák')
- → není nutné doplňovat tekutý dusík

Hardware

Magnet

Gradientní cívky

RF cívky

Kvadraturní detekce

Fantom

Artefakty

Bezpečnost

Gradientní cívky

Popíšeme nejběžnější selenoidální magnet s $\mathbf{B} \parallel z$

$$B_z = B_0 + xG_x + yG_y + zG_z$$

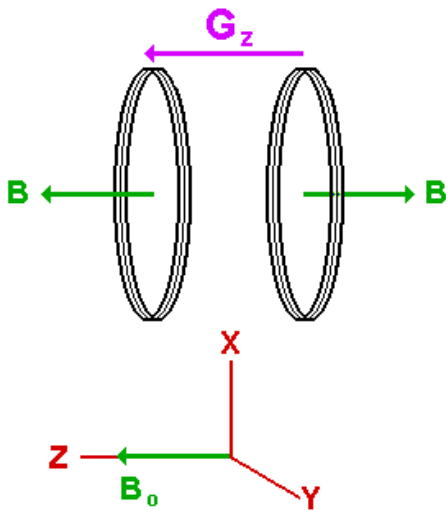
Gradient Tube



Gradient z

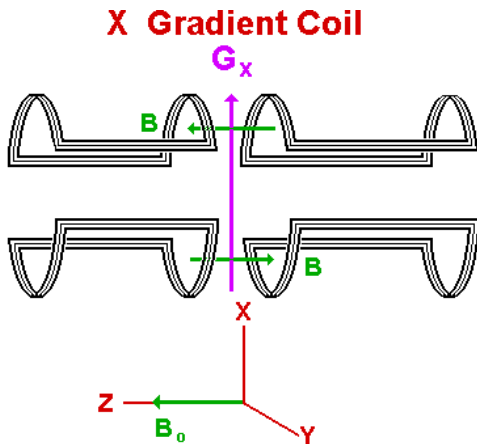
Antiparalelní zapojení Helmholzových cívek

Z Gradient Coil



Gradient x

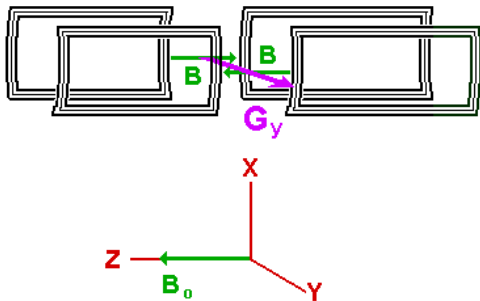
Cívky ve tvaru osmičky.



Gradient y

Cívky ve tvaru osmičky.

Y Gradient Coil



Hardware

Magnet

Gradientní cívky

RF cívky

Kvadraturní detekce

Fantom

Artefakty

Bezpečnost

RF cívky

- Pro excitaci spinů vytvořením rotujícího pole B_1
→ precese spinů
- Pro snímání signálu vzniklého precesí spinů
- Mohou být vysílací, snímací, kombinované
- Pole B_1 musí být kolmé na B_0

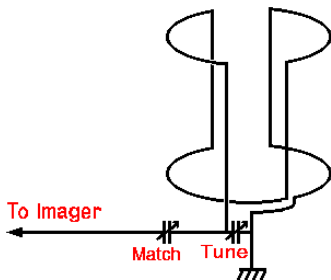
Ladění cívek

- Pro optimální přenos je cívky potřeba naladit do resonance
- Ladění je potřeba poopravit dle vlivu tkáně

$$2\pi f = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Ladění cívek

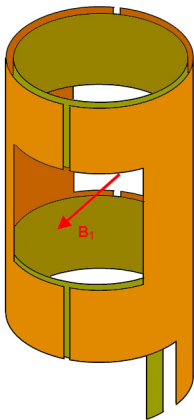
- Pro optimální přenos je cívka potřeba naladit do resonance
- Ladění je potřeba poopravit dle vlivu tkáně



Radio Frequency Coils: Volume Resonators



Typy RF cívek

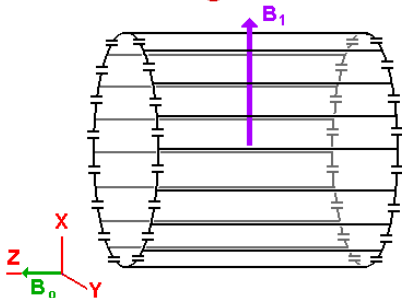


(C) BMRI

Aldeman-Grant

Typy RF cívek

Bird Cage Coil



Bird cage (klec)

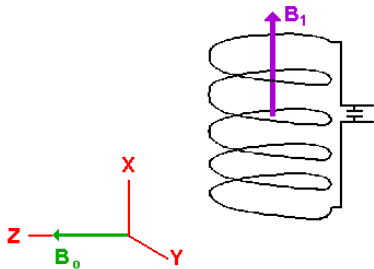
Typy RF cívek



Butterfly (motýl, jen příjem)

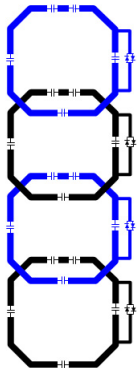
Typy RF cívek

Multi-Turn Solenoid



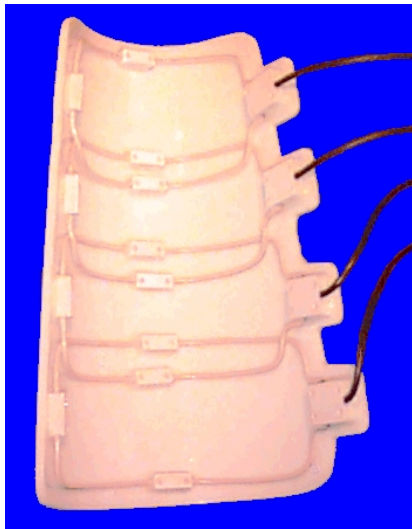
Solenoid, (jen příjem)

Typy RF cívek



Phased array, jen příjem

Typy RF cívek



Phased array

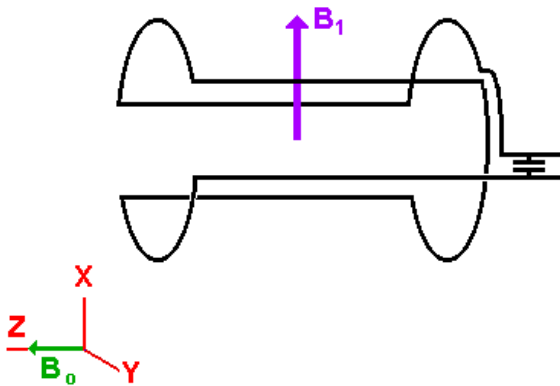
Typy RF cívek



Phased array pro pMRI

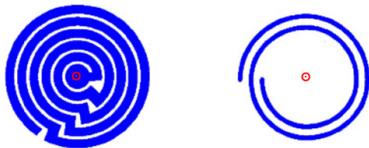
Typy RF cívek

Saddle Coil



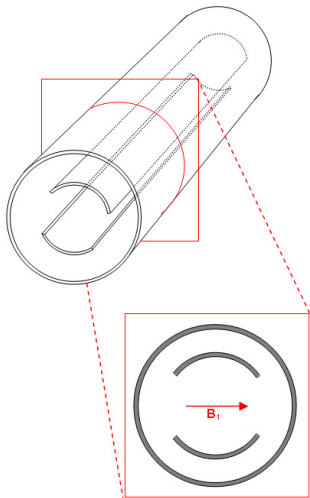
Sedlová cívka

Typy RF cívek



Spirální cívka

Typy RF cívek



Transmisní linka

Povrchová cívka

Surface coil

- Jen příjem
- Dobrý poměr signál/šum
- Signál jen z blízkého okolí cívky



univerzální

Povrchová cívka

Surface coil

- Jen příjem
- Dobrý poměr signál/šum
- Signál jen z blízkého okolí cívky



pro snímání kolena

Povrchová cívka — příklad obrázku



páteř

Všimněte si poklesu intenzity

Bird cage

(ptačí klec)

Nejpoužívanější objemová cívka (volume coil), zvláště pro obrázky hlavy.



Jednozávitový selenoid

(Single turn selenoid)

- Pro zobrazování extremít: končetiny, zápěstí, prs
- Nejčastěji měděný závit, může být perforovaný, i asymetrický



Hardware

Magnet

Gradientní cívky

RF cívky

Kvadrurní detekce

Fantom

Artefakty

Bezpečnost

Kvadraturní detektor

Quadrature Detector

- **Vstup:** signál z (RF) cívky
- **Výstup:** signály odpovídající magnetizaci $M_{x'}$, $M_{y'}$
- x' , y' je rotující soustava souřadnic

Kvadrurní detektor

Quadrature Detector

- **Vstup:** signál z (RF) cívky
- **Výstup:** signály odpovídající magnetizaci $M_{x'}$, $M_{y'}$
- x' , y' je rotující soustava souřadnic

Motivace

- Snížení frekvence
- Je možné zjistit nejen *amplitudu* (jako u standardního AM detektoru), ale i *fázi*
- Výstup považujeme za *komplexní signál*

Kvadrurní detektor

Quadrature Detector

- **Vstup:** signál z (RF) cívky
- **Výstup:** signály odpovídající magnetizaci $M_{x'}$, $M_{y'}$
- x' , y' je rotující soustava souřadnic

Motivace

- Snížení frekvence
- Je možné zjistit nejen *amplitudu* (jako u standardního AM detektoru), ale i *fázi*
- Výstup považujeme za *komplexní signál*

Jak?

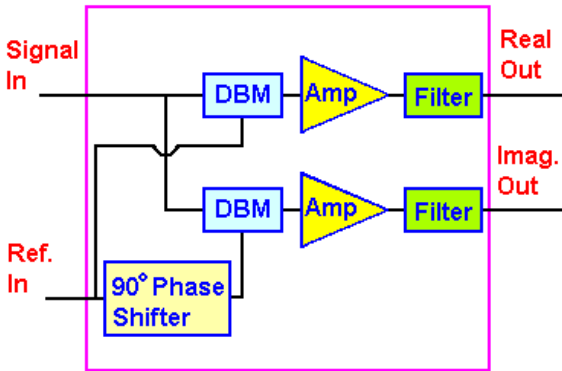
- Dalším vstupem je referenční signál f_0
- Používáme *součinnový směšovač* (product mixer)

Součinový směšovač

Doubly Balanced Mixer (DBM)

- *Vstup:* $g_a = \cos(at)$, $g_b = \cos(bt)$
- *Výstup:* $g = g_a g_b = \frac{1}{2} \cos((a + b)t) + \frac{1}{2} \cos((a - b)t)$
- Signál $\cos((a + b)t)$ o vyšší frekvenci odfiltrujeme
- Zbyde signál o rozdílové frekvenci $\cos((a - b)t)$

Kvadrurní detektor (2)



Hardware

Magnet

Gradientní cívky

RF cívky

Kvadraturní detekce

Fantom

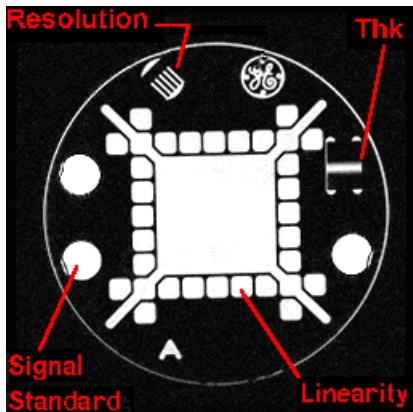
Artefakty

Bezpečnost

Fantom

Umělý předmět pro měření

- Prostorového rozlišení
- Homogenity magnetického pole (geometrické zkreslení)
- Homogenity RF pole
- Kontrastu (známé hodnoty T_1 , T_2)



Hardware

Magnet

Gradientní cívky

RF cívky

Kvadraturní detekce

Fantom

Artefakty

Bezpečnost

Nevyvážený kvadraturní detektor

- Stejnosečná složka → jasný bod v centru
- Nevyvážené kanály → diagonální linie.



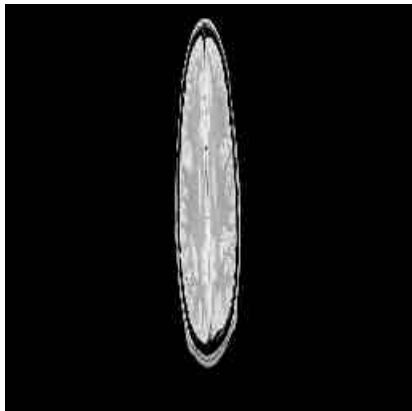
Nehomogenita B_0

- Převážně geometrické zkreslení
- Změna intenzity vlivem inhomogenity B_0 na T_2^*



Nehomogenita magnetických gradientů

- Převážně též geometrické zkreslení



Zde jedna gradientní cívka dává pole jen s poloviční intenzitou.

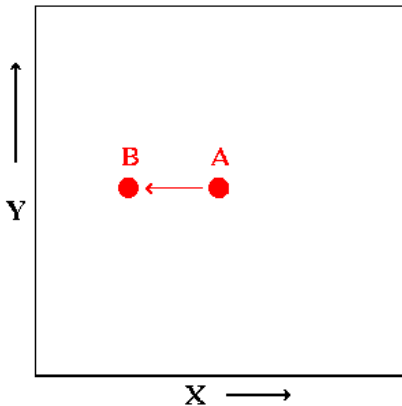
Nehomogenita RF pole

- Nedokonalost cívek
- Kovové materiály (implantáty, zubní plomby)
- Převážně změna intenzity



Vliv pohybu

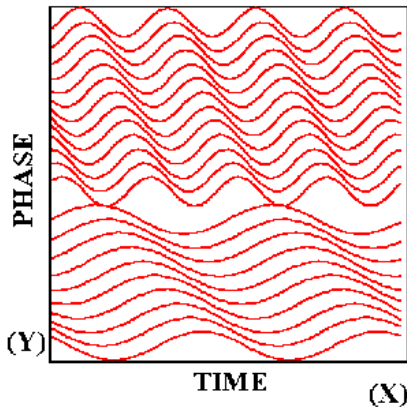
- Efekt záleží na snímací frekvenci, někdy rozmazání, často složitější



Objekt se pohne během zobrazování

Vliv pohybu

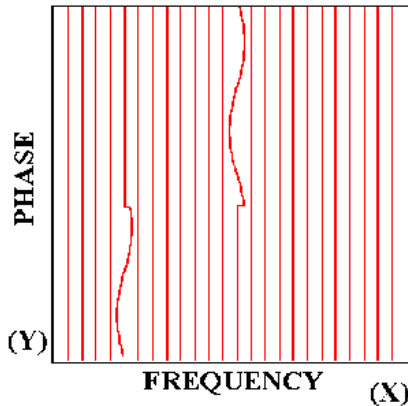
- Efekt závisí na snímací frekvenci, někdy rozmazání, často složitější



Fourierova transformace (snímaný signál)

Vliv pohybu

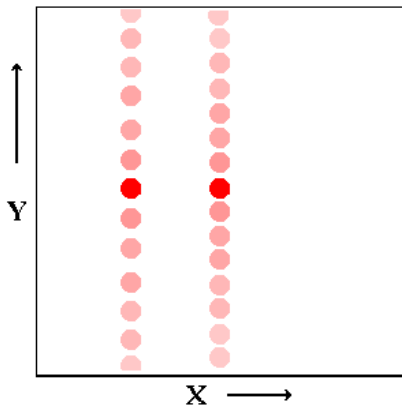
- Efekt závisí na snímací frekvenci, někdy rozmazání, často složitější



Zpětná Fourierova transformace dle frekvence

Vliv pohybu

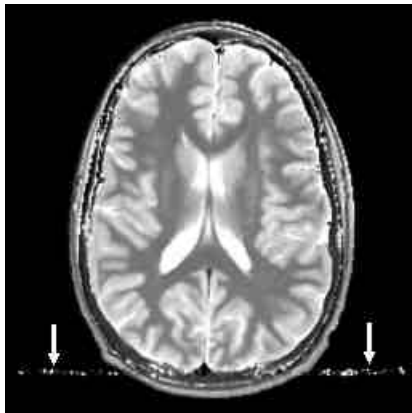
- Efekt závisí na snímací frekvenci, někdy rozmazání, často složitější



Zpětná Fourierova transformace dle fáze (rekonstrukce)

Vliv pohybu

- Efekt závisí na snímací frekvenci, někdy rozmazání, často složitější



Artefakt vzniklý pulsující cévou

Vliv pohybu (2)

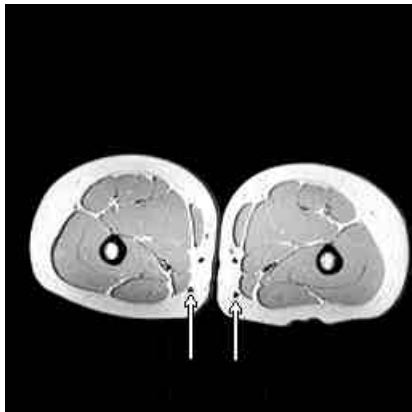
Vliv pohybu minimalizujeme

- Znehybněním
- Rychlým snímáním
- Synchronisací — s dýcháním, se srdečním rytmem (dle EKG)
- ... tím je určeno T_R

Tok (krve)

(Blood) Flow

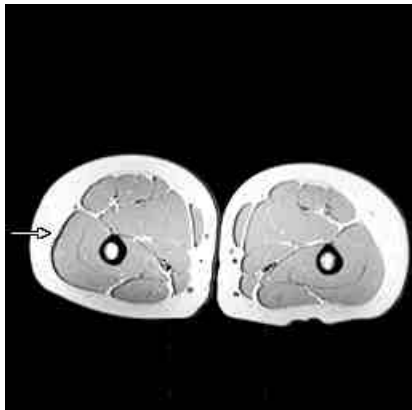
- Krev excitovaná RF impulsem odteče z řezu → nedá signál
- (Toho se dá využít pro měření toku).



Chemický posun

Chemical Shift

- Vlivem chemických vazeb je f vodíku v tuku a ve vodě různá
- asi 6.5 ppm při 1.5 T $\rightarrow \approx 220$ Hz
- \rightarrow 3.5 pixelu při $f_{\text{samp}} = 16$ kHz



Parciální objem

Partial Volume Effect

- Signál voxelu je průměrem signálů všech tkání ve voxelu
- Menší voxely → menší PV efekt, horší SNR



3 mm

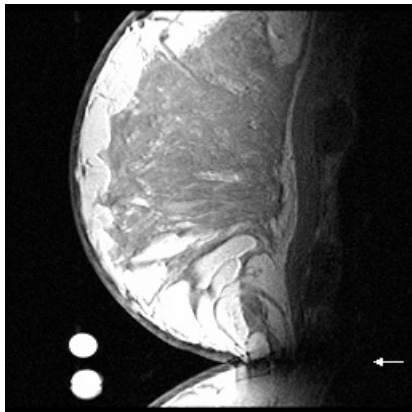


10 mm

Aliasing

(Wrap Around Effect)

- Část objektu mimo FOV se objeví na obrazu
- Příliš velký objekt, resp. příliš malý FOV
- Malá vzorkovací frekvence → aliasing



Aliasing (2)

- Aliasing ve směru frekvenčního kódování lze potlačit:
 - Vzorkování s velkou f_{samp} , např. 2 MHz místo 16 kHz
 - Digitální filtr, spodní propust
 - Převzorkování (odstranění redundance)
- Aliasing ve směru fázového kódování závisí na vzorkovacím kroku \rightarrow počet fázových kódovacích kroků \rightarrow délka snímání

Gibbsův jev

(Gibbs Ringing)

- Oscilace u ostrých hran; nedostatečný počet vzorků
- FT hrany doznívá pomalu → je potřeba dostatečný počet vzorků (vzorkovat dostatečně dlouho)



Hardware

Magnet

Gradientní cívky

RF cívky

Kvadraturní detekce

Fantom

Artefakty

Bezpečnost

Bezpečnost

Výhody

- Neinvazivní
- Nepoužívá ionizující záření

Rizika

- Silná magnetická pole
- Časově proměnná magnetické pole
- Prostorové gradienty magnetického pole
- Vysokofrekvenční (RF) elektromagnetická pole
- Kryogenní tekutiny (tekutý dusík, tekuté helium)

Bezpečné limity

FDA, 2003

		limit
B_0	novorozenci	4 T
	> 1 měsíc, dospělí	8 T
dB/dt	žádná bolest, nepříjemný pocit či nervová stimulace	
dB/dz		
energie	celé tělo, ≥ 15 min	4 W/kg
	hlava, ≥ 5 min	4 W/kg
	hlava, trup, ≥ 5 min	8 W/kg
	končetiny, ≥ 5 min	12 W/kg
hluk	špičková hodnota	140 dB
	střední hodnota (RMS), křivka A, ochrana sluchu	99 dBA

Extrémně silné magnetické pole

- Magnetické pole magnetu může vtáhnou do dutiny feromagnetické předměty z velké vzdálenosti (několik metrů).



Extrémně silné magnetické pole

- Magnetické pole magnetu může vtáhnou do dutiny feromagnetické předměty z velké vzdálenosti (několik metrů).
- Žádné kovové předměty nesmí být přineseny do místnosti.



Extrémně silné magnetické pole

- Magnetické pole magnetu může vtáhnout do dutiny feromagnetické předměty z velké vzdálenosti (několik metrů).
- Žádné kovové předměty nesmí být přineseny do místnosti.
- Pole může způsobit pohyb kovových implantátů.
- Pole může způsobit selhání elektronických implantátů (např. pacemakerů)
- Pole může smazat magnetické media (diskety, disky).

Další nebezpečí

RF cívky

- Poměrně velké excitační energie
- Při selhání mohou způsobit popáleniny

Nedostatek kyslíku

- Při zvýšeném odpařování He nebo N může dojít k vytěsnění O_2
- Je nutné monitorovat koncentraci O_2