

Výpočetní tomografie s použitím photon-counting detektoru

Na počest 125. výročí objevení paprsků X

Wilhelmem Conradem Röntgenem

Photon-counting detector computed tomography

A Tribute to 125th Anniversary of the X-rays Discovery by Wilhelm Conrad Röntgen

Jiří Ferda¹, Tomáš Vendiš¹, Jan Baxa¹, Hynek Mírka¹, Bernhard Schmidt², André Henning², Stefan Ulzheimer², Thomas Flohr²

¹Klinika zobrazovacích metod LF UK a FN, Plzeň

²Computed Tomography Development Siemens Healthcare GmbH, Computed Tomography, Forchheim, Germany

Hlavní stanovisko práce

Photon-counting-detector CT je novým způsobem akvizice dat pro výpočetní tomografii s velkým potenciálem zvýšení prostorového a kontrastního rozlišení za současné redukce radiační dávky.

SOUHRN

Ferda J, Vendiš T, Baxa J, Mírka H, Schmidt B, Henning A, Ulzheimer S, Flohr T. Výpočetní tomografie s použitím photon-counting detektoru. Na počest 125. výročí objevení paprsků X Wilhelmem Conradem Röntgenem

Cíl: Cílem práce je shrnutí prvních zkušeností s vyšetřováním klinicky indikovaných vyšetření výpočetní tomografií pomocí jedno-zdrojového prototypu photon-counting detektor CT.

Metodika: Vyšetření byla prováděna na jednozdrojovém přístroji s detektorovou soustavou na bázi photon-counting detektoru. Hodnocena byla vyšetření u 50 vyšetřených pacientů, 20 vyšetření plic, 15 vyšetření dvoufázového vyšetření břicha, deset vyšetření tepen hlavy a krku a pět vyšetření hlavy včetně kosti spánkové, vyšetření byla prováděna pomocí akvizice datových stop s šíří elementu 0,4 nebo 0,2 mm. Byla hodnocena spolehlivost akvizice a kvalita zobrazení anatomických struktur

Výsledky: U neselektovaných nemocných indikovaných pro vyšetření výpočetní tomografií byla získána zobrazení, která jsou klinicky minimálně rovnocenným zobrazením ke konvenčnímu CT. Vzhledem k vynikajícímu rozlišení je možné získat zobrazení jemných struktur těla, jakými jsou distální větvení bronchů, kvalitní separace cév a skeletu v oblasti báze

Major statement

Photon-counting-detector CT is a novel way of the data acquisition for computed tomography with a great potential to increase spatial and contrast resolution with the radiation dose reduction at the same time.

SUMMARY

Ferda J, Vendiš T, Baxa J, Mírka H, Schmidt B, Henning A, Ulzheimer S, Flohr T. Photon-counting detector computed tomography. A Tribute to 125th Anniversary of the X-rays Discovery by Wilhelm Conrad Röntgen

Aim: The aim of the study is to summarize the first experience with the imaging using prototype of single-source photon-counting-detector CT in clinically indicated examinations.

Method: All examinations were performed using single-source CT equipped with photon-counting detector. The sample of examinations in 50 patients were evaluated. There were 20 lung parenchyma examinations in diffuse lung diseases (including 10 with ultrahigh resolution mode with slice resolution 0.2 mm), 15 examinations of the abdomen in arterial and portal venous phase (incl. 5 ultrahigh resolution mode with slice resolution of 0.2 mm), 10 examinations of cervical and intracranial arteries, five brain examinations including ultrahigh resolution of the temporal bone. The data acquisition was made using resolution of 0.4 mm for a standard mode and 0.2 mm for ultrahigh resolution.

Results: In non-selected patients with the indication for a clinical imaging, there were obtained images fully useful for a clinical

Přijato: 15. 9. 2020

Korespondenční adresa:

prof. MUDr. Jiří Ferda, Ph.D.
Klinika zobrazovacích metod LF UK a FN
Alej Svobody 80, 304 60 Plzeň
e-mail: ferda@fnplzen.cz

Konflikt zájmů: B. Schmidt, A. Henning, S. Ulzheimer a T. Flohr jsou zaměstnanci Computed Tomography Development Siemens Healthcare GmbH.

Podpořeno projektem MZ ČR Koncepční rozvoj výzkumné instituce 00669806 – FN Plzeň.

lební, zobrazení skloubení sluchových kůstek. U všech vyšetření plic s referenční hodnotou 10 mAs byla dosažena hodnota pod 1 mSv, podobně i u vyšetření CTA hlavy, CT mozku i kostí spánkové, u vyšetření břicha bylo dosaženo srovnatelných hodnot jako u obvyklých při vyšetření konvenčním detektorem.

Závěr: Zobrazení photon-counting detektor CT jsou klinicky plně využitelná, radiační zátěž je u většiny vyšetření snížena ve srovnání s použitím konvenčního přístroje CT. Je možné spolehlivě zobrazit submilimetrové detaily anatomických struktur.

Klíčová slova: výpočetní tomografie, photon-counting detektor, spektrální zobrazení.

assessment. Those images were minimally at the same level as made with conventional CT, or better. Thanks to the excellent resolution, it could be possible to visualize the tiny anatomical structures like bronchi on sub-segmental level of higher generation, the high quality display of vascular structures and articulations of middle ear ossicles. The effective dose equivalent reaches value less than one mSv in all lung, cervical and intracranial arteries, brain and temporal bone, those examinations of the abdomen did not exceed the for conventional CT typical levels of mSv.

Conclusion: The imaging using photon-counting-detector CT were acquired with full clinical usefulness, radiation doses burden to the scanned individual are lower than those in conventional CT in most of indication. The subtle, submillimeter details of the anatomical structures could be visualized with the high certainty.

Key words: computed tomography, photon-counting detector, spectral imaging.

ÚVOD

Photon-counting-detektor je inovativní zařízení pro registraci rentgenového záření, které prochází vyšetřovaným objektem a jehož pomocí dochází k transformaci informace o absorpci záření ve tkáních. Konvenční CT detektory využívají oxidy gadolinia nebo gadolini-um oxysulfidy jako scintilační materiál, u něhož intenzita scintilačního impulzu je úměrná energii kvanta záření X. Světelný záblesk je pak fotodiodou převeden na elektrický proud. Photon-counting-detektor je zařízení založené na principu přímé konverze signálu získaného v detektorovém materiálu na digitální signál, na rozdíl od konvenčních scintilačních materiálů je použito polovodiče z kadmiumtelluridu (CdTe) nebo kadmium-zink-telluridu (CZT). Tento materiál dovoluje přímou digitalizaci dat bez vymezení konverze světla na elektrický proud vlivem přímé konverze energie kvanta záření X za vzniku elektron-děrového páru. Při vlastní detekci záření není třeba lamel sekundární clony k rozdělení detektorových segmentů na pixely, a tak je možné k rekonstrukci obrazu využít nižší množství kvant, nebo naopak stejné množství kvant s vyšší odpovědí detektorové soustavy (1–3).

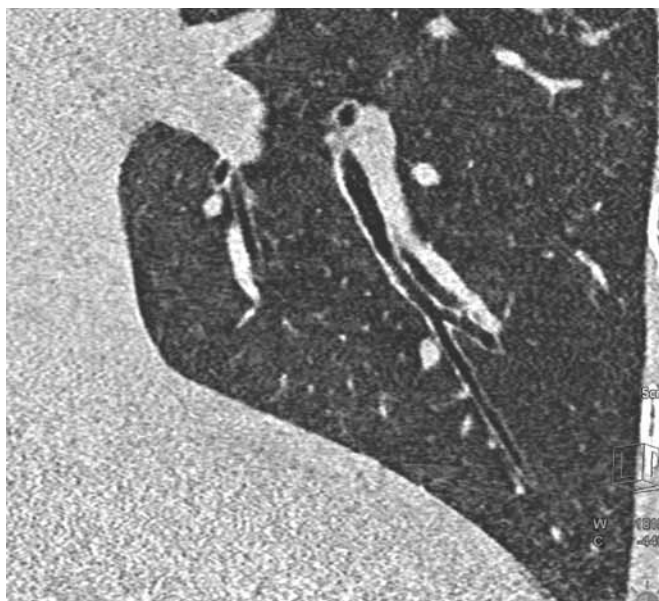
Vlastní přístroj výpočetní tomografie použitelný při klinickém zobrazení je založen na obecném principu výpočetní

tomografie, kdy pouze samotná detektorová soustava bude nahrazena photon-counting detektorem. Obecně photon-counting detektor umožňuje zobrazení s vyšším prostorovým rozlišením a současně s vysokou efektivitou při nízkém fluxu fotonů, tedy i za podmínek výrazně nízké expoziční dávky.

Akvizici dat je možné provádět shodným způsobem, jakým jsou prováděna běžná CT vyšetření. Nízkodávková zobrazení pomocí daného detektoru byla již testována na fantomových studiích a byla prokázána stabilita detektoru a stabilita akvizice dat v dávkách, které jsou shodné či nižší v porovnání s dávkami používanými při skenování pokročilými skenery současné generace CT přístrojů. Potenciál photon-counting detektoru při CT by měl být především dosažení vyšší kvality vyšetření kostní struktury anebo plicní tkáně s cílením na nízkodávková vyšetření, dále zobrazení abdominálních orgánů a cévní soustavy s podáním jódové kontrastní dávky, a to u především pacientů s patologickými procesy v plicní tkáni, v oblasti břicha a s cévními onemocněními.

Primárními cíli práce je zhodnocení prvních zkušeností s hodnocením diagnostické efektivity diagnostického zobrazení CT s pomocí photon-counting-detektoru s ohledem na prostorové rozlišení a kontrastní rozlišení při

1a



1b



1

Photon-counting-detector CT plic, zobrazení stěny bronchů na subsegmentální úrovni, datová stopa akvizice 0,4 mm, rekonstrukce obrazů v šíři 0,8 mm, inkrement 0,6 mm

Photon-counting-detector CT of lungs, imaging of the bronchial wall on sub-segmental level, individual data trace width 0,4 mm, reconstruction of the images with 0.8 mm width and increment 0.6

2a



2b



2

Photon-counting-detector CT plic, zobrazení u intersticiální plicní fibrózy, datová stopa akvizice 0,4 mm, rekonstrukce obrazů v šíři 0,8 mm, inkrement 0,6 mm

Photon-counting-detector CT of lungs, imaging of interstitial lung fibrosis, individual data trace width 0,4 mm, reconstruction of the images with 0.8 mm width and increment 0.6

zobrazení reálného objektu lidského těla *in vivo* a vytvoření optimálního zobrazovacího protokolu pro daný typ detektorové soustavy, sekundárními cíli je posouzení vztahu mezi úrovní expozičních hodnot, kontrastním a prostorovým rozlišením ve vztahu k habitu vyšetřovaných osob a ve vztahu k patologickým procesům ve tkáních.

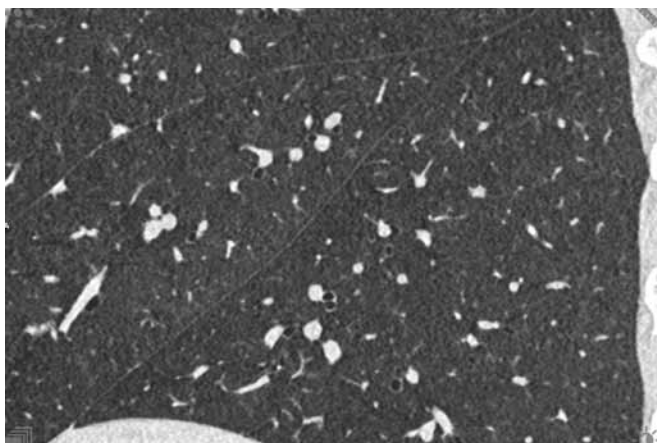
METODIKA

Studie byla povolena rozhodnutím Státního ústavu pro kontrolu léčiv z dubna 2020, a to pro vyšetření pacientů v klinickém stavu WHO 0–1 a pro vyšetření plánovaná, nikoliv pro vyšetření akutní nebo u nemocných v urgentním stavu.

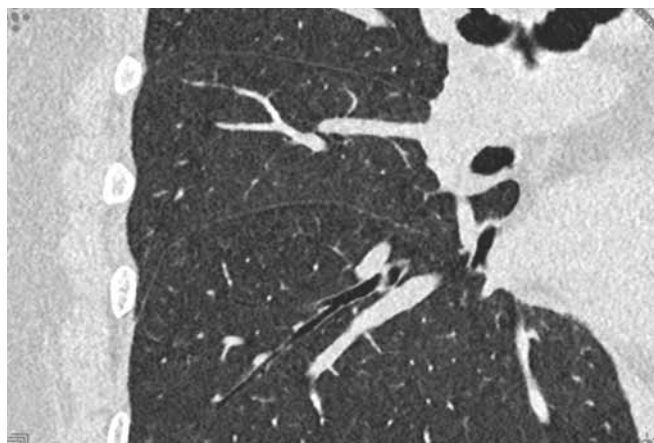
Přístroj CT a akvizice dat

Jednozdrojový CT systém Somatom Count Plus je prototypem, jenž je konstruován na bázi přístroje komerčně dostupném (Somatom X.cite, výrobce Siemens Healthineers, Forchheim, Německo), je vybaven photon-counting-detektorem. Funkčnost a bezpečnost systému byla výrobcem výše uvedeným

3a



3b



- 3 Ultra-high resolution photon-counting-detector CT of plic, zobrazení interlobií a stěny bronchů na subsegmentální úrovni, datová stopa akvizice 0,2 mm, rekonstrukce obrazů v šíři 0,2 mm, inkrement 0,1 mm, je vidět excelentní zobrazení stěny bronchů, ale i struktura uvnitř sekundárního lalůčku

Ultra-high resolution photon-counting-detector CT of lungs, imaging of the interlobia and bronchial wall on sub-segmental level, individual data trace width 0.2 mm, reconstruction of the images with 0.2 mm width and increment 0.1 mm, note the excellent imaging inside the secondary lobulus and its inner structure

otestována a je jím zaručena a při předání systému pro účely klinického hodnocení byla ověřena funkčními testy na místě instalace. U přístroje byly provedeny testy nutné k uvedení do provozu.

Photon-counting-detektor zaujímá takovou výše kruhu, kdy je možné sběrem dat pokrýt celý prostor o poloměru 50 cm, v ose Z pokrývá detektor šíří 5,76 mm v izocentru, gantry umožňuje rotaci o periodě 0,33 s. Systém je vybaven zářičem, používaným v daném komerčně dostupném přístroji SomatomX.cite – Roentgenovou trubicí Vectron s výkonem až 120 kW. Detektor dovoluje akvizici dat ve dvou různých módech.

Základní mód s využitím 1376 detektorových kanálů v konfiguraci „fan-beam“ svazku, s odpovídající velikostí kanálu 0,4 mm v izocentru, s možností rekonstruovat šíři řezu v těžce šíři 0,4 mm; to samo o sobě je vylepšení rozlišení ve srovnání se současnými CT přístroji o přibližně 30%.

Mód vysokého rozlišení označujeme, kdy detektor při tomto nastavení umožňuje náběh dat 2752 detektorovými kanály v konfiguraci „fan-beam“ paprsku, s odpovídajícím rozlišením 0,2 mm v izocentru. Minimální šíře rekonstruovaného obrazu je pak 0,2 mm. Takové rozlišení je dvojnásobné, než je možné dosáhnout u současných přístrojů.

Je-li použit standardní mód rozlišení, detektor dovoluje v současné konfiguraci poskytovat CT data ve dvou

energetických koších s použitím k rekonstrukci dat odpovídající dvěma energiím záření s odpovídajícími klinickými aplikacemi. U přístroje je umožněna akvizice dat pomocí nastavení napětí 90, 100, 120 a 14 kV, přístroj je vybaven dávkovou proudovou modulací s nastavením referenční hodnoty kvality zobrazení (quality reference mAs).

Soubor pacientů

U všech pacientů byl získán informovaný souhlas s vyšetřením, které je součástí studie povolené SÚKL. V období od května do července 2020 bylo provedeno celkem 50 vyšetření. V 20 případech bylo provedeno zobrazení hrudníku bez podání kontrastní látky u nemocných s difúzními postiženími plicního parenchymu se sníženou dávkou, z nich u deseti bylo použito skenování s ultravysokým rozlišením s použitím detektorového elementu velikosti 0,2 mm; u 15 pacientů vyšetření břicha s provedením dvoufázového vyšetření v arteriální a venózní fázi po podání jódové kontrastní látky intravenózně, z těchto vyšetření byla u deseti nemocných použita akvizice dat v arteriální fázi nástřiku s ultravysokým rozlišením (detektorový element 0,2 mm); u deseti nemocných bylo provedeno vyšetření CT angiografie oblouku aorty, krku a mozku s použitím 90 kV protokolu; u pěti nemocných byla provedena CT angiografie mozku, a to včetně zobrazení

spánkové kosti s ultravysokým rozlišením, kdy u zobrazení spánkové kosti bylo použito detektorového elementu velikosti 0,2 mm).

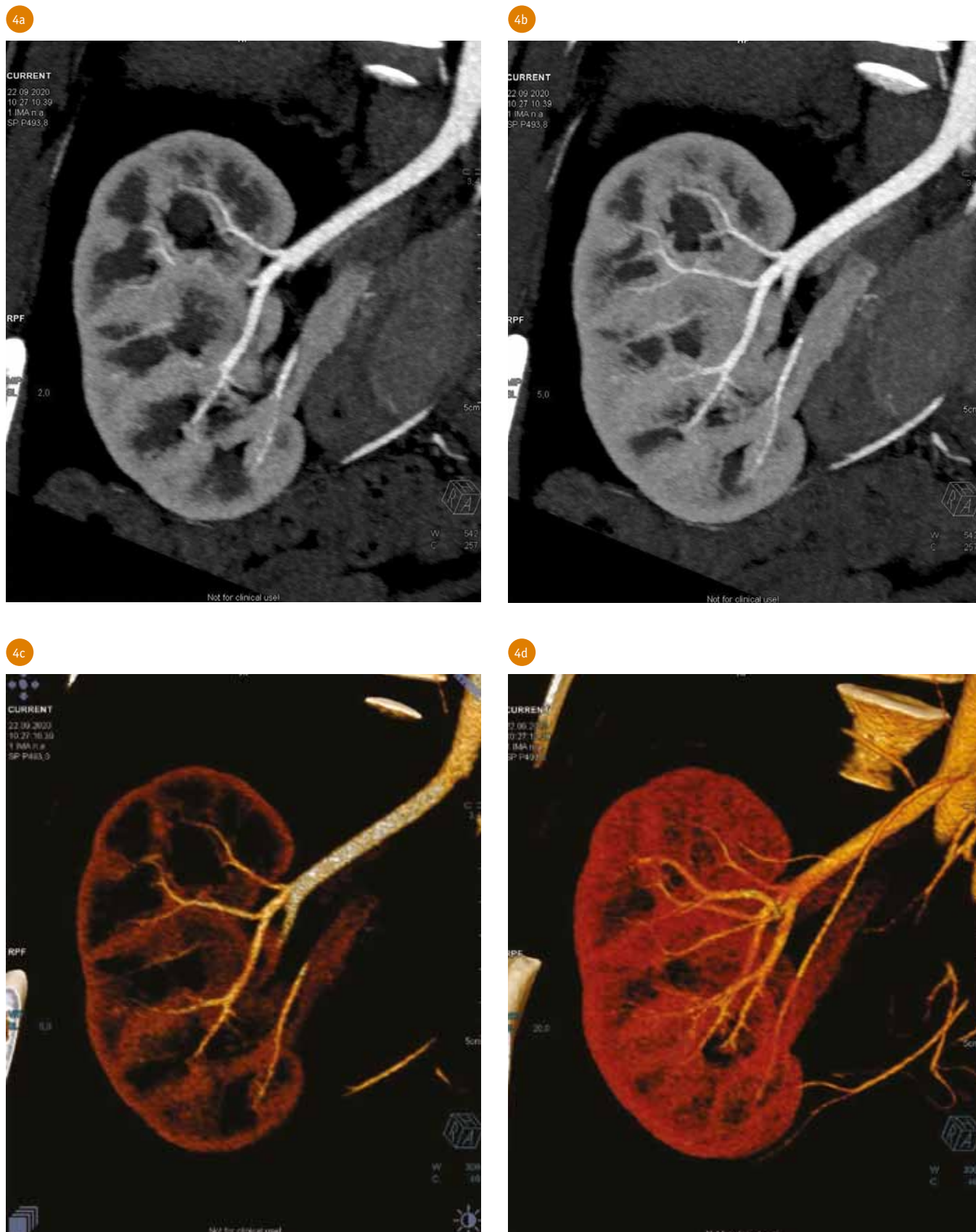
Hodnocení vyšetření

Hodnocena byla kvalita zobrazení ve smyslu zobrazení kritických anatomických struktur, úrovně šumu a kontrastního rozlišení po podání kontrastní látky, jednotlivá kritéria jsou shrnuta v tabulce 1 společně s výsledky hodnocení. Hodnoceny byly i dosažené dávky při datové akvizici – byla sledována hodnota dávkového ekvivalentu vypočítaná pomocí dosažené DLP (dose length product) vynásobené koeficientem 0,014 v oblasti hrudníku, 0,015 v oblasti břicha, 0,0031 u vyšetření hlavy s krkem a 0,0021 u vyšetření mozku a kosti spánkové.

VÝSLEDKY

U všech vyšetření bylo provedeno vyšetření bez komplikací ve smyslu výskytu chyby akvizice dat, selhání akvizice dat nebo nemožnosti rekonstrukce dat. Nevyskytly se ani klinické komplikace vyšetření v souvislosti se stavem nemocného nebo s podáním kontrastní látky.

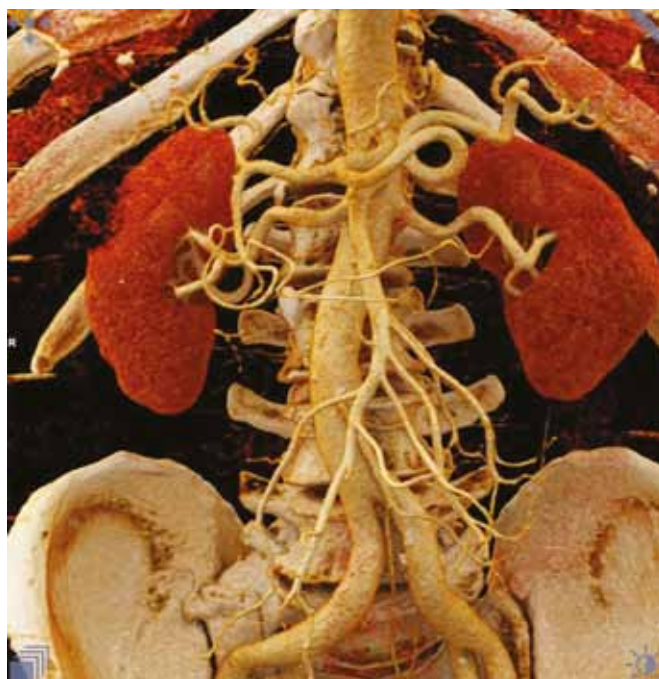
U plicního vyšetření bylo dosaženo vynikajícího zobrazení i při rekonstrukci dat s šíří vrstvy 0,8 mm,



4 Ultra-high resolution photon-counting-detector CT angiografie ledviny, zobrazení interlobálních a arkuátních arterií na subsegmentální úrovni, datová stopa akvizice 0,2 mm, rekonstrukce obrazů v šíři 0,2 mm, inkrement 0,1 mm, je vidět excelentní zobrazení cévních struktur pomocí MIP vrstev i VRT

Ultra-high resolution photon-counting-detector CT angiography of the kidney, imaging of the interlobar and arcuate arteries, individual data trace width 0.2 mm, reconstruction of the images with 0.2 mm width and increment 0.1, note the excellent imaging of the vascular structures using MIP and VRT

5a



5b



5 Photon-counting-detector CT břicha v arteriální (a) a venózní-portální fázi (b) volume rendering rekonstrukce (cinematic VRT), datová stopa akvizice 0,4 mm, rekonstrukce obrazů v šíři 0,8 mm, inkrement 0,6 mm, je vidět excelentní zobrazení cévních struktur splanchnického řečiště

Photon-counting-detector CT the abdomen in the arterial (a) and porta phases (b), individual data trace width 0.4 mm, reconstruction of the images with 0.8 mm width and increment 0.6, cinematic VRT showing the vascular splanchnic structures – arterial (a) and portal (b)

Tab. 1. Výsledky zobrazení

Table 1. The results of the imaging

	Počet vyšetření	Šíře datové stopy elementu	kV	ref. Mas	Rekonstrukce nejtenčí vrstvy	Inkrement	Rekonstrukční algoritmus	Kritická struktura zobrazení	Ano	Ne	SD HU maximální hodnota	Ano	Ne	Dávkový ekvivalent (mSv) rozpětí
CT plic	10	0,4 mm	120	10	0,8 mm	0,6 mm	HR plíce	zobrazení bronchu druhého řádu větvení v dolním plicním laloku	9	1	trachea – 60 HU – ROI 1,5 cm ²	10	0	0,018–0,714
UHRCT plic	10	0,2 mm	120	10	0,2	0,1 mm	HR plíce	zobrazení bronchu druhého řádu větvení v dolním plicním vlevo	10	0	trachea – 60 HU – ROI 1,5 cm ²	10	0	0,336–0,401
Dvoufázové CT břicha první arteriální fáze	10	0,4 mm	120	70	0,8 mm	0,6 mm	měkké tkáně	aa. interlobaris větvení v kortexu	8	2	m. erector spinae – 15 HU – ROI 2,0 cm ²	9	1	1,89–8,653
CTA břicha první UHR arteriální fáze	5	0,2 mm	120	70	0,2 mm	0,1 mm	měkké tkáně	aa. interlobaris větvení v kortexu	5	0	m. erector spinae – 15 HU – ROI 2,0 cm ²	5	0	2,860–3,990
Dvoufázové CT břicha druhá venózní fáze	15	0,4 mm	120	70	0,8 mm	0,6 mm	měkké tkáně	nasycení v. portae na 150 HU + spektrální monochromatická rekonstrukce	10	0	standardní zobrazení – játra, S4 – 15 HU – ROI 2,0 cm ²	9	1	2,1–8,653
CTA oblouku aorty, krku a mozku	10	0,4 mm	90	138	0,8 mm	0,6 mm	měkké tkáně	canalis opticus – odlišení a. ophthalmica a kosti	9	1	bazální ganglia – 15 HU	10	0	0,499–0,934
CT mozku	5	0,4 mm	120	100	0,8 mm	0,6 mm	mozek	šedá hmota v gyrus precentralis	5	0	postranní komora – 15 HU – ROI 1,0 cm ²	9	1	0,407–0,875
UHRCT spánkové kosti	5	0,2 mm	120	100	0,2 mm	0,1 mm	UHR spánková kost	stapes a inko-stapediální kloub	5	0	sinus sphenoidalis – 60 HU – ROI 1,5 cm ²	5	0	0,290–0,401

6a



6b



6c



6d



4 Photon-counting-detector CT břicha v venózní-portální fázi, datová stopa akvizice 0,4 mm, rekonstrukce obrazů v šíři 0,8 mm, inkrement 0,6 mm, spektrální analýza dat u nálezu adenomu nadledviny s rekonstrukcí monoenergetických obrazů s ekvivalentem energie 45 keV (a), 55 keV (b), 120 keV (c) a 190 keV (d), ekvivalent 190 keV odpovídá virtuálnímu nativnímu zobrazení, příspěvek jódu k zobrazení vymizel
Photon-counting-detector CT of the abdomen in portal phase individual data trace width 0.4 mm, reconstruction of the images with 0.8 mm width and increment 0.6 mm, spectral analysis – note the disappearing iodine contribution to the image – monochromatic imaging equivalent of energies of 45 keV (a), 55 keV (b), 120 keV (c) a 190 keV (d)

s rekonstrukčním inkrementem 0,6, ultravysoké rozlišení bylo možné použít i pro rekonstrukci dat až s velikostí voxelu 0,1 mm, kdy pro data byla zvolena rekonstrukce 1024 × 1024 bodů, šíře vrstvy 0,2 mm, rekonstrukční inkrement 0,1 mm. Při tomto rozlišení je v současném SW prostředí vyhodnocování dat již problematický značný objem dat, přesto bylo možné obrazová data použít pro hodnocení v 3D

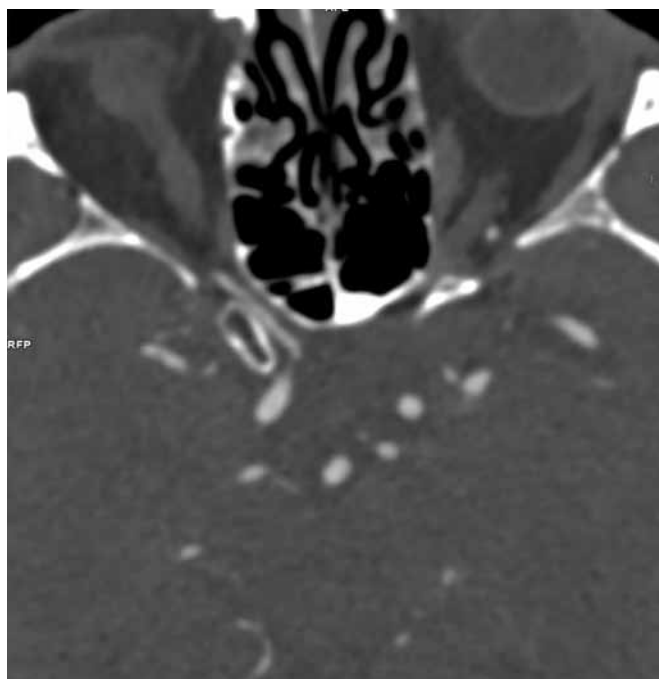
prostředí. Použitím těchto rekonstrukcí jsme byli schopni vizualizovat i jemné bronchy druhého a třetího řádu větvení segmentálních průdušek.

U CT angiografické fáze vyšetření břicha v arteriální fázi je možné dosáhnout takového zobrazení renálních cév, že lze diferencovat průběh interlobálních arterií až do kortexu ledviny, v některých případech i arterií arkuálních. Při

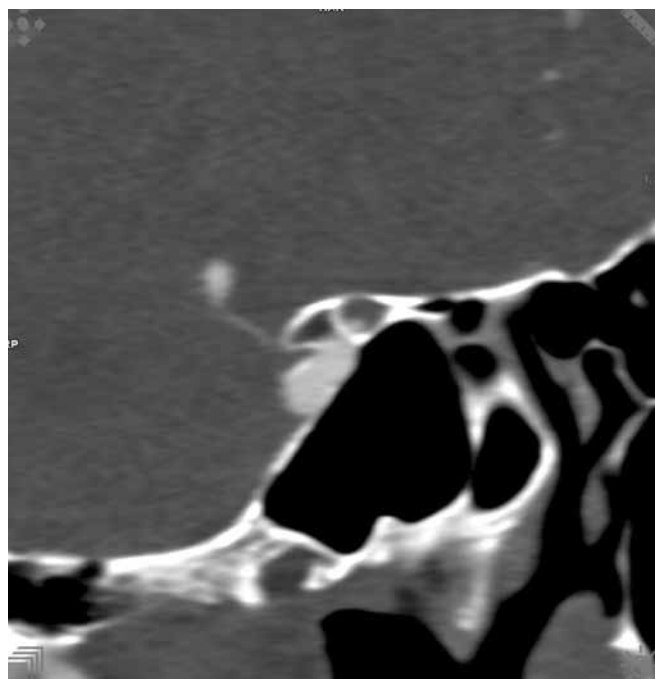
zobrazení CT angiografií krčních a mozkových tepen bylo dosaženo výborné vizualizace intrakraniálního řečiště, a to včetně zobrazení velmi jemných arterií včetně zobrazení a. ophtalmica v optickém kanálu.

Při abdominálním vyšetření v druhé fázi, při portální fázi nasycení, bylo dosaženo dostatečného rozlišení, a to tak, že bylo možné dobře diferencovat

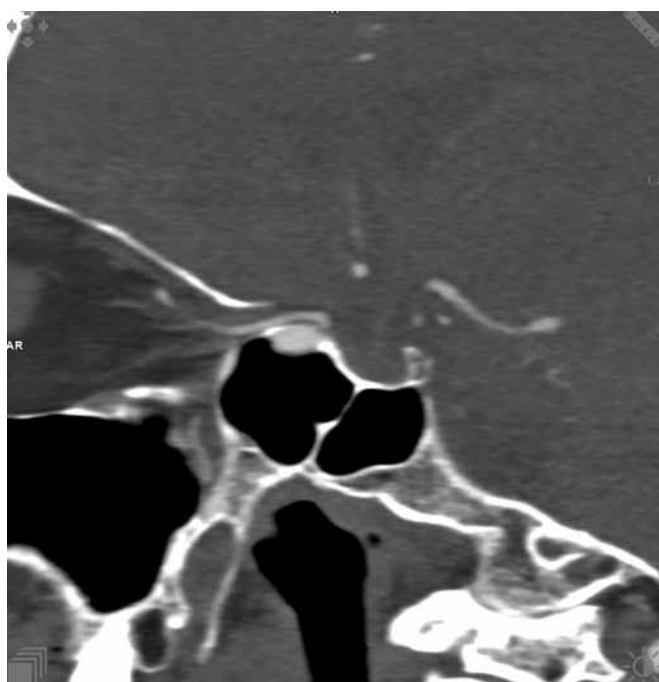
7a



7b



7c



7 Photon-counting-detector CT angiografie krku a hlavy, datová stopa akvizice 0,4 mm, rekonstrukce obrazů v šíři 0,8 mm, increment 0,6 mm, zobrazení a. optalmica v optickém kanálu

Photon-counting-detector CT angiography of cervical and cranial arteries, individual data trace width 0.4 mm, reconstruction of the images with 0.8 mm width and increment 0.6 mm, imaging of the opthalmic artery course inside canalis opticus

v. portae. Současně byla sbírána data se spektrální informací tak, aby bylo možné rekonstruovat virtuální monochromatická zobrazení tkání. U všech takových datových akvizic bylo možné rekonstrukci provést.

Při hodnocení dávkového ekvivalentu bylo dosaženo velice nízkých hodnot u zobrazení plic oběma módy, dále při zobrazení hlavy a krku, včetně

zobrazení kostí spánkových, u břišních vyšetření byla hodnota na úrovni dosažených vyšetření.

DISKUSE

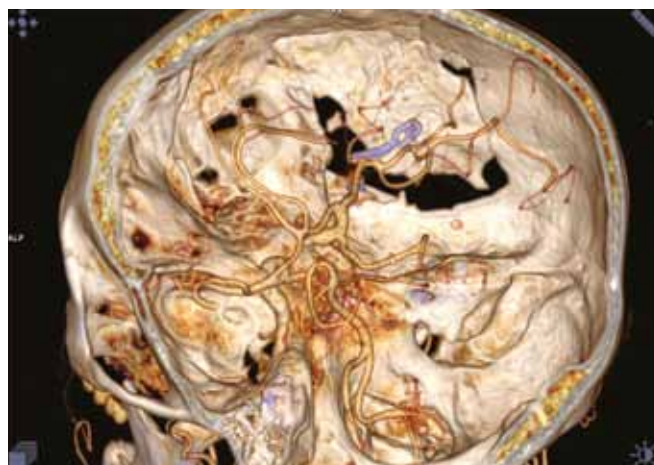
Nový způsob detekce ionizujícího záření při výpočetní tomografii pomocí photon-counting detektoru by měl umožnit

výrazné zvýšení prostorového rozlišení při použití stejné nebo menší dávky záření X, než je tomu u současných CT přístrojů. Nový způsob detekce může významně ovlivnit kvalitu zobrazení a tím kvalitu diagnostického procesu, a to zejména u onemocnění plic a u zobrazení cévního systému, včetně cévního zásobení jednotlivých orgánů. Cílem testování systému je zhodnotit

8a



8b



8c



8d



8e

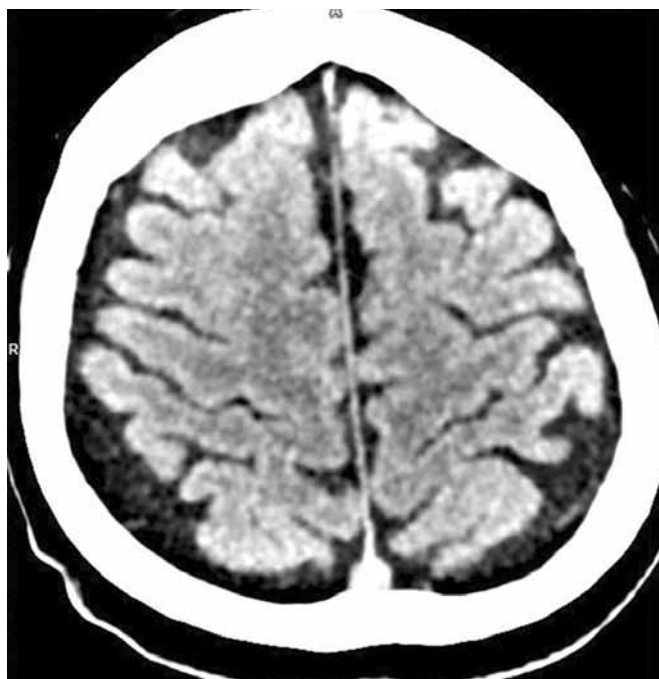


8f



8 Photon-counting-detector CT angiografie krku a hlavy, zobrazení zaklipovaného aneurysmatu a krčních tepen s okluzí odstupu zevní krkavice vpravo, datová stopa akvizice 0,4 mm, rekonstrukce obrazů v šíři 0,8 mm, inkrement 0,6 mm, VRT
 Photon-counting-detector CT angiography of cervical and cranial arteries, individual data trace width 0.4 mm, reconstruction of the images with 0.8 mm width and increment 0.6 mm, imaging of clipped aneurysm and the cervical arteries with the occlusion of the external carotide on the right

9a



9b



9 Photon-counting-detector CT mozku, datová stopa akvizice 0,4 mm, rekonstrukce obrazů v šíři 0,8 mm, inkrement 0,6 mm, zobrazení kortikální šedé hmoty (a) a chronického subdurálního hematomu s odlišnou denzitou vpravo a vlevo (b)
 Photon-counting-detector CT of the brain, individual data trace width 0.4 mm, reconstruction of the images with 0.8 mm width and increment 0.6 mm, imaging of cortical grey matter (a) and bilateral subdural hematoma with different densities on left and right side (b)

efektivitu zobrazení z hlediska rozlišení tkání a z hlediska dávky ionizujícího záření použitého k zobrazení, kdy zatím neexistují systematicky prováděná testování v běžné populaci pacientů. Naše studie je prvním klinickým hodnocením publikovaným v běžném zobrazení pacientů běžně, nikoliv selektivně indikovaných. Potvrzení non-inferiority pomocí základních protokolů ukazuje na další potenciál ve snížení dávky, zejména po uvolnění dalších skenovacích protokolů, a to především s nízkými hodnotami nastavení napětí – 80 nebo 70 kV.

Dosavadní zkušenosti s použitím photon-counting detektoru jsou shrnuty v několika publikacích (1–9). Především jde o publikace, které uvádějí možnou redukci dávky při měření pomocí fantomu a skenování kadaveru. Při vyšetření paranazálních dutin byla zjištěna redukce dávky záření až o 65 %, u vyšetření spánkové kosti s redukcí dokonce až o 85 %, kdy při takovémto snížení je zachováno stejné rozlišení skloubení středoušních kůstek (2). Při rekonstrukci dat je možné vzhledem k lepšímu fyzikálnímu prostorovému rozlišení použít vyšší rekonstrukční matici s použitím 1024 × 1024 bodů namísto 512 × 512 bodů. Tento moment

má význam především při zobrazení plicní tkáně, kdy použitím photon-counting detektoru je zachováno snížení dávky a současně umožněno zachytit vyšší řady průdušek včetně jejich stěny i lumina (4–6). Naše výsledky jsou potvrzující tuto teorii, a to včetně zobrazení klinického u pacientů s intersticiálními a jinými difuzními procesy. Podobný předpoklad zvýšení prostorového rozlišení je i při použití v oblasti abdominálních orgánů po aplikaci jódové kontrastní látky u cévního zásobení ledvin, kdy další dokumentované výhody v zobrazení jsou použití multienergetického zobrazení jódu, které vede v lepší hodnocení prokrvení/nasycení tkání jódovou kontrastní látkou v testech na zvířecím modelu (4, 5), v tomto energetickém vážení leží potenciál redukce dávky jódové kontrastní látky.

Významným přínosem nového způsobu detekce záření X je benefit pro nemocného – snížení expoziční dávky, současně zvýšení prostorového a kontrastního rozlišení. Při vyšetřeních plic oběma způsoby bylo dosaženo velice nízkých hodnot dávkového ekvivalentu, u všech pod úroveň 1 mSv. Zde je také možné vidět další potenciál v použití

dalšího snížení nastavení referenční proudové hodnoty a také, jak již výše uvedeno, snížení na hodnoty napětí 70–80 kV. Největšími výhodami snížení dávky je tedy zobrazení u nemocných s opakovanými vyšetřeními CT, především u vyšetření plicního parenchymu, a dále při detailním zobrazení jemných vysoce kontrastních struktur, jakými jsou spánková kost i ostatní části neurokrania a splanchnokrania (7–11). Výhodami vysokého rozlišení je i zobrazení architektury cévního systému včetně cév zásobujících viscera, jako jsou především ledviny a játra. I zde je možné vidět další potenciál snížení dávkového ekvivalentu na hodnoty pod 1 mSv. Rizika vyplývající z klinické studie byla srovnatelná s provedením běžného CT vyšetření, potvrdili jsme bezpečnost zařízení a zejména možnost bezproblémové akvizice dat.

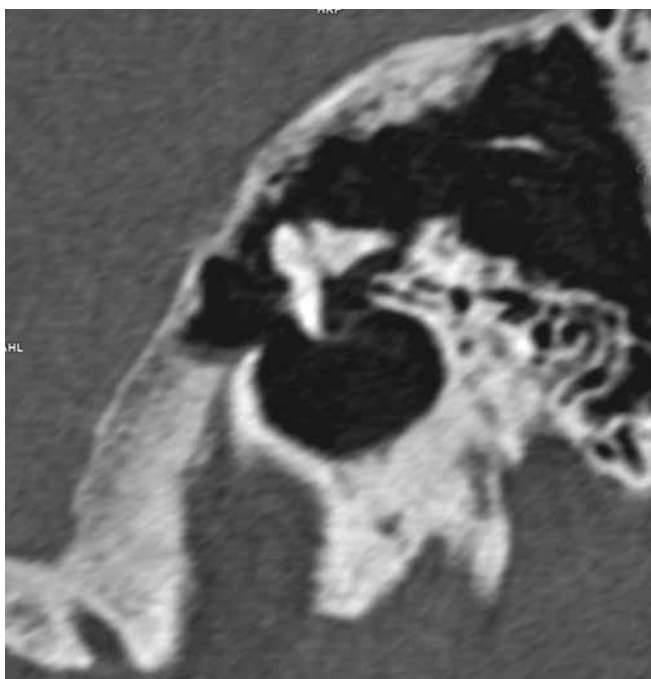
Zobrazení s vysokým prostorovým rozlišením a jeho aplikace v zobrazení tkání

Klíčové pro zobrazení pomocí photon-counting CT je využití účinku zlepšeného rozlišení na hodnocení u zobrazení hrudníku, a to především

10a



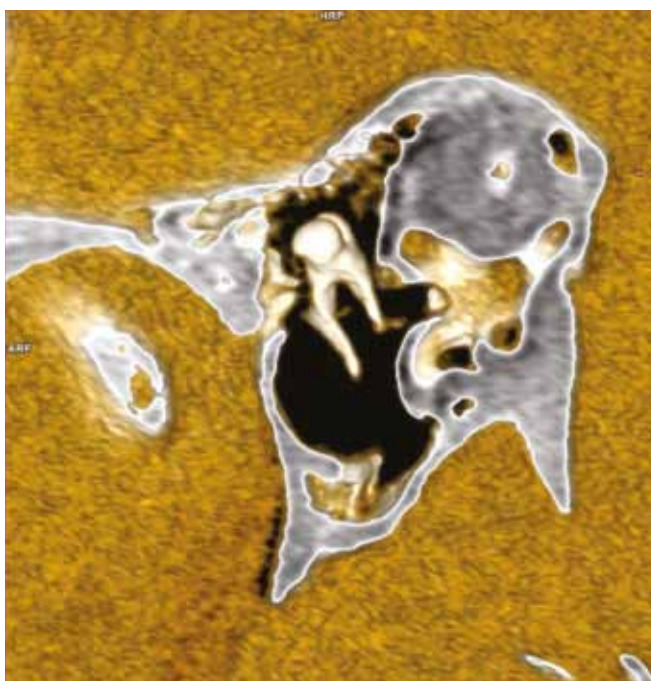
10b



10c



10d



- 10** Ultra-high resolution photon-counting-detector CT kostí spánkové, datová stopa akvizice 0,2 mm, rekonstrukce obrazů v šíři 0,2 mm, inkrement 0,1 mm, řada kůstek se zobrazením třmínku (a), m. stapedius (b), cochlea s bazální membránou rozdělující scalae modioli (c), VRT ukazuje polohu kostí a kloub maleolo-inkální a také třmínek (d)

Ultra-high resolution photon-counting-detector CT of the temporal bone, individual data trace width 0,2 mm, reconstruction of the images with 0,2 mm width and increment 0,1, ossicular chain including stapes (a), m. stapedius (b), cochlea with basilar membrane scalae modioli (c), VRT showing articulation of maleolus-incus, and stapes (d)

u intersticiálních onemocnění plic včetně plicní fibrózy, a dále pak u nemocných s chronickou obstrukční plicní nemocí. Pro tyto účely je typicky prováděno nekontrastní CT vyšetření a diagnostická

kvalita těchto zobrazení může porovnávat s vyšetřeními provedenými standardní technikou v předchozím období vyšetřování pomocí CT. Při zachování shodné radiační dávky je možné

získat zobrazení s násobně vyšší kvalitou prostorového rozlišení a současně s nižší hladinou šumu. Efektu zobrazení zlepšeného prostorového rozlišení se uplatňuje zejména při zobrazení jemných struktur

skeletu – jako jsou kost spánková, báze lebni, ale i skelet zápěstí nebo hlezna při vyšetřování traumat, ale i u vyšetření s implantovanými stenty (12). Naše praktické zkušenosti ukazují na výbornou kvalitu zobrazení struktur v oblasti středního ucha.

Při zobrazení jemných cévních struktur je vliv prostorového rozlišení u CT angiografie s intravenózním podáním jódové kontrastní látky u intraparenchymových tepenných struktur zásadní k odlišení od ostatní tkáně, která se sytí podanou kontrastní látkou. U krčních a intrakraniálních tepen a u periferních končetinových tepen je vysoké rozlišení vhodné i pro odlišení intramurálních změn od lumina tepny. Především umožnění redukce tzv. blooming artefaktu, tedy pseudonárůstu objemu kalcifikované tkáně a vliv redukce tohoto artefaktu na vizibilitu lumina cévy. V našem souboru jde především o posouzení kvality CTA krkavic a mozku, kdy bylo možné diferencovat dobře o. optalmica v optickém kanálu od naléhající kosti, což vyniká při srovnání s vyšetřením provedeným běžnou technikou CT

angiografie v minulosti. Je-li provedena rekonstrukce monoenergetických obrazů s odlišnou hodnotou keV ekvivalentu, je možná subtrakce kalcifikovaných částí plátů a současně zvýšení kontrastu lumina cévního.

Hodnocením ložisek v parenchymových orgánech, zejména v játrech a ledvinách pomocí monoenergetického zobrazení s odlišnými ekvivalenty hodnot keV je možné docílit větší přesnosti k posuzování jejich struktury, hodnotit lépe žilní struktury a k odlišení drobných ložisek. Monoenergetická zobrazení vedou i ke zvýšení kvality kontrastního rozlišení zobrazení u parenchymových orgánů u onkologických nemocných. Posouzení kvality monoenergetických a dále virtuálně non-kontrastních zobrazení orgánů, včetně možného odlišení krve a kontrastní látky, a to včetně intrakraniálního prostoru. Materiálová analýza je v budoucnosti jedním z dalších potenciálů využití, například i s možnostmi využití čtyř energetických košů k odlišení dvou kontrastních látek – s obsahem různých prvků, gadolinia, jódu, eventuálně bismutu (1, 12, 13).

ZÁVĚR

Photon-counting detekce záření X je významným pokrokem v procesu akvizice dat pomocí záření X. Zvýšení efektivity využití energie interakce jeho kvanta s materiálem detektoru dovoluje významně snížit nutný počet kvant pro získání obrazu, tedy může mít zásadní vliv na snížení dávkového ekvivalentu z vyšetření. Na druhou stranu je možné využít stejné množství záření k vyšší kvalitě zobrazení při zachování současné hladiny radiační dávky. Vysoké kontrastní a prostorové rozlišení může mít podstatný vliv na kvalitu zobrazování některých jemných kritických struktur při posuzování změn v plicní tkáni nebo kosti skalní, ale také při zobrazování cévního systému včetně submilimetrových struktur, jakými jsou jemné intrarenální tepny nebo tepny v oblasti hlavy a krku. Naše zkušenosti potvrzují v praxi teoretické předpoklady, včetně použití CT s photon-counting detektorem u reálných klinických vyšetření nemocných s patologiemi plicní tkáně a cévního systému. ●

LITERATURA

1. Flohr T, Ulzheimer S, Petersilka M, Schmidt B. Basic principles and clinical potential of photon-counting detector CT. Chinese Journal of Academic Radiology, published on-line 02. March 2020. doi.org/10.1007/s42058-020-00029-z
2. Rajendran K, Voss BA, Zhou W, Tao S, DeLone DR, Lane JI, Weaver JM, Carlson ML, Fletcher JG, McCollough CH, Leng S. Dose Reduction for Sinus and Temporal Bone Imaging Using Photon-Counting Detector CT With an Additional Tin Filter. Invest Radiol 2019 Nov 25. doi: 10.1097/RLI.0000000000000614 [Epub ahead of print]. PubMed PMID: 31770297
3. Ren L, Rajendran K, McCollough CH, Yu L. Radiation dose efficiency of multi-energy photon-counting-detector CT for dual-contrast imaging. Phys Med Biol 2019; 64(24): 245003. doi: 10.1088/1361-6560/ab55bf
4. Zhou W, Michalak G, Weaver J, Ferrero A, Gong H, Fetterly KA, McCollough CH, Leng S. Determination of iodine detectability in different types of multiple-energy images for a photon-counting detector computed tomography system. J Med Imaging (Bellingham) 2019; 6(4): 043501. doi: 10.1117/1.JMI.6.4.043501 [Epub 2019 Oct 15].
5. Tao S, Rajendran K, McCollough CH, Leng S. Feasibility of multi-contrast imaging on dual-source photon counting detector (PCD) CT: An initial phantom study. Med Phys 2019; 46(9): 4105–4115. doi: 10.1002/mp.13668 [Epub 2019 Jul 5]. PubMed PMID: 31215659; PubMed Central PMCID: PMC6857531.
6. Leng S, Bruesewitz M, Tao S, Rajendran K, Halaweish AF, Campeau NG, Fletcher JG, McCollough CH. Photon-counting Detector CT: System Design and Clinical Applications of an Emerging Technology. Radiographics 2019; 39(3): 729–743.
7. Zhou W, Bartlett DJ, Diehn FE, Glazebrook KN, Kotsenas AL, Carter RE, Fletcher JG, McCollough CH, Leng S. Reduction of Metal Artifacts and Improvement in Dose Efficiency Using Photon-Counting Detector Computed Tomography and Tin Filtration. Invest Radiol 2019; 54(4): 204–211.
8. Bartlett DJ, Koo CW, Bartholmai BJ, Rajendran K, Weaver JM, Halaweish AF, Leng S, McCollough CH, Fletcher JG. High-Resolution Chest Computed Tomography Imaging of the Lungs: Impact of 1024 Matrix Reconstruction and Photon-Counting Detector Computed Tomography. Invest Radiol 2019; 54(3): 129–137.
9. Rajendran K, Tao S, Abdurakhimova D, Leng S, McCollough C. Ultra-High Resolution Photon-Counting Detector CT Reconstruction using Spectral Prior Image Constrained Compressed-Sensing (UHR-SPICCS). Proc SPIE Int Soc Opt Eng 2018; 10573. pii: 1057318. doi: 10.1117/12.2294628
10. von Spiczak J, Mannil M, Peters B, Hickethier T, Baer M, Henning A, Schmidt B, Flohr T, Manka R, Maintz D, Alkadhi H. Photon Counting Computed Tomography With Dedicated Sharp Convolution Kernels: Tapping the Potential of a New Technology for Stent Imaging. Invest Radiol 2018; 53(8): 486–494.
11. Zinsser D, Marcus R, Othman AE, Bamberg F, Nikolaou K, Flohr T, Notohamiprodjo M. Dose Reduction and Dose Management in Computed Tomography – State of the Art. Rofo 2018; 190(6): 531–541.
12. Fleischmann U, Pietsch H, Korpelaar JG, Flohr TG, Uder M, Jost G, Lell MM. Impact of Contrast Media Concentration on Low-Kilovolt Computed Tomography Angiography: A Systematic Preclinical Approach. Invest Radiol 2018; 53(5): 264–270.
13. Mannil M, Hickethier T, von Spiczak J, Baer M, Henning A, Hertel M, Schmidt B, Flohr T, Maintz D, Alkadhi H. Photon-Counting CT: High-Resolution Imaging of Coronary Stents. Invest Radiol 2018; 53(3): 143–149.
14. Gutjahr R, Polster C, Henning A, Kappler S, Leng S, McCollough CH, Sedlmair MU, Schmidt B, Krauss B, Flohr TG. Dual Energy CT Kidney Stone Differentiation in Photon Counting Computed Tomography. Proc SPIE Int Soc Opt Eng 2017; 10132. pii: 1013237. doi: 10.1117/12.2252021