

Zkušenosti a úskalí PET/MR zobrazování

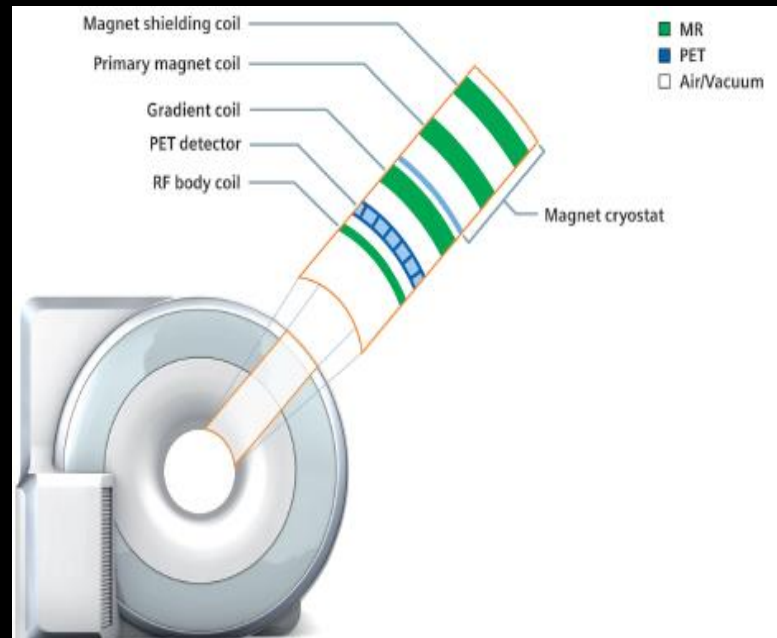
Petra Dostálová, David Žůček, Filip Halm

PET centrum
Nemocnice na Homolce



Představení PET/MR Biograph mMR

- 3T MRI doplněné o PET skener
- Do gantry MRI je vložen detekční systém PET, který je umístěn před gradientními cívkami
- PET a MR signál jsou snímány najednou, PET signál obvykle po celou dobu snímání MR
- Korekce atenuace pomocí MR-based segmentace a rozšířenému FoV MR, 5-kompartmentový model (vzduch, měkká tkáň, tuk, plíce, kost)



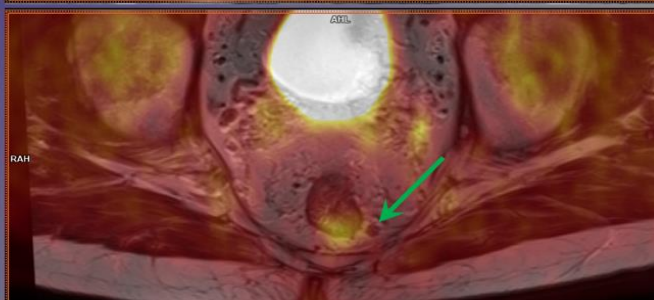
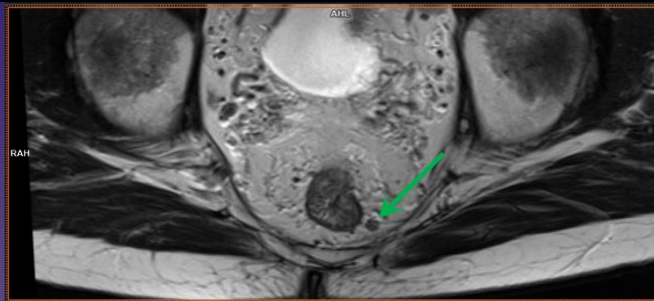
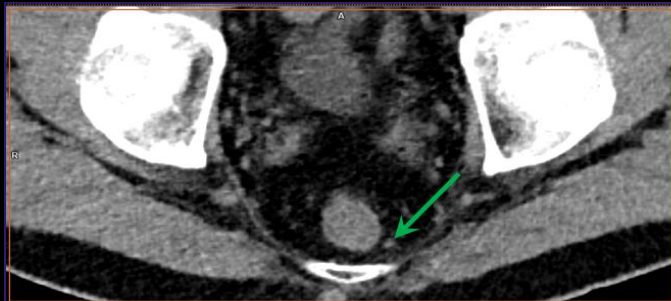
Technické porovnání PET u Biograph mMR a Biograph Vision 600

	Biograph mMR (2023)	Biograph Vision 600 (2021)
Průměr gantry	65 cm	82 cm
Transaxiální FOV2	59 cm	70 cm
Energetická rozlišovací schopnost	$\leq 14,5\%$ FWHM	$\leq 9\%$ FWHM
Senzitivita	14,1 cps/kBq	16 cps/kBq
Efektivní senzitivita	X (nemá TOF)	100 cps/kBq s TOF (214 ps)
Typ detektoru	LSO + lavinové fotodiody	LSO + SiPM
Axiální rozlišení (10 cm)	6,6 mm	3,7 mm
Transverzální rozlišení (10 cm)	5,0 mm	3,8 mm

Slabá stránka PET/MR – příklad 5 mm lymfatické uzliny u karcinomu rekta

FDG-PET/IdCT (Biograph Vision 600)

FDG-PET/MR-T2w sekvence (Biograph mMR)



77 min. do PET/CT
1,4 mm/s ~ 3min/bed

109 min. do PET/MR
~ 45 min/bed

210 MBq FDG, pacient 180 cm, 79 kg

Důsledky technických rozdílů

- Pro vyšetření PET/MR v rozsahu torzo je nezbytné vzhledem k nízké citlivosti, horšímu rozlišení a absenci TOF aplikovat významně vyšší aktivitu radiofarmaka
 - mDRÚ PET/CT (Vision) FDG torzo 200 MBq
 - mDRÚ PET/MR FDG torzo 370 MBq
- Nemožnost vyšetřit objemnější pacienty
- Dlouhá doba PET/MR celotělového vyšetření (60 min) oproti PET/CT (10-15 min) vede k
 - vyššímu riziku pohybu pacienta
 - naplnění močového měchýře a příp. nutnosti předčasně ukončit vyšetření
 - v případě dětských pacientů nutnost plnohodnotné narkózy

Jiné způsoby korekce atenuace PET/MR

- U PET/MR přístrojů je situace významně obtížnější než u PET/CT: Neexistuje žádná škála přesných a jasně reprodukovatelných denzit tkání jako u CT, navíc tkáně obsahující málo nebo žádné protony neposkytují dostatečný MR signál (vzduch, kosti)
- Existují principiálně 4 způsoby atenuačních technik v PET/MR:
 - a) MR-based = MRAC (tento způsob využíváme u našeho PET/MR přístroje) – přímé použití MR sekvencí, které cílí k extrahování informací s ohledem na atenuační vlastnosti jednotlivých tkání (voda, tuk,...)
 - b) Emission-based – přímé použití emisních PET dat k predikci AC map
 - c) Atlas-based – vygenerování pseudo-CT databází PET, CT, MRI a emisních obrázků.
 - d) Machine learning-based – mix technik strojového a hlubokého učení, které využívají především databázi MR, CT a PET dat k identifikování specifických korelačních znaků.

Jak to u nás začalo

- 7/2023 - pořízení PET/MR na NNH
 - **^{18}F -FDG** jako první radiofarmakum pro snímání PET/MR
 - cílené snímání na PET/MR po celotělovém PET/CT pro větší detail zobrazení
 - ke snímání pouze mozku provádíme samostatné PET/MR
- 10/2023 - pořízení generátoru ^{68}Ga pro individuální přípravu
 - ^{68}Ga DOTATOC a ^{68}Ga PSMA-11**
- 12/2024 – pořízení **^{18}F - FDOPA**



Zdroj: www.siemens-healthineers.com

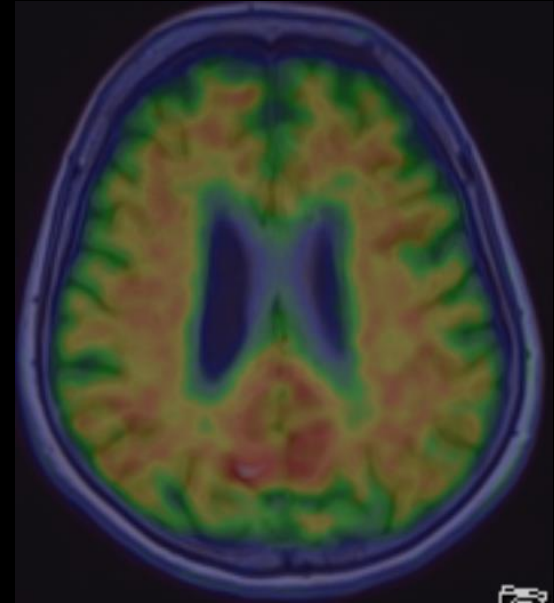
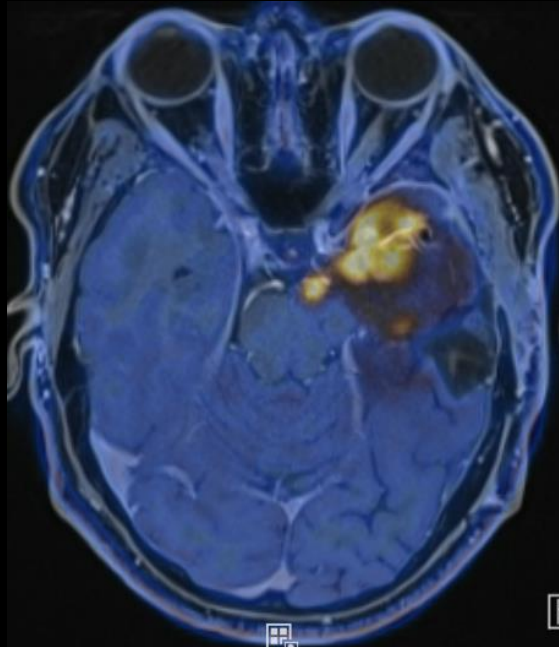


Spektrum indikací PET/MR v NNH

- Mozek – tumory (primární/sekundární), demence
- Nádory v ORL oblasti (jazyk, tonsily, nosohltan, hltan,...)
- Prsa – převážně maligní nádory prsou
- Břicho – játra, pankreas (primární nádory jater/pankreatu, meta proces po léčbě).
- Pánev – tumory rektosigmatu, gynekologické tumory, tumory prostaty

Spektrum radiofarmak PET/MR v NNH

- ^{18}F -FDG
- ^{18}F -Flutemetamol (*Vizamyl*)
- ^{18}F -DOPA
- ^{68}Ga -DOTATOC
- ^{68}Ga -PSMA
- ^{18}F -NaF



Výběr vhodných pacientů pro PET/MR

- Obecně pacienti bez kontraindikací pro MR a PET vyšetření
- Krom běžných kontraindikací MR vyš. (typu nekompatibilních kardiostimulátorů a klaustrofobie) výraznější omezení směrem k velikosti pacienta - „tunel“ PET/MR přístroje je užší (průměr reálně 59 cm), limit je dle našich zkušeností cca 120 - 140 kg v závislosti konstituce pacienta
- Na velikosti zde tedy záleží...



ALL-IN-ONE diagnostika

- PET/MR je přínosem k již provedenému PET/CT, s určením kompletního stagingu v rámci jedné návštěvy pacienta a tedy i jedné aplikace radiofarmaka:
1. Vstupní staging - kupř. u high-grade ca prostaty, u karcinomů rekta, u karcinomů dělohy/děložního hrdla, u karcinomů prsu, u bronchogenních karcinomů plic (+ PET/MR mozku) kde poskytuje detailní morfologické informace pro lepší rozhodování o léčbě
 2. Podezření na lokální recidivu /restaging/ - detailnější posouzení kupř. oblasti malé pánve nebo ORL oblasti, navíc další informace typu restrikce difúze, spektroskopických křivek, MR perfúze a podobně, tudíž ve výsledku i lepší rozlišení pooperačních/poradaičních změn od recidivy

Postup vyšetření PET/MR v NHH

- Příprava pacienta (kanylace, podepsání souhlasů, řádné informování)
- Aplikace RF lékařem
- Akumulace dle použitého radiofarmaka (^{18}F -Flutemetamol, ^{18}F -DOPA, ^{68}Ga -DOTATOC, ^{68}Ga -PSMA, ^{18}F -FDG, ^{18}F -NaF)
- Snímání na PET/CT (většinou předchází snímání na PET/MR)
- Snímání na PET/MR
- Řádné propuštění pacienta z oddělení (poučení, vyjmutí kanyly)
- Rekonstrukce obrazu a popis vyšetření lékařem



<https://stock.adobe.com/cz/search?k=angry+patient>

Možné komplikace

- Pacient má kontraindikaci a přesto byl odeslán na vyšetření:
 - kovy v těle méně než 6 týdnů, neznámý kovový materiál v těle
- - nepřepnutý kardiostimulátor do MR kompatibilního módu
 - silná klaustrofobie
 - příliš objemný ("neskladný") pacient pro průměr gantry PET/MR
- Pacient nevydrží ležet po celou dobu snímání (u většiny PET/MR vyš. cca 30 min) – kupř. dušný pacient s BCA (+ CHOPN), nutno přizpůsobit (zkrácené MR protokoly).
- Nespolupracující pacient (pohyb, agrese, odmítání vyšetření po podepsání IS)



Cílená PET/MR po přehledném PET/CT

Výhody

- Přesnější lokální (T) staging - větší měkkotkáňový kontrast /detaily/
- Jen jedno podání RF
- Možné vyloučení falešné positivity (ureter vs. lymfatická uzlina při 2-fázovém vyšetření)
- Komplexní staging při jedné návštěvě
- Odpadají komplikace navíc (pro lékaře) s fúzováním PET snímků s předchozími /často externími/ MR vyšetřeními

Nevýhody

- Delší pobyt pacienta na oddělení
- Diskomfort pro pacienta v úzkém prostoru (užší tunel PET/MR)
- Větší náklady na vyšetření
- Větší radiační zátěž pro personál (delší pobyt „radio-aktivního“ pacienta na oddělení)
- Provozně (*logisticky*) složitější plánování PET/CT i PET/MR s ohledem na ostatní provoz

Artefakty v PET/MR

1. PET artefakty v PET/MR – podobnosti a rozdíly proti PET/CT
2. MR artefakty v PET/MR – artefakty typické pro MR (a specifika MR artefaktů v PET/MR přístroji)

Zajímavost:

Ve srovnání s artefakty z implantovaných zdravotnických materiálů (typu venózního portu, ICD, svorek,...), vznikajících při korekci atenuace PET v rámci vyšetření PET/CT, které často nadhodnocuje skutečný ^{18}F -FDG uptake ve výsledném PET/CT obrazu, artefakty z korekce atenuace v PET/MR přístroji (MRAC) naopak mají tendenci v těchto případech podhodnocovat skutečný ^{18}F -FDG uptake ve výsledném PET/MR obrazu

1. PET artefakty v PET/MR – rozdíly a podobnosti s PET/CT

Korekce atenuace PET v našem PET/MR přístroji (MRAC) je založena na DIXON segmentačních metodách (voda, tuk): technika „voda-tuk“ založená na chemickém posunu kde jsou data sesbírány v různých echo časech, umožňující odlišení vody a tuku jednoduchou sumací a subtrakcí jednotlivých obrazů

- výraznější artefakty v okrajích field of view (v souvislosti s korekcí atenuace)
- sférické „extinkční“ artefakty („spherical extinctions artifacts“) v oblasti cizích materiálů (TEP, KS/ICD, porty...)
- artefakty z výrazně akumulujících tkání/orgánů (z moč. měchýře) jsou obdobné ale zde je anatomicky lepší odlišení kupř. ureterů od RP lymf. uzlin
- nízká senzitivita PET detektorů v PET/MR, ve srovnání s modernějšími PET detektory v novějších generacích PET/CT přístrojů a tedy horší prostorové rozlišení, resp. hruběji „zrnitější“ PET obrazy,



2. MR artefakty v PET/MR – artefakty typické pro MR (a specifika MR artefaktů v PET/MR přístroji)

- Pohybové artefakty (motion artifacts/ghosting artifacts/blurring artifacts)
- Aliasing („Wrap Around“) artefakt – „falšování“
- Artefakt z chemického posunu („Chemical shift“ artifact)
- Geometrická distorze („Geometric distortion“)
- „Herringbone artifact“ (Spike artifact) – artefakt rybí kosti
- Susceptibilní artefakt („Magnetic susceptibility artifact“)
- „Moiré Fringes artifact“ – „pruhy zebry“
- Trunkační artefakt („truncation / ringing artifact“)
- Zipový artefakt („Zipper artifact“)

Pohybové artefakty (motion artifacts)

Princip:

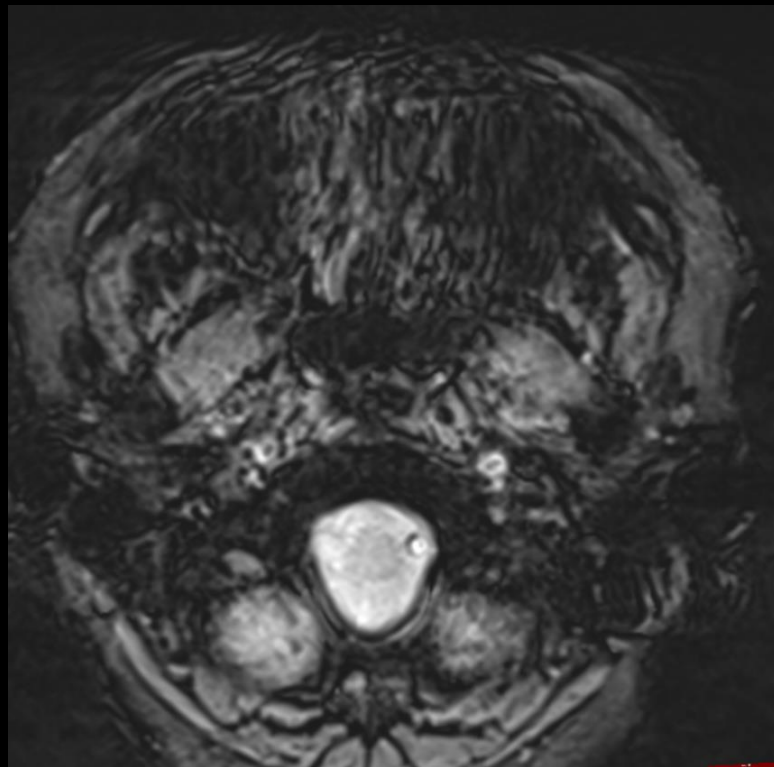
- Rozostřené a nechtěné kopie obrazu (tzv. „duchové“) jsou navrstveny na cílený obraz
- „Ghosting“ se objevuje typicky ve směru fázového kódování (phase encoding), protože sampling je zde časově náročnější nežli u frekvenčního kódování

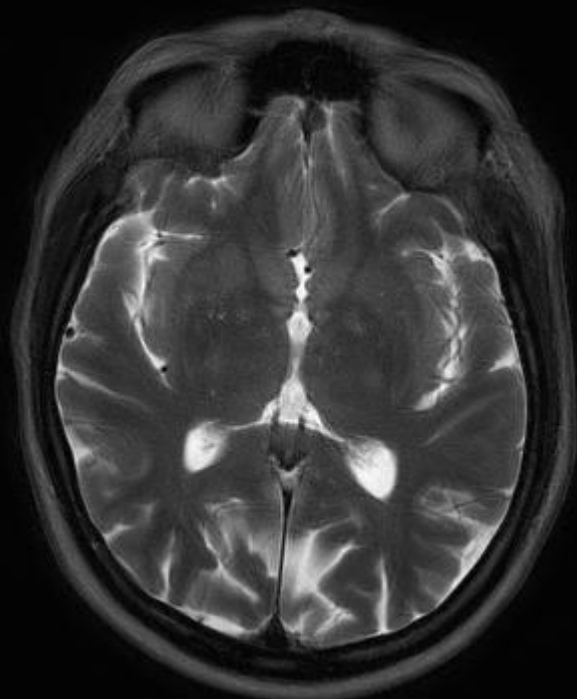
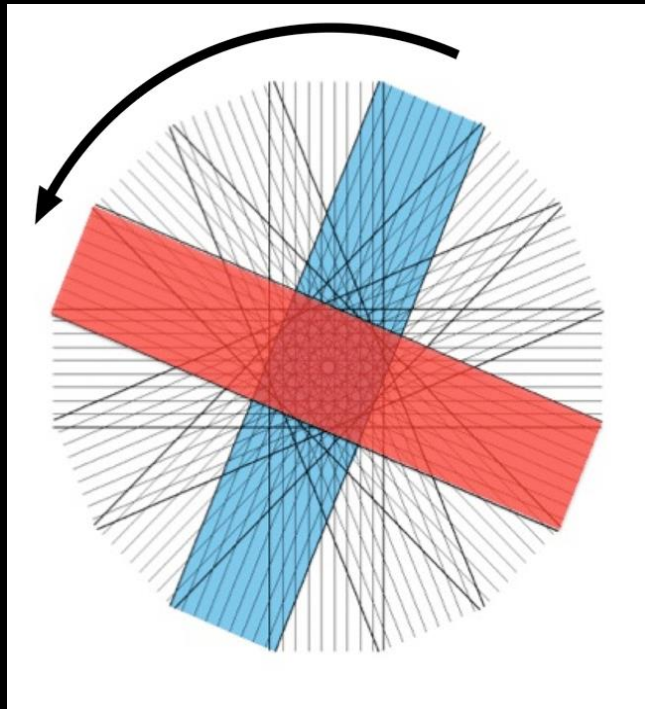
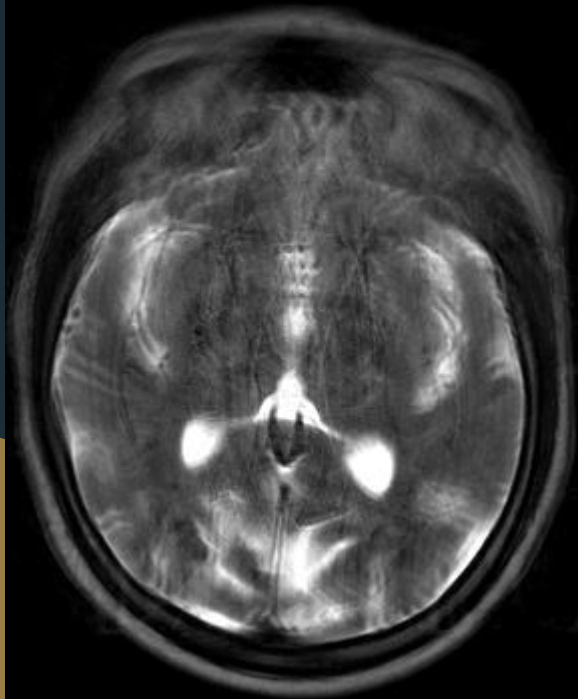
Příčiny:

- pohyb (včetně mimovolných pohybů a pohybů krevního toku)

Redukce artefaktu:

- pokud to jde, redukce pohybů u pacienta – vhodné instrukce, správné polohování/vypodložení pacienta
- ideálně zvolit rychlejší akviziční sekvence (GRE, bSSFP, EPI, FLASH)
- zvolit akviziční techniky typu PROPELLER (**P**eriodically **R**otated **O**verlapping **P**arallel **L**ines with **E**nhanced **R**econstruction), resp. BLADE – tyto sekvence používáme všude tam, kde předpokládáme, že pacient neuleží v klidu déle trvající sekvence (DWI, FLAIR a T2-vážené sekvence).
- použít prostorové saturační pásy („saturation bands“) kupř. na břišní stěnu





BLADE (<https://mriquestions.com/propellerblade.html>)

Aliasing - „falšování“

Princip:

- Anatomie mimo vyšetřovanou oblast zájmu (mimo field-of-view = FOV) je superponována na protilehlou stranu obrázku
- Nejčastěji se vyskytuje ve směru fázového kódování

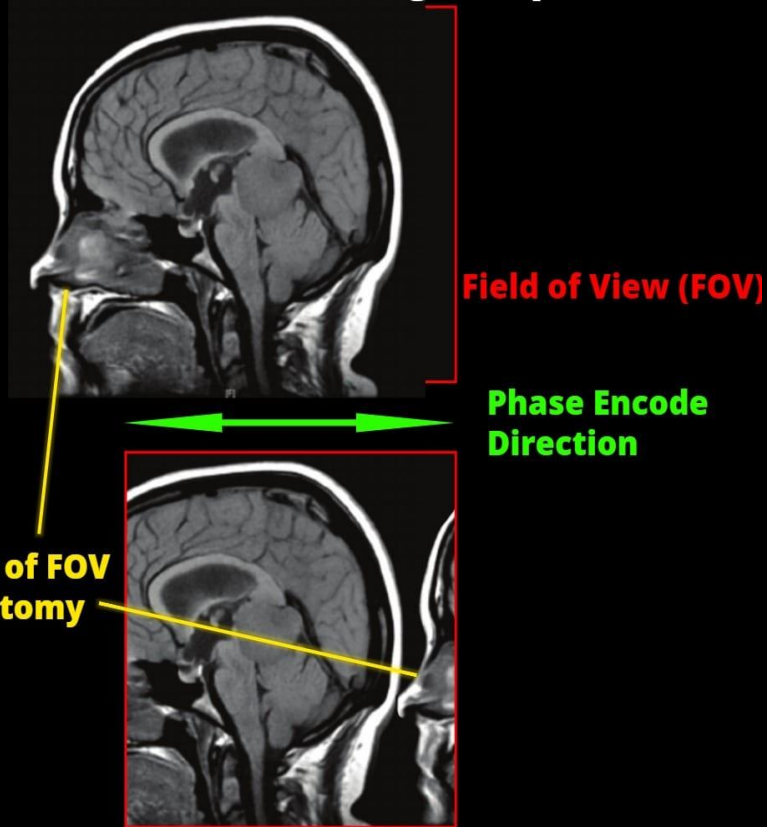
Příčina:

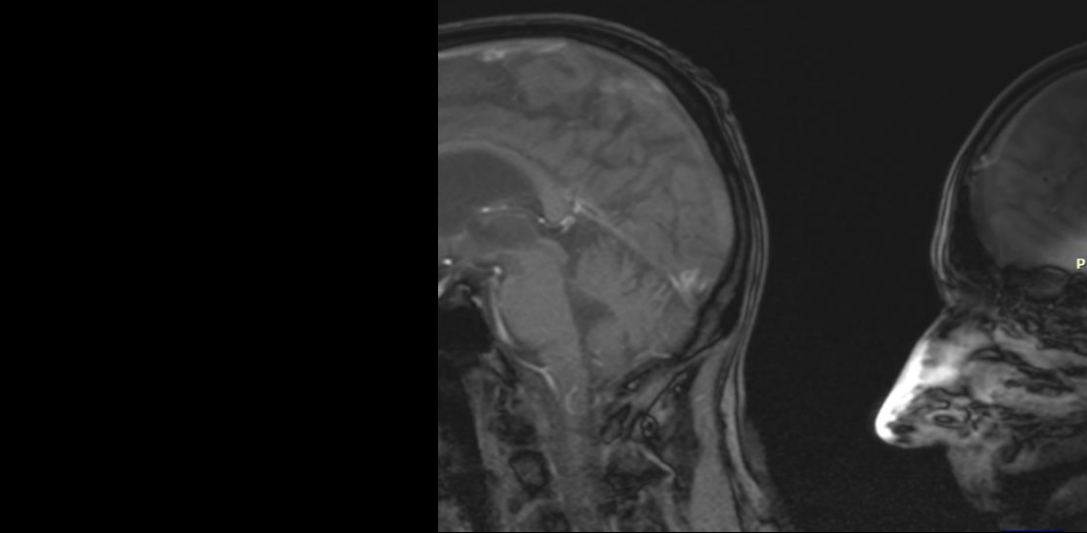
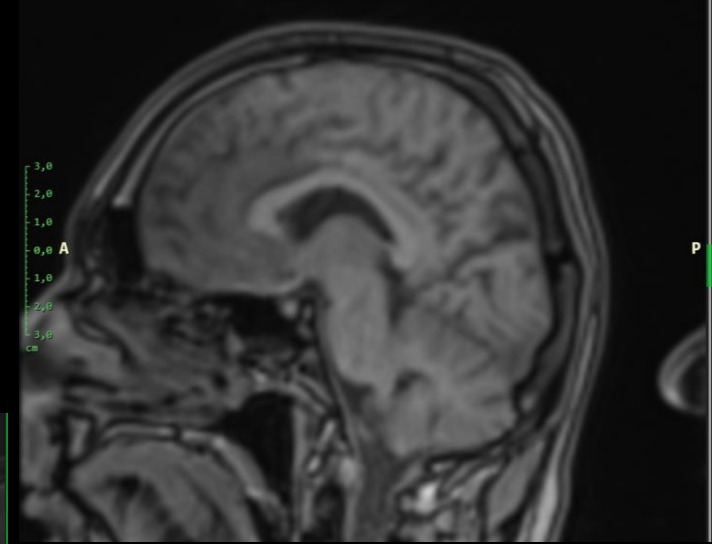
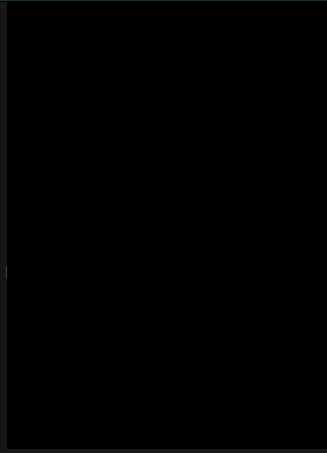
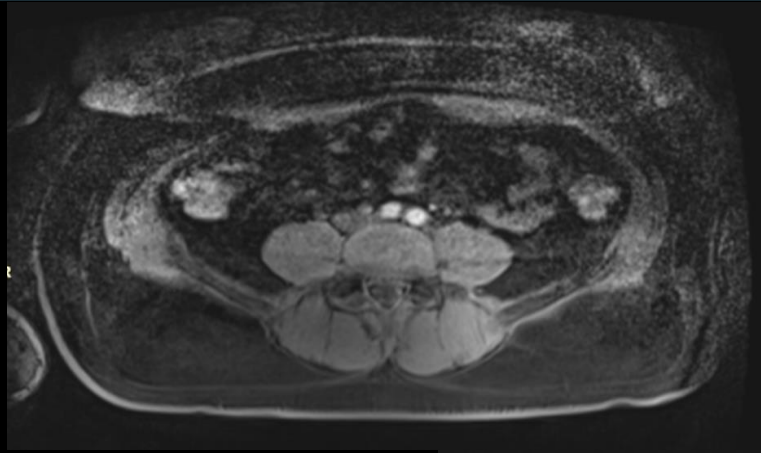
- Sampling („vzorkování“) v oblasti pod Nyquistovou frekvencí ($< 2 \times$ RF frekvence voxelu) způsobuje arteficiální snížení „apparentní frekvence“

Redukce artefaktu:

- Většina MR přístrojů má funkci automatického odstranění tohoto artefaktu, metodou „oversamplingu“ anebo aplikací „low pass“ filtru před analogově-digitální konverzí.
- změnit směr fázového kódování (A-P, R-L)
- zvětšit „zorné pole“ (field-of-view).
- umístit saturační pásy mimo vyšetřované oblasti FOV ve směru fázového kódování
- případně lze použít povrchové cívky (surface coils)

MRI Artifacts: Aliasing (Wrap Around)





Chemický posun

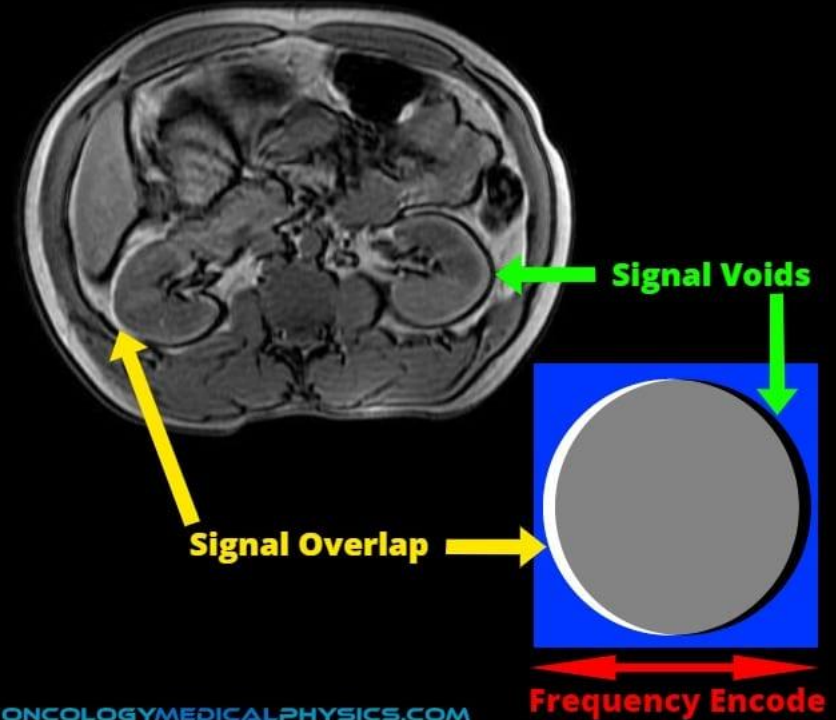
Princip:

- Projeví se jako tmavé nebo světlé okraje na hranicích jednotlivých anatomických struktur s rozličným chemickým složením

Příčiny:

- Všechny artefakty z chemického posunu se vyskytují kvůli přirozeným rozdílům ve „stínění“ jednotlivých chemických struktur/orgánů těla. To způsobuje zjevné posuny buďto ve směru frekvenčního nebo fázového kódování
- U frekvenčního kódování se vyskytuje jako přímý důsledek malých změn (3-4 ppm /parts per million/) ve frekvenci precese, a tím se signál promítne do lehce jiné lokace ve směru frekvenčního kódování a projeví se jako posun (stín) kolem orgánů, který je světlý na jedné straně („overlap“) a tmavý na opačné straně („signal void“).

MRI Artifacts: Chemical Shift (Frequency)



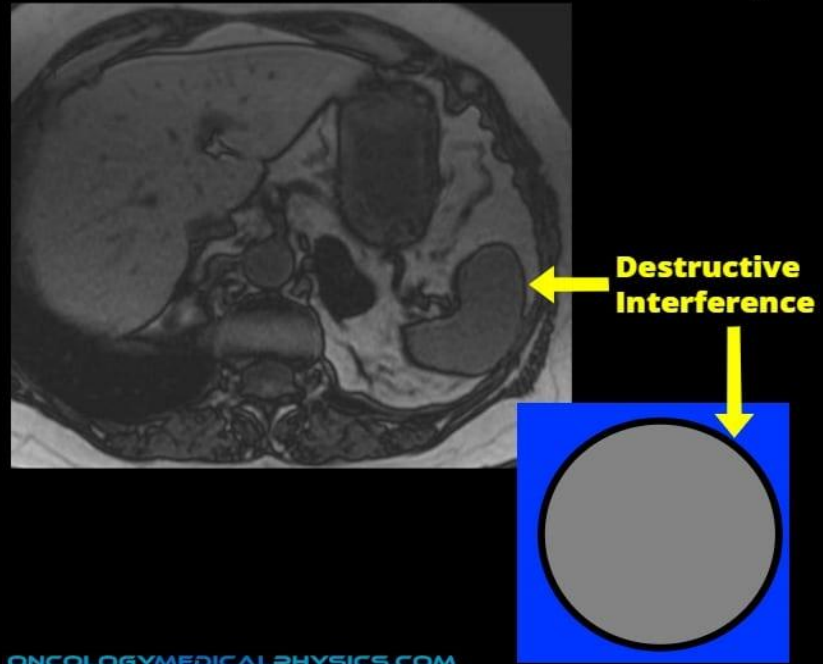
MRI Artifacts: Chemical Shift (Gradient Echo)

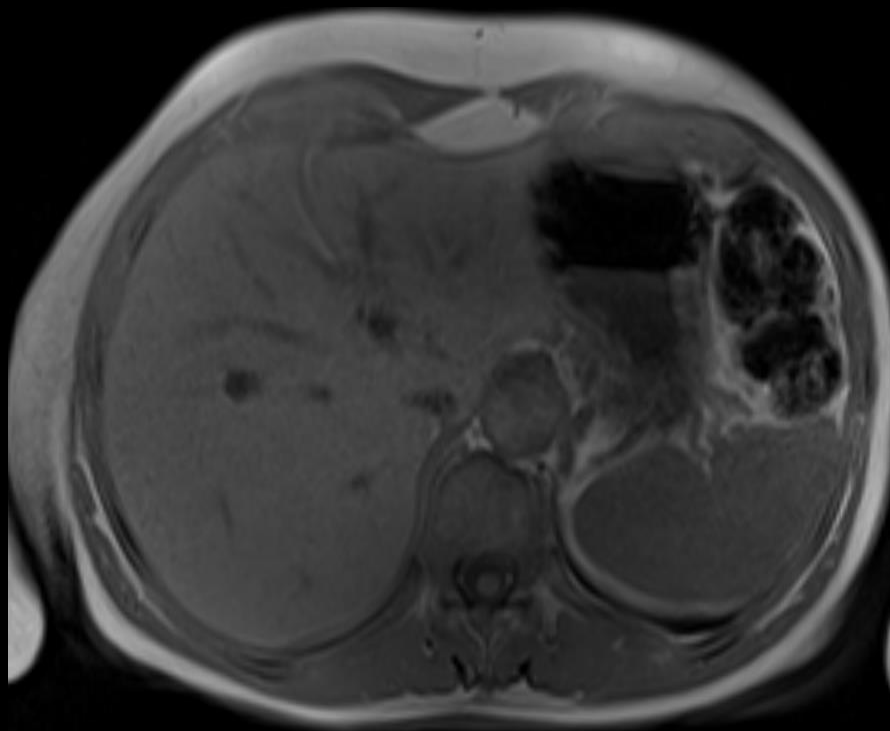
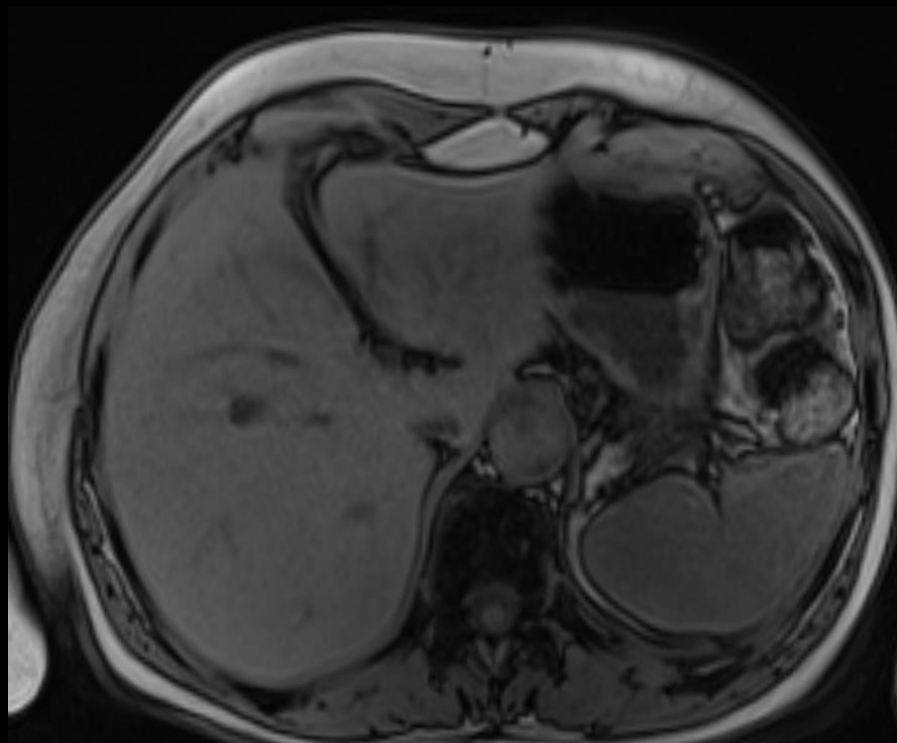
Destruktivní fázové posuny se objevují u gradient echo sekvencí (GRE) jako výsledek konstruktivní a destruktivní interference v procesu defázování a refázování signálů - projeví se jako tmavý stín (okraj) v okolí dané orgánové struktury (ve směru fázového kódování)

Redukce artefaktu:

- použití většího rozsahu „receiver bandwidth“ (rozmezí zachytávaných frekvencí).
- použití přístroje se slabším magnetickým polem
- vyhýbání se gradient echo sekvencím anebo přizpůsobení časování GRE sekvencí (gradient echo timing).

Zajímavost: Magnituda chemického posunu je proporcionální k síle magnetického pole, které ovládá Larmorovou frekvenci





Geometrická distorze

Princip:

Projeví se jako fyzikální distorze obrazu, nemusí být zjevně viditelná v zobrazovaných tkáních ale může být spolehlivě zhodnocena pomocí „mřížkového fantomu“

Příčiny:

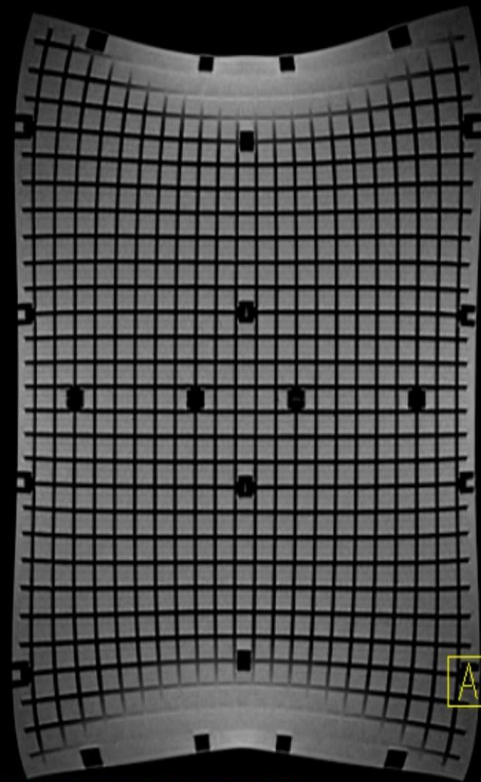
Může být projevem nehomogenity magnetického pole, vedoucí k nepřesnému kódování prostorové pozice, může být způsobena samotným MR přístrojem anebo okrsky různých susceptibilních artefaktů v rámci pacienta (implantované cizí materiály /medical devices/).

Redukce artefaktu:

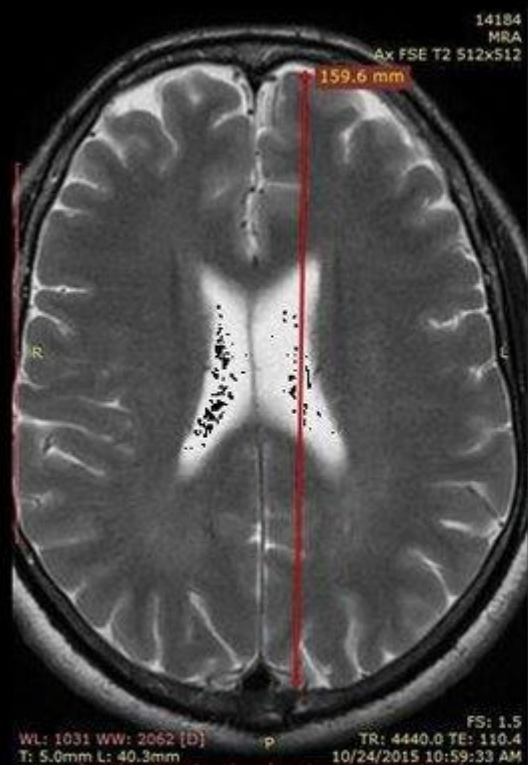
Použití přístrojů s nižší silou magnetického pole, umístění „regions of interest“ blízko centra FOV, které představuje oblast s nejmenší distorzí. Pravidelné kontroly kvality aby se zajistilo náležité „shimmování“.

Zajímavost: Největší výzva v používání MRI k cílení /plánování/ radiační terapie je právě dostatečné zvládnutí geometrické distorze

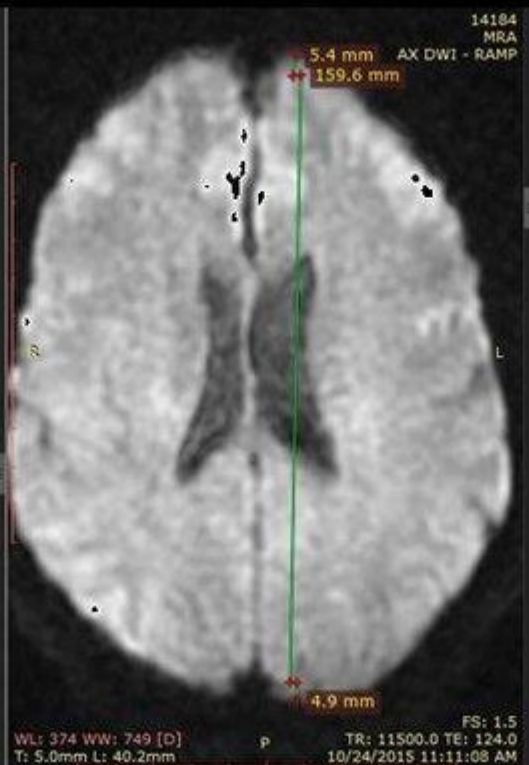
MRI Artifacts: Geometric Distortion



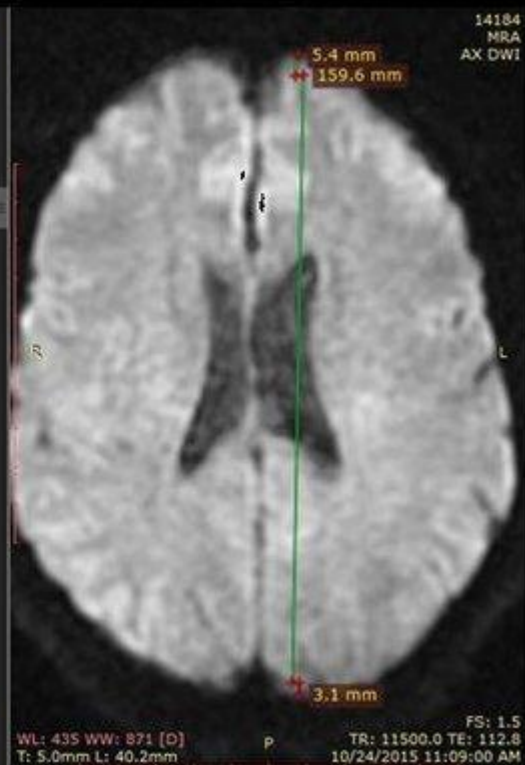
ONCOLOGYMEDICALPHYSICS.COM



A



B



C

Zdroj: <https://www.researchgate.net/figure/Figure-6-patient-3-second-slice-distortion-artifact-in-anterior-region>

Herringbone Artifact

Princip:

- Nadbytečný opakující se vzor („pattern“) je superponován na skenovanou oblast zájmu

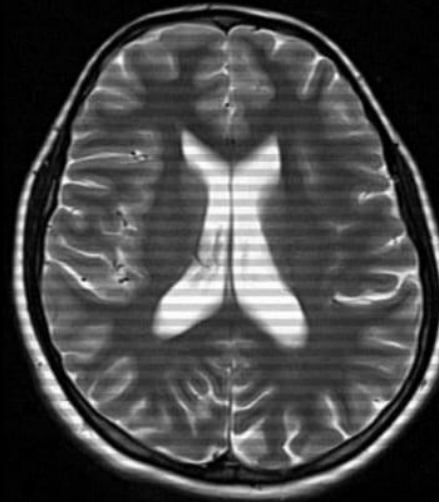
Příčina:

- Způsoben špatným pixelem/pixely v „K-prostorovém obrázku“, obvykle z důvodu hardwerové chyby (kupř. zkrat).

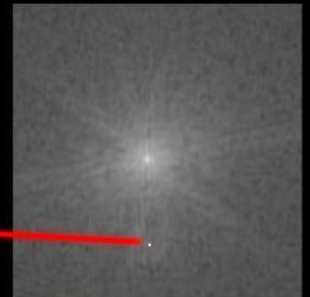
Redukce artefaktu:

- Zopakování snímkování
- Jestliže artefakt přetrvává, bude pravděpodobně zapotřebí oprava scanneru

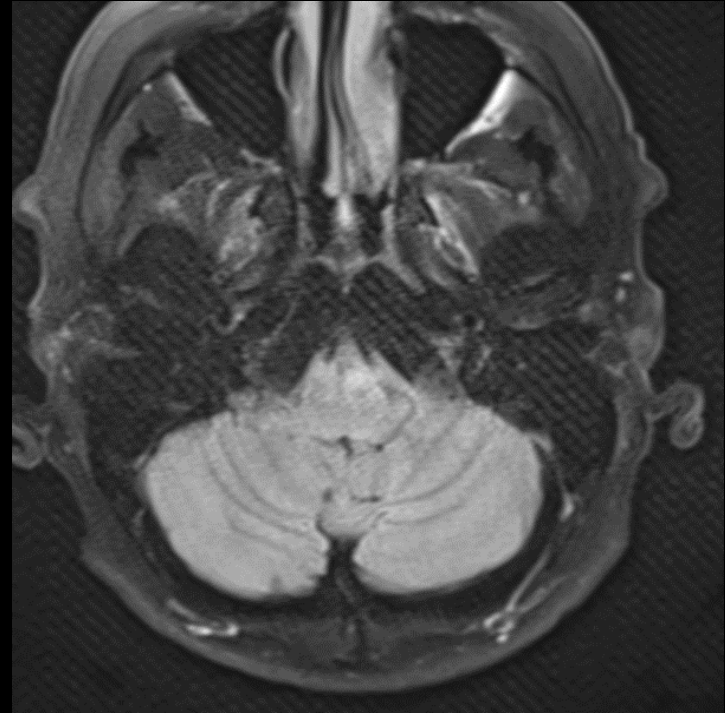
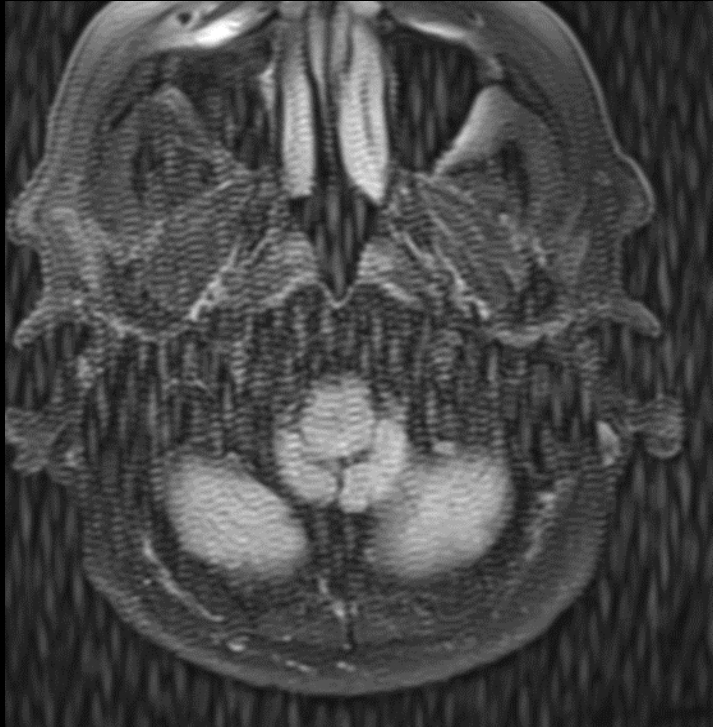
MRI Artifacts: Herringbone



**Repeating pattern
superimposed on
image**



Caused by k-space error



Susceptibilní artefakty

Princip:

Nejčastěji vypadají jako tmavší (černější) okrsky v některé části obrazu (tzv. signal drop-out), můžou se někdy projevit i jako „zsvětlení“ části obrazu anebo jako prostorová distorze

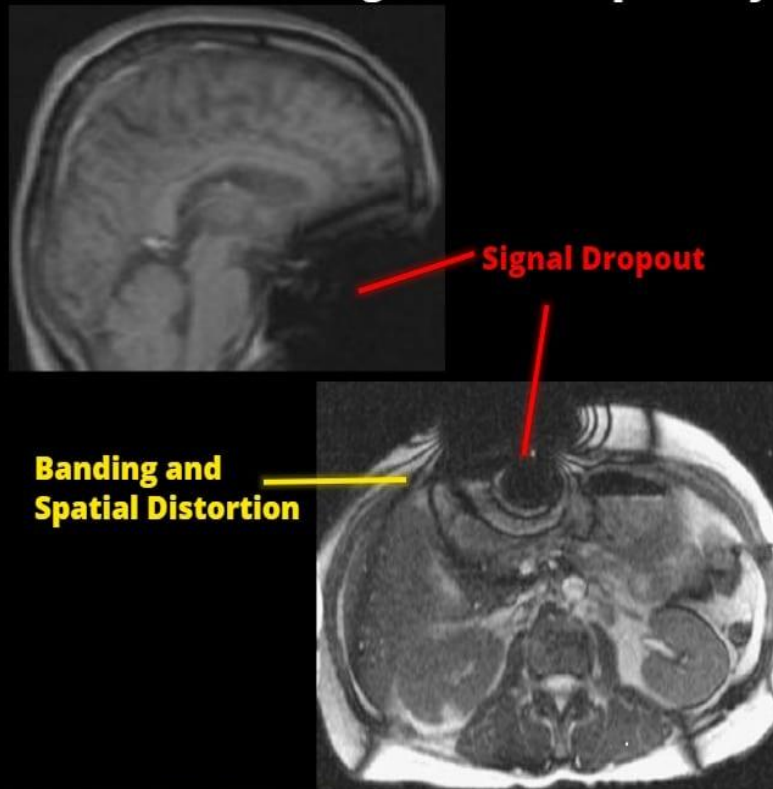
Příčiny:

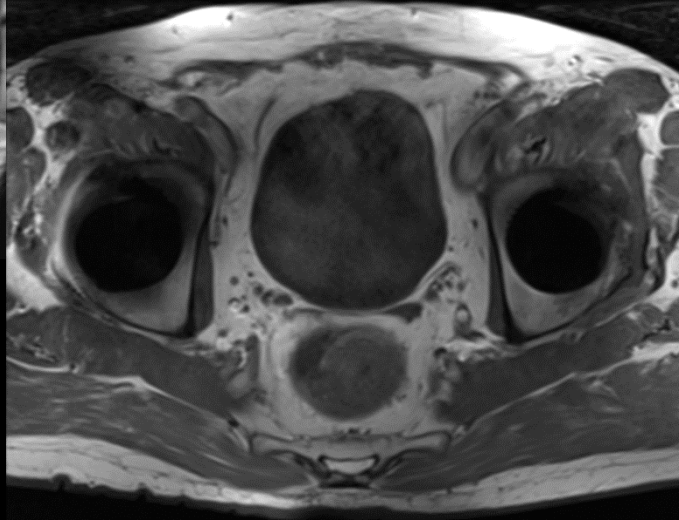
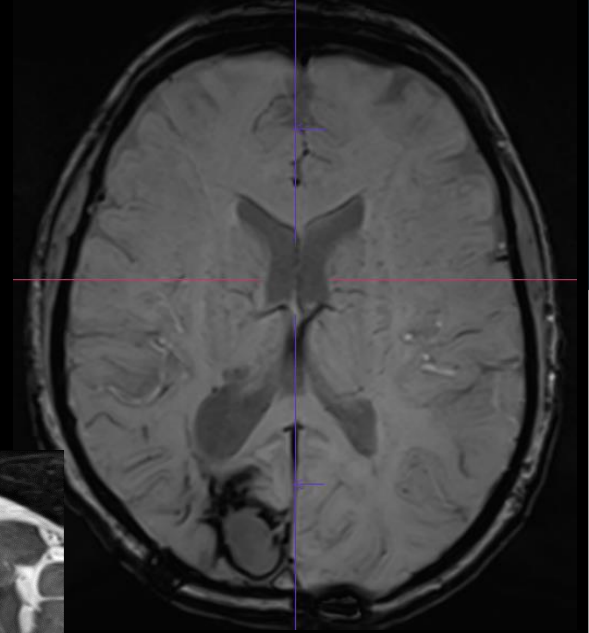
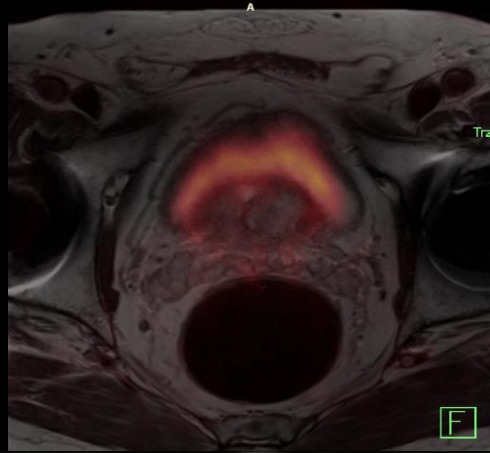
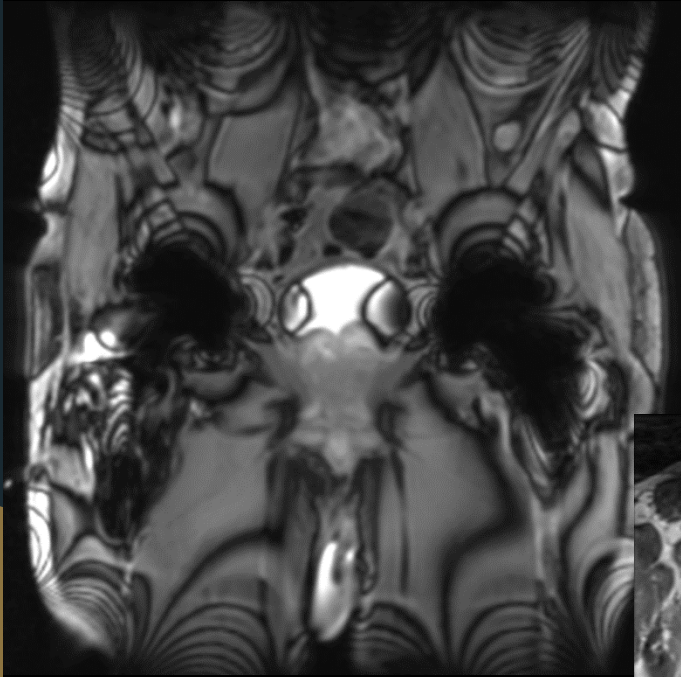
- Jsou výsledkem prudkých změn /rozdílů/ lokálních magnetických polí vycházejících z inkluze ferromagnetických, paramagnet. či diamagnet. materiálů ve skenované oblasti
- Ferromagnetické materiály (železo, nikl, hemosiderin) způsobují silné artefakty s poklesem signálu (signal drop-out), tedy zčernání části obrazu.
- Paramagnetické a diamagnetické materiály (ty které jsou slabě atrahovány magnetickými poli nebo naopak odpuzovány) způsobují celkově menší artefakty.

Redukce artefaktu:

Odstranění kovů ze skenované oblasti (je-li to možné) nebo použití sekvencí s krátkými echo časy.

MRI Artifacts: Magnetic Susceptibility





Moiré Fringes artefakt – „pruhy zebry“

Princip:

Opakující se nepravidelné tmavé a světlé pruhy, citlivější na tyto artefakty jsou gradient echo sekvence (GRE)

Příčiny:

1. Registrování přebytečných signálů (aliasing) z oblastí mimo cívku, které přispívají k formování výsledného obrazu - signály z různých fází jsou superponovány na podkladu konstruktivní a destruktivní interference signálové intenzity
2. Nehomogenity v hlavním magnetickém poli

Redukce artefaktu:

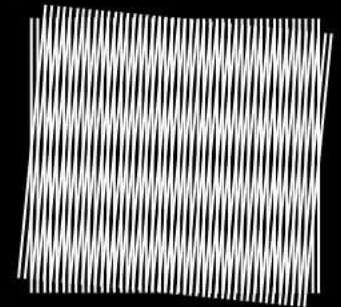
Zmenšení „field of view“, turbo spin echo sekvence namísto GRE

Zlepšení homogenity magnetického pole „shimování“

MRI Artifacts: Moiré Fringes



Moiré pattern generated by constructive and destructive interference





Trunkační (Ringing) artefakt

Princip:

- Jemné paralelní linie v blízkosti vysoce kontrastních tkáňových rozhraní
- Může mít dokonce vzhled anatomické struktury, zvláště v oblasti míchy

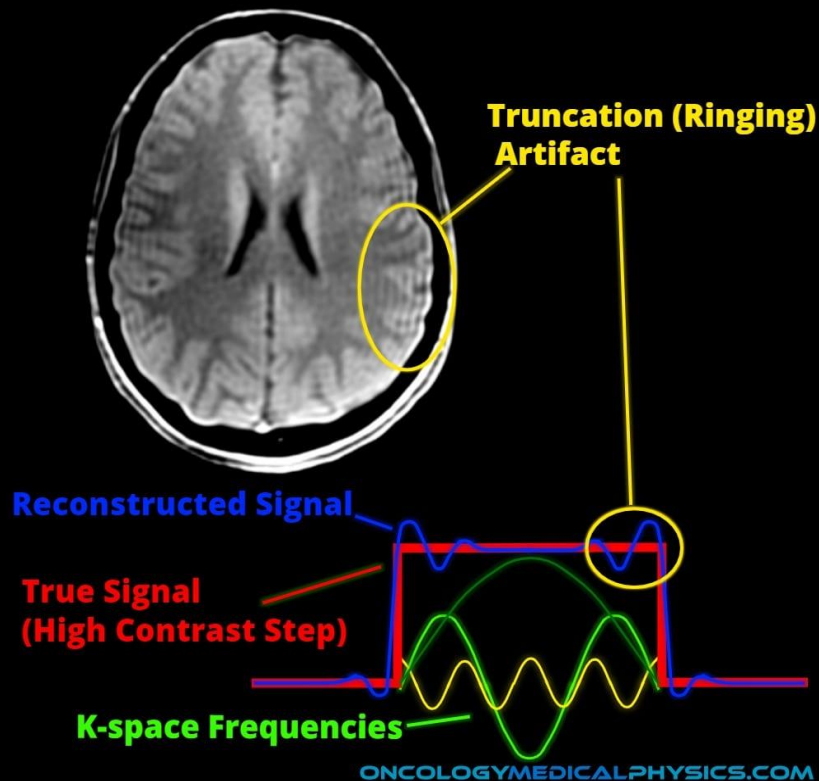
Příčiny:

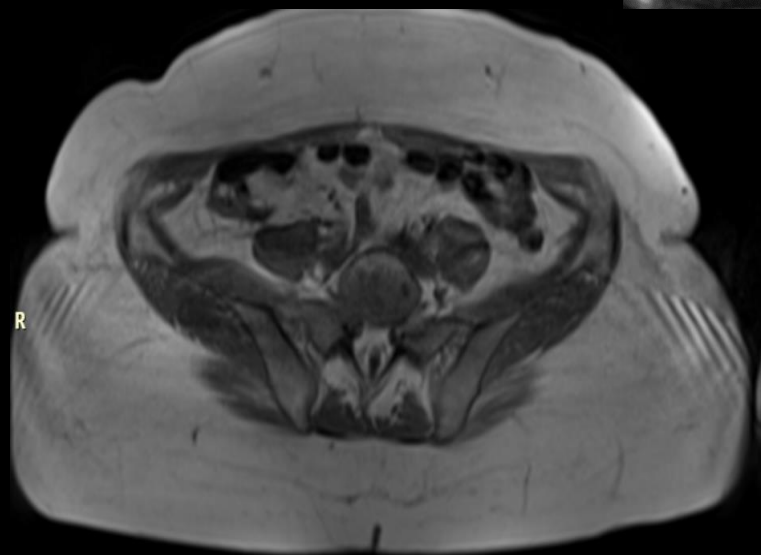
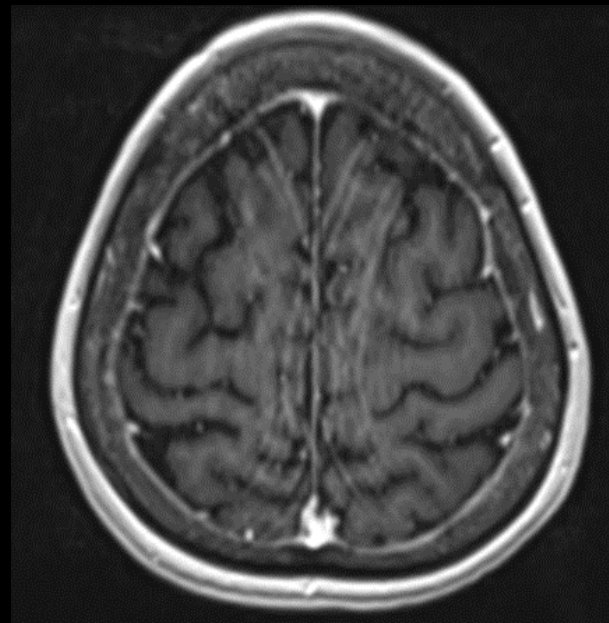
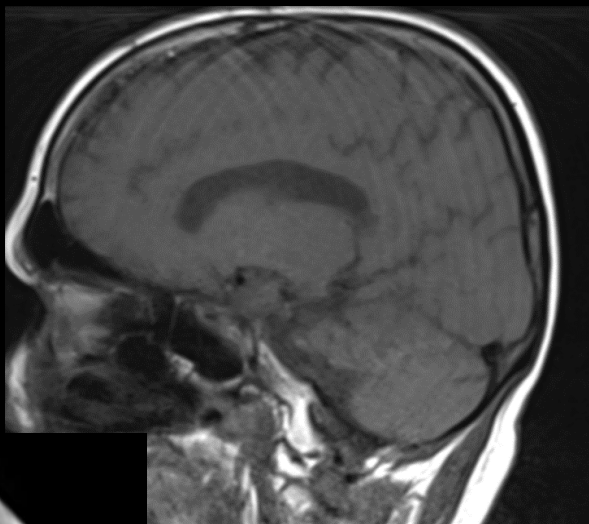
- Je způsoben inverzní Fourierovou transformací použitou ke konvertování K-prostorové mapy do výsledných MR obrázků
- Skokový gradient (anebo velice ostrý/kontrastní okraj) vyžaduje velmi velký (téměř nekonečný) počet různých frekvencí sin vln na konstrukci obrazu. Prakticky jen konečný počet frekvencí může být zatříděn (zavzorkován) co nakonec způsobí oscilace ve výsledném obrazu
- V podstatě jsou zde Fourierovi série osekány (truncated)

Redukce artefaktu:

- Správný post-processing v K-prostoru může redukovat trunkační artefakt

MRI Artifacts: Truncation (Ringing)





Naše Zipper Artifact (zipový artefakt)

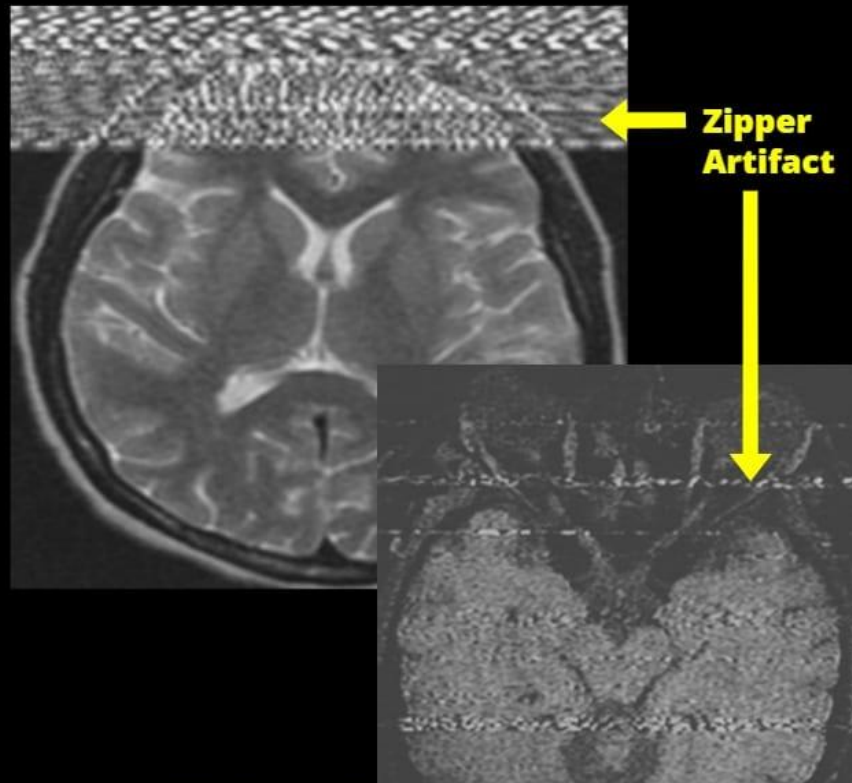
Princip:

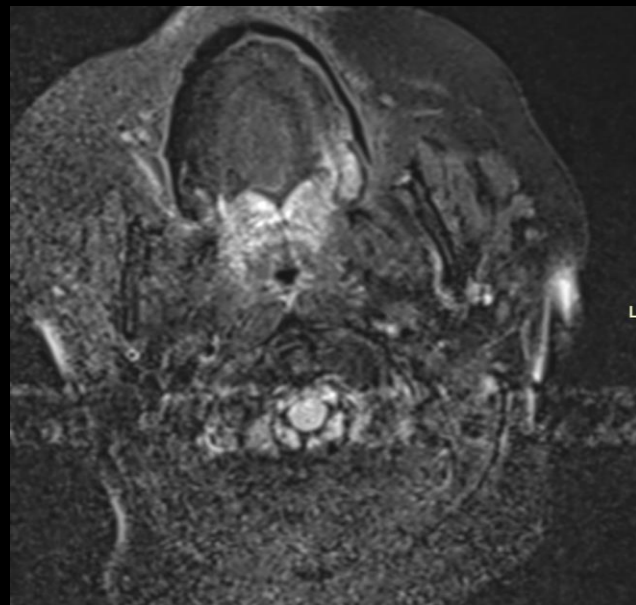
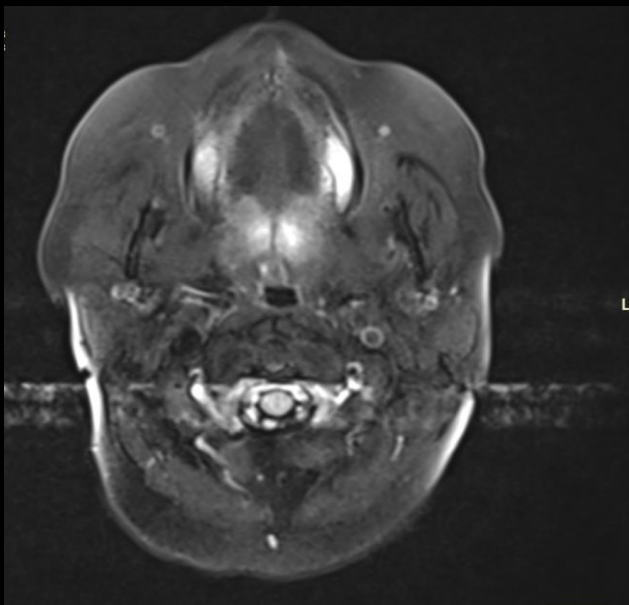
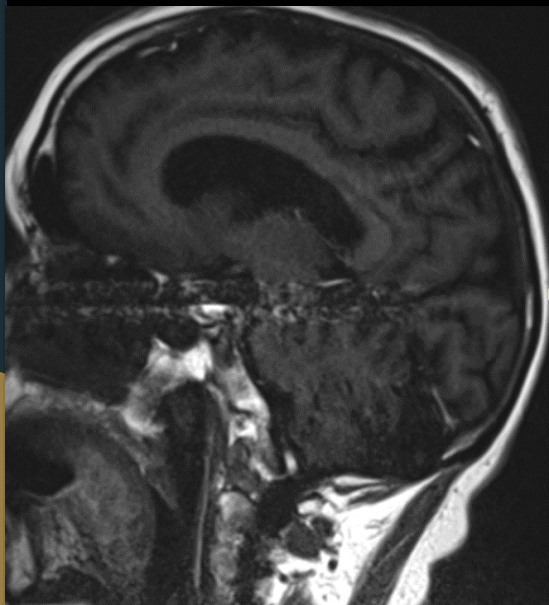
- Interference napříč jedním nebo několika řádky, nejčastěji ve směru fázového kódování obrazu.

Příčiny:

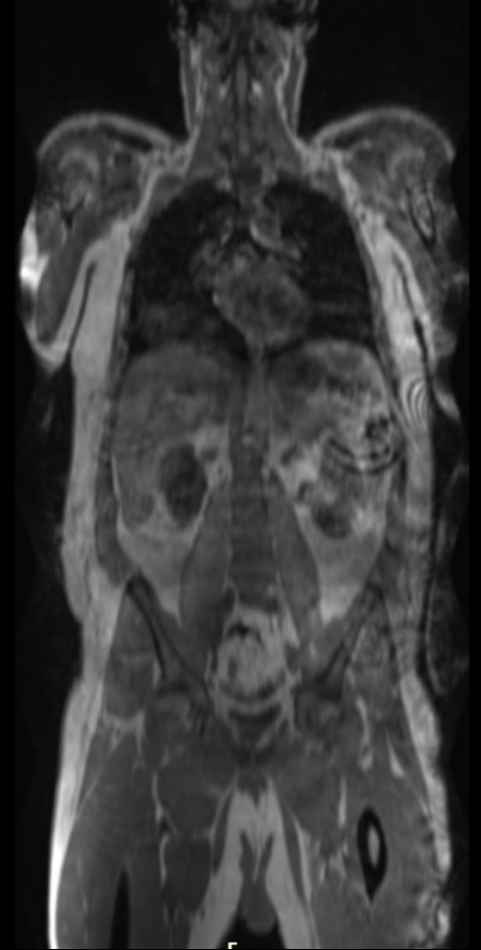
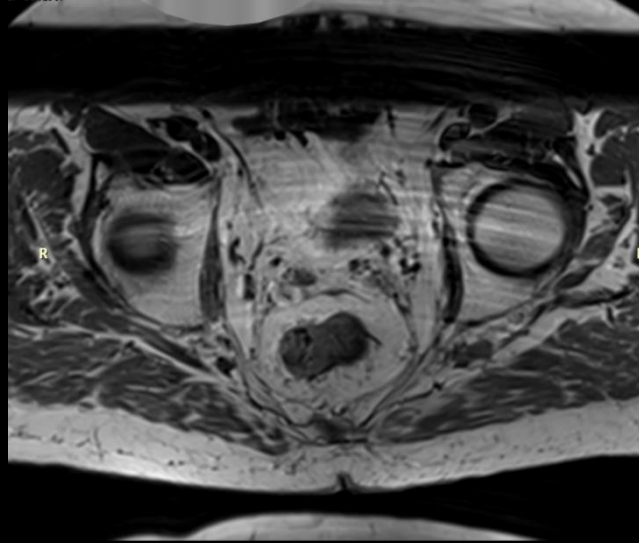
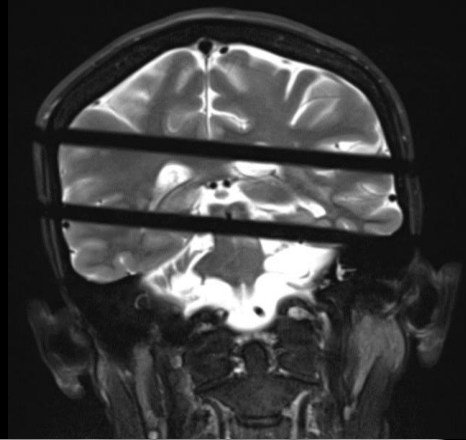
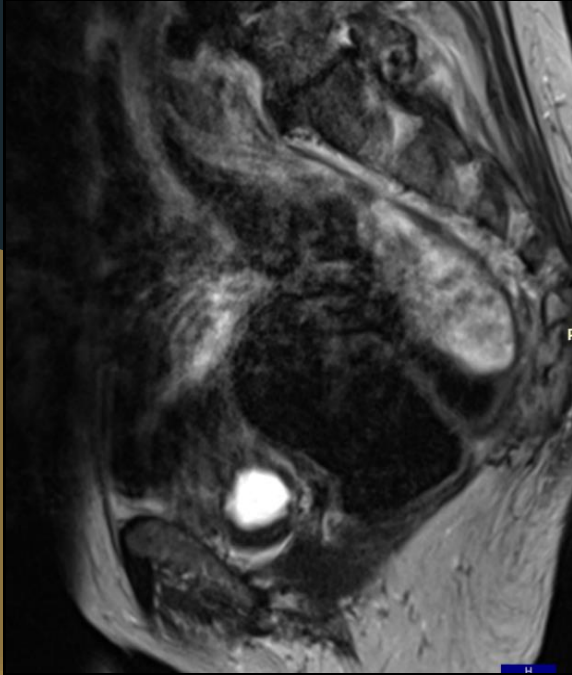
- Nejčastěji způsoben nadbytečným RF signálem zvenčí, který je zachycen přijímací cívkou („feed-through“). Zde bývá ve směru fázového kódování.
- Může také vzniknout ze stimulovaných ech, které jsou výsledkem špatné selekce profilů tloušťky řezů (poor slice selection profiles) anebo špatně nastavených (přizpůsobených) RF-transmíterů. Zde bývá ve směru frekvenčního kódování.
- Redukce artefaktu:
 - Ujistit se, že dveře do MR vyšetřovny jsou zavřeny (tedy že funguje kompletní RF stínění)
 - Přesunout monitorovací systémy pacienta (kupř. anesteziologické přístroje) tak daleko od skeneru jak jen to jde

MRI Artifacts: Zipper

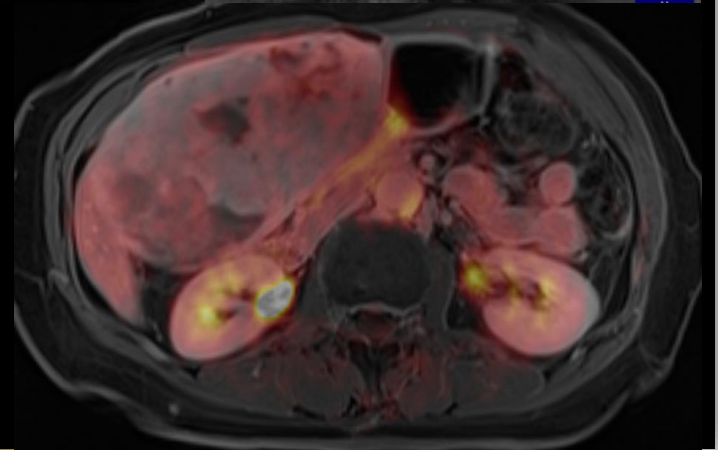
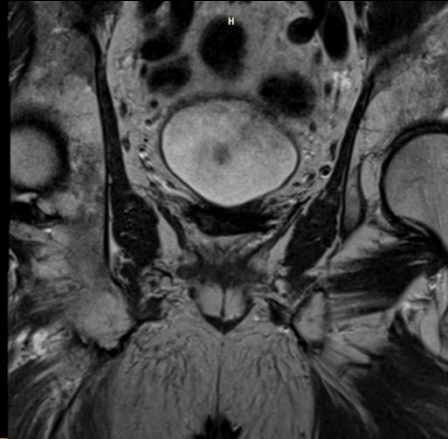
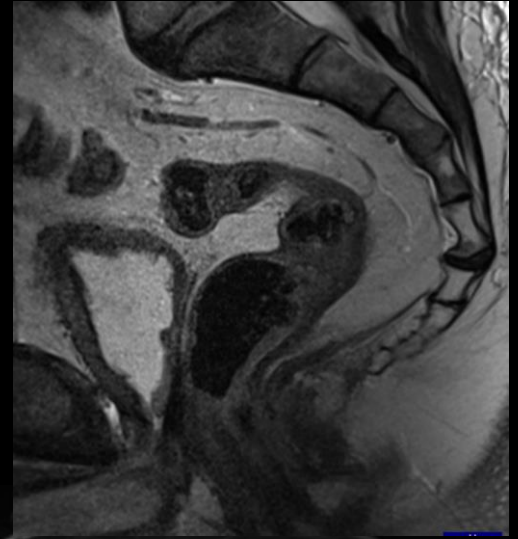
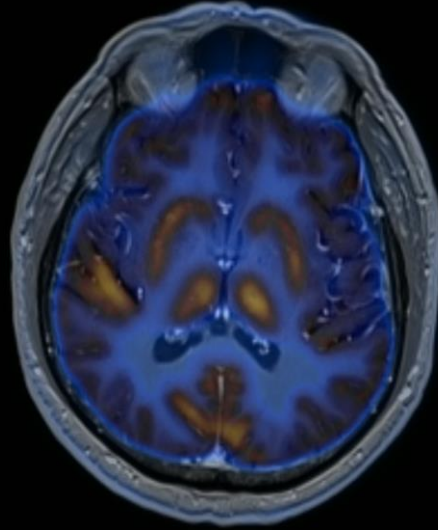
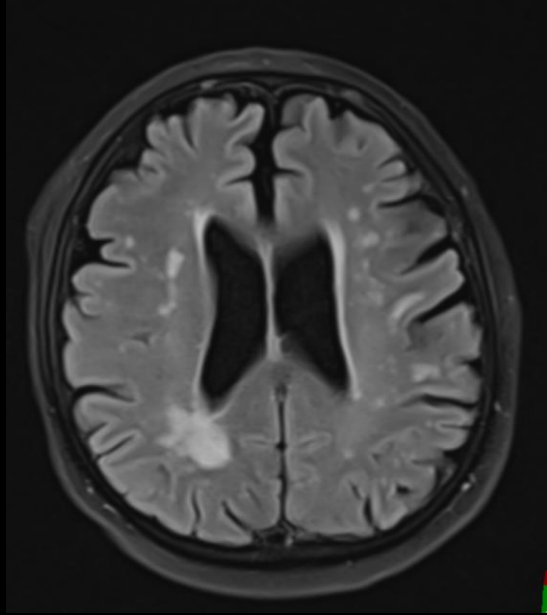




Naše obrázky ze
začátků



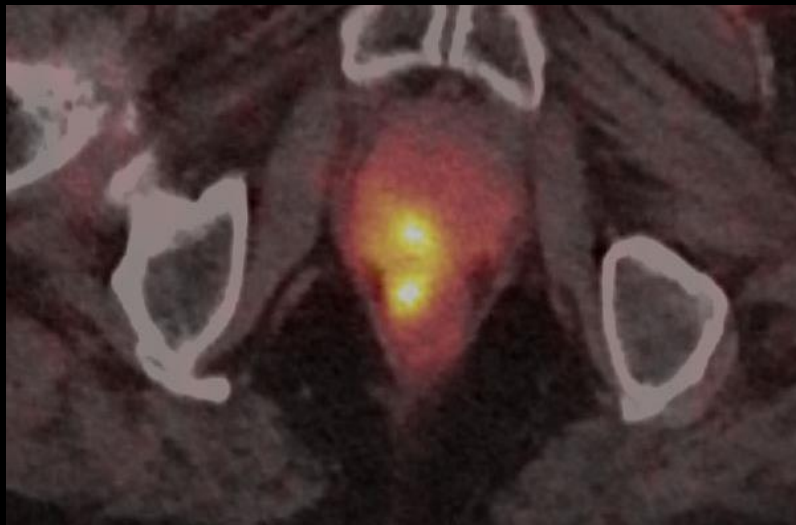
Naše obrázky nyní



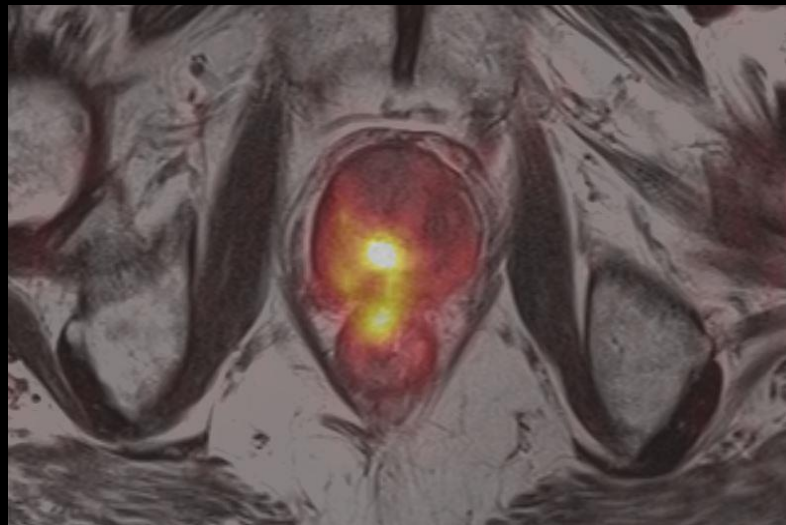
Porovnání obrazových fúzí PET/MR a PET/CT u ^{68}Ga PSMA-11 - generalizovaný ca prostaty

(miT4 miN0 miM1b, PI-RADS 5)

Biograph Vision 600



Biograph mMR

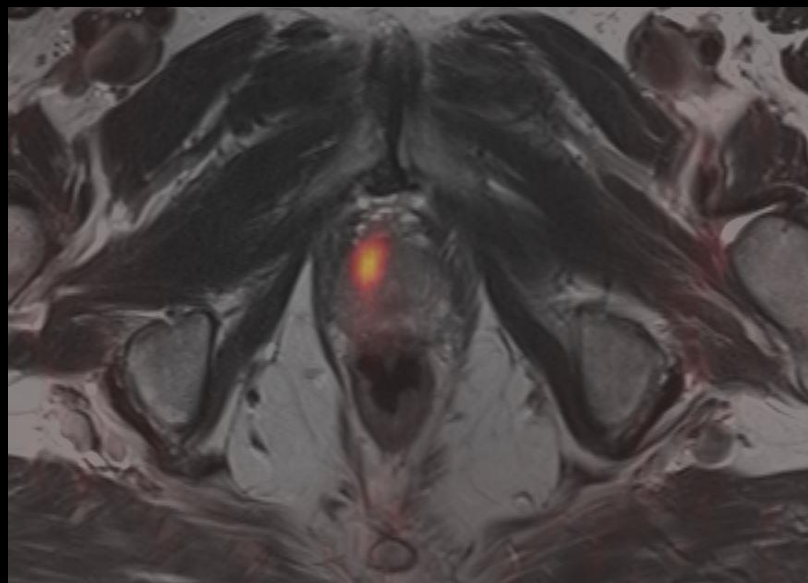


Porovnání obrazových fúzí PET/MR a PET/CT u ^{68}Ga PSMA-11 – karcinom bez generalizace

(miT2u miN0 miM0, PI-RADS 5)

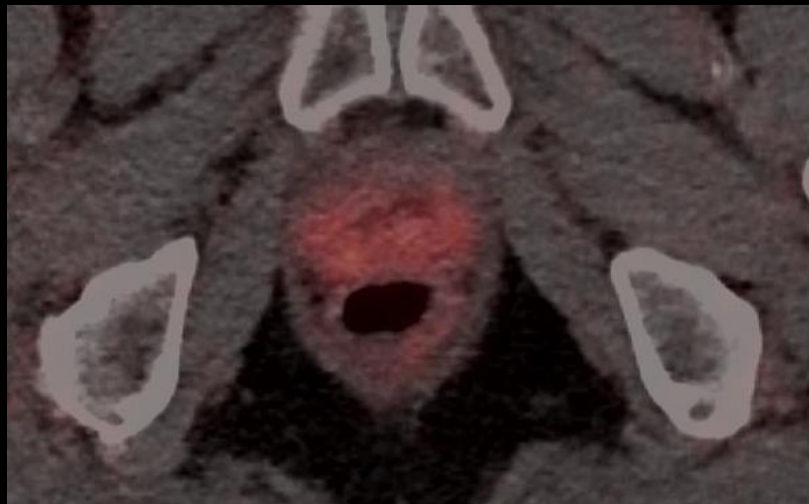
Biograph Vision 600

Biograph mMR

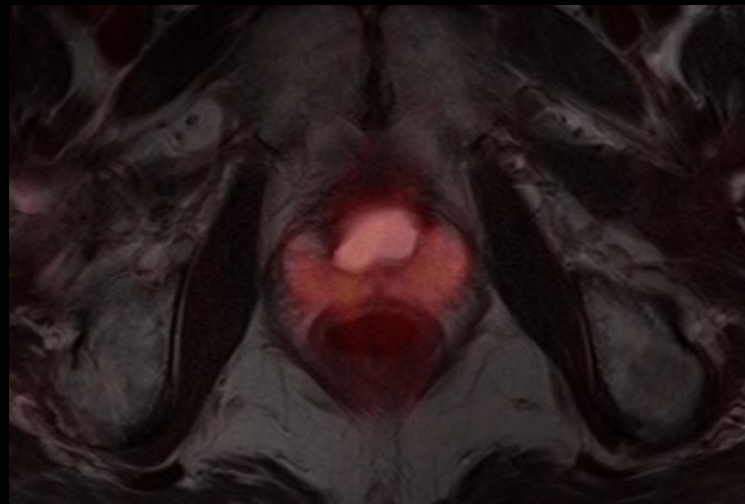


Porovnání obrazových fúzí PET/MR a PET/CT u ^{68}Ga PSMA-11 – negativní nález

Biograph Vision 600



Biograph mMR



Počty jednotlivých vyšetření PET/MR v PET centru NNH (1.6.2023 - 21.3.2025)

- ^{18}F -FDG (epigastrium – 8 pacientů, mozek – 525, ORL – 310, pánev – 283, prsa – 27)
- ^{18}F -Flutemetamol (*Vizamyl*) – 79 pacientů
- ^{18}F -DOPA – 21 pacientů
- ^{68}Ga -DOTATOC – 3 pacienti (preferenčně na PET/CT)
- ^{68}Ga -PSMA – 320 pacientů
- ^{18}F -NaF – 4 pacienti (preferenčně na PET/CT)

Závěr

- Celotělo na PET/CT z důvodu vyšší kvality a rychlosti PET zobrazení než PET/MR
- Vyšetření samotného mozku – pouze PET/MR
- U vstupních stagingů vybraných tumorů hlavy, krční oblasti a malé pánve + u některých pacientů s recidivou shledáváme doplnění cíleného PET/MR přínosnější, než samotné PET/CT a MR
- Nabízíme komplexní „one-stop-shop“ staging
- Vychytání správného nastavení přístroje a co největší omezení nejrůznějších artefaktů je složitý proces
- Vybrání vhodných pacientů / indikací je klíčové