

REDUKCE DÁVKY IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ NA OČNÍ ČOČKU U MDCT MOZKU S VYUŽITÍM VÝPOČETNÍHO ALGORITMU ITERATIVNÍ REKONSTRUKCE IRIS – PRVNÍ VÝSLEDKY

RADIATION DOSE REDUCTION TO THE EYE LENS IN CEREBRAL MDCT USING ITERATIVE RECONSTRUCTION ALGORITHM IRIS – FIRST RESULTS

původní práce

Jiří Jandura
Jan Žížka
Tomáš Kvasnička
Jan Grepl
Ludovít Klzo

Radiologická klinika FN a LF UK,
Hradec Králové

Přijato: 17. 11. 2012.

Korespondenční adresa:

MUDr. Jiří Jandura
Radiologická klinika FN a LF UK
Sokolská 581,
500 05 Hradec Králové 5
e-mail: jandura@seznam.cz

Konflikt zájmů: Autoři neuvádějí žádný konflikt zájmů.

SOUHRN

Jandura J, Žížka J, Kvasnička T, Grepl J, Klzo L. Redukce dávky ionizujícího záření na oční čočku u MDCT mozku s využitím výpočetního algoritmu iterativní rekonstrukce IRIS – první výsledky

Cíl. Srovnání efektivní dávky a orgánové dávky na oční čočku při vyšetření mozku multidetektorovým CT přístrojem (MDCT) s nastavenou automatickou modulací proudu, provedené výpočetním algoritmem iterativní rekonstrukce v obrazovém prostoru (IRIS) a algoritmem filtrované zpětné projekce (FBP).

Metoda. Z celkem 80 neakutních MDCT mozku s nastavením automatické proudové modulace bylo 40 provedeno protokolem založeným na IRIS a 40 dalších protokolem s FBP. Všechna vyšetření byla realizována na MDCT přístroji SOMATOM Definition AS+ (Siemens Healthcare, Forchheim, Německo).

Efektivní dávka byla vypočtena z CT dávkového indexu (CTDI_{vol}) a dose length product (DLP) v prostředí softwaru ImPACT. Orgánové dávky na oční čočku byly vypočteny z hodnot mAs aplikovaných v úrovni oční čočky. Obrazová a diagnostická kvalita rekonstruovaných obrazů byla subjektivně hodnocena dvěma zkušenými atestovanými radiology v zaslepeném porovnání. Bylo také provedeno kvantitativní statistické hodnocení úrovně obrazového šumu.

Výsledky. U IRIS byla průměrná efektivní dávka na oční čočku $1,04 \pm 0,21$ mSv, u FBP $1,53 \pm 0,29$ mSv, což představuje snížení

SUMMARY

Jandura J, Žížka J, Kvasnička T, Grepl J, Klzo L. Radiation dose reduction to the eye lens in cerebral MDCT using iterative reconstruction algorithm IRIS – first results

Aim. To compare effective and organ radiation dose to the eye lens in multidetector CT (MDCT) examinations of the brain, utilizing either iterative reconstruction in image space (IRIS) or filtered back projection (FBP) algorithm.

Method. Of 80 non-acute brain MDCT examinations, 40 were performed with IRIS reconstruction algorithm and other 40 with FBP algorithm. All examinations were performed on MDCT system SOMATOM Definition AS+ (Siemens Healthcare, Forchheim, Germany).

Calculation of the effective dose was done by ImPACT software (Impact, London) using CT dose index (CTDI_{vol}) and dose length product (DLP) values. Organ dose to the eye lens was calculated from mAs value applied to the slices containing the lens. Diagnostic image quality of reconstructed data was evaluated by two experienced radiologists in a blinded fashion.

Results. For IRIS, the average effective dose to the eye lens was 1.04 ± 0.21 mSv and for FBP 1.53 ± 0.29 mSv, with a reduction of approximately of 32%. The average organ dose for IRIS was 26.9 ± 1.9 mGy and 40.2 ± 3.2 mGy for FBP, with a dose reduction of 33.1%. A comparison of image quality showed no statistically significant difference

o přibližně 32 % ve prospěch IRIS. Průměrná orgánová dávka byla u IRIS $26,9 \pm 1,9$ mGy a u FBP $40,2 \pm 3,2$ mGy, což představuje redukci o 33,1 %. Při subjektivním porovnání vjemu kvality obrazu nebyl zjištěn významný rozdíl ($p = 0,21$). V rámci kvantitativního hodnocení úrovně šumu bylo zaznamenáno malé, ale již statisticky významné zvýšení na obrazech rekonstruovaných algoritmem IRIS ($p < 0,01$).

Závěr. Použití výpočetního algoritmu IRIS při MDCT vyšetření mozku umožňuje redukovat efektivní a orgánovou dávku zachycenou oční čočkou až přibližně o jednu třetinu při diagnosticky nevýznamném rozdílu v kvalitě zobrazení v porovnání s algoritmem FBP.

Klíčová slova: multidetektorová výpočetní tomografie, zpracování obrazu, oční čočka, katarakta.

($p = 0.21$). Quantitative analysis of image noise revealed slightly increased noise levels in the IRIS group, the difference was statistically significant ($p < 0.01$).

Conclusion. IRIS reconstruction algorithm in cerebral MDCT examinations can reduce the effective and eye lens organ dose approximately by one third, without significant deterioration of image quality compared to FBP reconstruction algorithm FBP.

Key words: multidetector computed tomography, image processing, eye lens, cataract.

ÚVOD

Celosvětově narůstá počet vyšetření zobrazovacími metodami, s rukou v ruce jdoucím zvyšováním radiační zátěže populace. V USA mezi lety 1980–2006 hodnoty dávek ozáření na osobu z medicínských důvodů vykázaly sedminásobný nárůst (1). Objem CT vyšetření v USA činí asi 15 % z celého počtu radiologických vyšetření, avšak představuje podíl přibližně 2/3 z celkové kumulativní dávky ze všech radiologických vyšetření (2).

Jednou z možností jak snížit radiační zátěž při CT vyšetřeních je užití výpočetního algoritmu iterativní rekonstrukce obrazu (IR). Tato metoda byla vyzkoušena již u první generace CT skenerů, avšak pro velmi dlouhý čas nutný k výpočtu a rekonstrukci obrazu tehdy nedosáhla praktického uplatnění. Mnohem kratší výpočetní dobu nabízel algoritmus filtrované zpětné projekce, avšak za cenu vyšší radiační dávky. Využití našel algoritmus IR v oblasti emisních tomografických metod, například u PET, SPECT (3).

Při hledání cest jak snížit radiační zátěž a současně enormnímu nárůstu výpočetního výkonu hardwaru, došlo v posledních 10 letech k renesanci IR, jejíž předností je schopnost výrazným způsobem redukovat podíl šumu v obrazu anebo snížit radiační expozici až o desítky procent se zachováním kvality obrazu srovnatelné s FBP (4, 5).

Cílem této práce je porovnání možnosti redukce efektivní a orgánové dávky na oční čočky při vyšetření na multidetektorovém CT přístroji (MDCT) pomocí algoritmu iterativní rekonstrukce v obrazovém prostoru (IRIS) oproti standardní filtrované zpětné projekci se zachováním srovnatelné diagnostické kvality obrazu.

METODY

Bylo provedeno 80 neakutních MDCT vyšetření mozku. Z toho 40 výpočetním algoritmem IRIS a 40 s použitím algoritmu FBP. Vyšetření byla realizována na MDCT přístroji Somatom Definition AS+ (Siemens Healthcare, Forchheim, Německo). V obou skupinách IRIS i FBP byl MDCT přístroj nastaven na napětí rentgenky 120 kV, kolimaci $2 \times 64 \times 0,6$ mm, pitch faktor 0,55, doba otáčky gantry 1 s. U FBP byla použita referenční hodnota proudu 300 mAs, u IRIS 200 mAs. Gantry MDCT nebylo sklápěno.

Helikální technikou byly získány axiální skeny v rozsahu od okcipitálních kondylů po vertex. Diagnostická kvalita obrazu a úroveň šumu byly hodnoceny na 5 mm silných axiálních vrstvách, s rekonstrukčním kernelem J30s u IRIS, respektive H31s u FBP (obr. 1A,B). U všech vyšetření byla zapnuta automatická 4D proudová modulace (CareDose4D, Siemens). Efektivní radiační dávka byla vypočtena ze zaznamenaných hodnot CTDI_{vol} (mGy) a DLP (mGy.cm) s využitím software ImPACT (Impact, Londýn). Orgánové dávky v oční čočce byly vypočteny z přístrojem použitých hodnot mAs uvedených na 1 mm silných vrstvách vedených v úrovni oční čočky (obr. 2A,B).

Kvantitativní měření míry šumu v obrazu bylo provedeno odečtením hodnoty standardní odchylky v kruhovém poli o velikosti $1,5 \text{ cm}^2$, umístěném do bílé hmoty ve frontální oblasti centrum semiovale, se snahou vyhnout se lokálním nehomogenitám (obr. 3A,B). Kvalitativní hodnocení rekonstruovaných obrazů bylo nezávisle provedeno dvěma atestovanými radiology se sedmnáctiletou a desetiletou praxí. Typ rekonstrukce byl pro hodnotitele zaslepen. Pro subjektivní posouzení kvality a míry šumu byla použita škála s hodno-



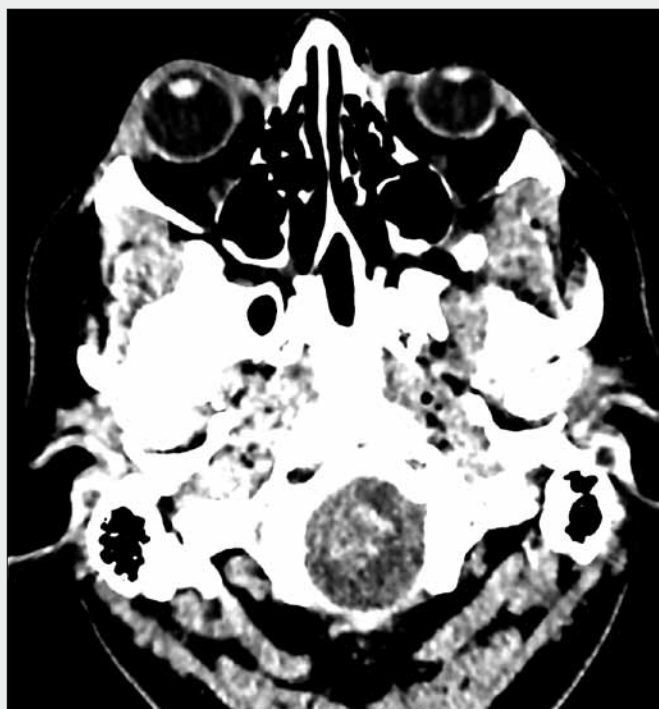
▲ Obr. 1A



▲ Obr. 1B

Obr. 1A. MDCT mozku s použitím algoritmu IRIS (kernel J30s), axiální 5mm sken, úroveň bazálních ganglií
 Fig. 1A. MDCT of brain utilising algorithm IRIS (kernel J30s), axial 5mm scan, level of basal ganglia

Obr. 1B. MDCT mozku s použitím algoritmu FBP (kernel H31s), axiální 5mm sken, úroveň bazálních ganglií
 Fig. 1B. MDCT of brain utilising algorithm FBP (kernel H31s), axial 5mm scan, level of basal ganglia



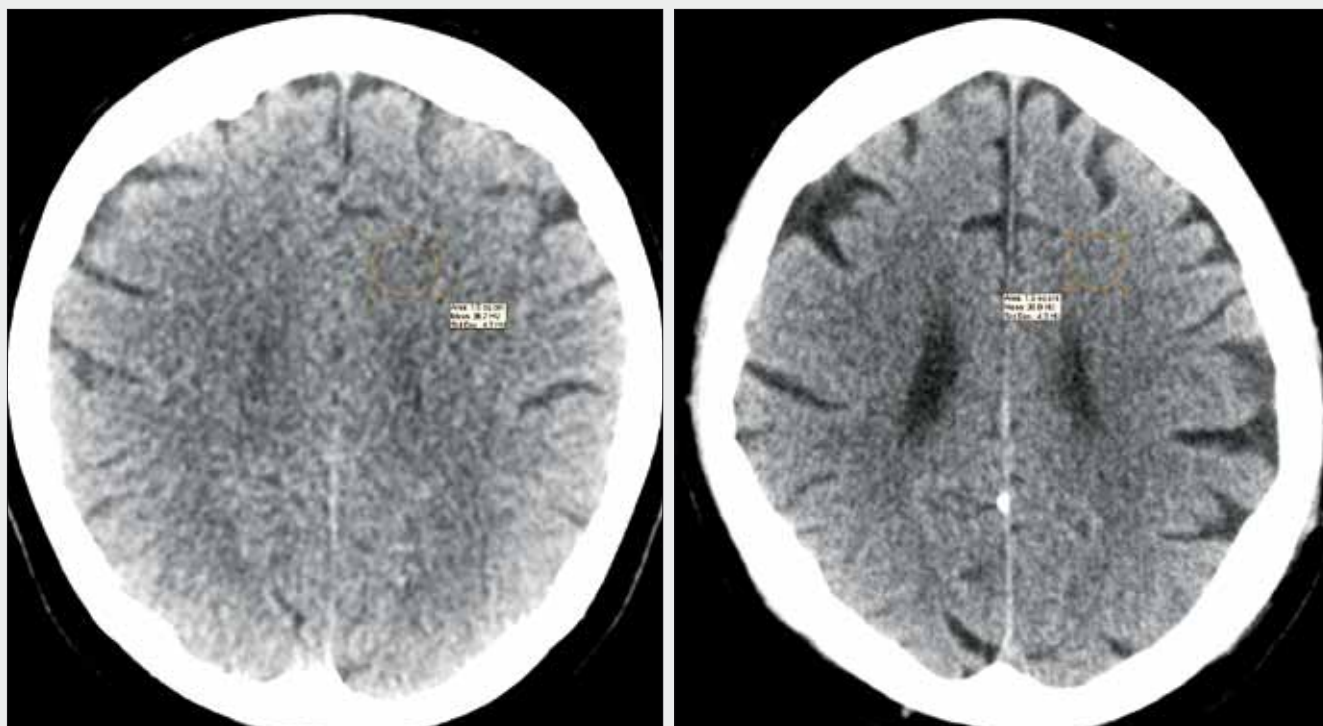
▲ Obr. 2A



▲ Obr. 2B

Obr. 2A. MDCT mozku s algoritmem IRIS (kernel J30s), axiální 1mm sken, úroveň oční čočky. Aktuální hodnota mAs v úrovni oční čočky, použitá pro výpočet orgánové dávky, je 108 mAs.
 Fig. 2A. MDCT of brain, algorithm IRIS (kernel J30s), axial 1mm scan. The actual current time product at the level of the eye lens, used for organ dose calculation, is 108 mAs.

Obr. 2B. MDCT mozku s algoritmem FBP (kernel H21s), axiální 1mm sken, úroveň oční čočky. Aktuální hodnota mAs v úrovni oční čočky, použitá pro výpočet orgánové dávky, je 177 mAs.
 Fig. 2B. MDCT of brain, algorithm FBP (kernel H21s), axial 1mm scan. The actual current time product at the level of the eye lens, used for organ dose calculation, is 177 mAs.



▲ Obr. 3A

▲ Obr. 3B

Obr. 3A. MDCT mozku s použitím algoritmu IRIS (kernel J30s), axiální 5mm sken, úroveň centrum semiovale; k měření standardní odchylky jako korelátu hodnot úrovně šumu, v poli 1,5 cm² bílé hmoty centrum semiovale frontálně (se snahou vyhnout se lokálním nehomogenitám)

Fig. 3A. MDCT of brain utilising algorithm IRIS (kernel J30s), axial 5mm scan, level of centrum semiovale; to measure the image noise as a standard deviation of attenuation values, a 1.5 cm² circular region of interest was placed into the homogeneously appearing white matter at the frontal centrum semiovale (avoiding focal white matter abnormalities when possible)

Obr. 3B. MDCT mozku s použitím algoritmu FBP (kernel H31s), axiální 5mm sken, úroveň centrum semiovale; k měření standardní odchylky jako korelátu hodnot úrovně šumu, v poli 1,5 cm² bílé hmoty v centrum semiovale frontálně (se snahou vyhnout se lokálním nehomogenitám)

Fig. 3B. MDCT of brain utilising algorithm FBP (kernel H31s), axial 5mm scan, level of centrum semiovale; to measure the image noise as a standard deviation of attenuation values, a 1.5 cm² circular region of interest was placed into the homogeneously appearing white matter at the frontal centrum semiovale (avoiding focal white matter abnormalities when possible)

tami 1–5. Hodnota 1 – optimální diagnostická kvalita, velmi nízká úroveň šumu, 2 – dobrá diagnostická kvalita, standardní hodnota šumu, 3 – diagnostické zobrazení, zvýšená úroveň šumu, 4 – limitovaná diagnostická kvalita, vysoká úroveň šumu, 5 – nediatnostické zobrazení, neakceptovatelná úroveň šumu.

Pro statistické porovnání popisných parametrů a technik obrazové rekonstrukce bylo použito t-testu nebo neparametrických testů (Kolmogorov-Smirnov). Kvantitativně hodnotitelné údaje položky byly hodnoceny jako průměr ± směrodatná odchylka pro normálně distribuované proměnné hodnoty, nebo jako medián s 95% intervalem spolehlivosti (CI) pro nenormálně distribuované proměnné. Kvalitativní parametry byly porovnány pomocí Fisherova exaktního testu. Interindividuální stupeň shody při subjektivním hodnocení kvality více radiology byl považován za významný při kappa > 0,75. Statistická analýza byla provedena pomocí programu NCSS 2007 (NCSS, Kaysville, Utah, USA) s p hodnotami < 0,05 považovanými za statisticky významné. Institucionální etická komise nevyžadovala individuální informovaný souhlas pacienta k provedení této studie.

VÝSLEDKY

Při srovnání dávek ionizujícího záření na oční čočku bylo u protokolu založeného na IRIS dosaženo statisticky významné redukce dávky ($p < 0,001$) oproti protokolu FBP. U FBP byla průměrná efektivní dávka $1,53 \pm 0,29$ mSv; u IRIS $1,04 \pm 0,21$ mSv, což představuje redukci o přibližně 32,0%. Průměrná orgánová dávka na oční čočku klesla z $40,2 \pm 3,2$ mGy u FBP na $26,9 \pm 1,9$ mGy u IRIS. Pokles o přibližně 33,1%.

Při subjektivním porovnání vjemu kvality obrazu nebyl zjištěn významný rozdíl ($p = 0,21$). Průměrná známka kvality byla u FBP 2,14 a medián 2, u IRIS průměrná známka kvality 2,18 a medián 2. Naprostá většina skenů obdržela známku 2, tzn. dobrá diagnostická kvalita obrazu a standardní hodnota šumu, u FBP 85% u IRIS 82%. Kappa test spolehlivosti ukázal dobrou shodu mezi pozorovateli při kappa = 0,77.

Při kvantitativním porovnání získaných obrazů byl shledán mírný nárůst úrovně šumu na obrazech rekonstruovaných algoritmem IRIS. U FBP byla střední hodnota úrovně šumu 3,9 (95% CI 3,9–4,0), kdežto u IRIS 4,2 (95% CI 4,1–4,2). Jde již o statisticky významný rozdíl ($p < 0,01$).

DISKUSE

Během několika posledních desetiletí, v kontextu celkového pokroku ve výpočetních technologiích, došlo také k významnému rozvoji medicínských zobrazovacích metod. Tento fakt však má také stinnou stránku v podobě nárůstu radiační zátěže obyvatelstva, která jde zejména na vrub progresivně rostoucímu množství CT vyšetření. V celosvětovém měřítku je ročně provedeno přibližně 3,1 miliardy vyšetření na radiologických pracovištích, 0,5 miliardy dentálních rentgenových vyšetření a asi 40 milionů obyvatel podstoupí ozáření na pracovištích nukleární medicíny. Za rok v celosvětovém měřítku připadá na jednoho člověka díky lékařskému ozáření efektivní dávka ionizujícího záření asi 0,6 mSv, přičemž během posledních 10–15 let došlo ke zdvojnásobení této hodnoty (1).

Dostupnost a standardy zdravotnické péče tak v ekonomicky vyspělých zemích paradoxně přispívají k rostoucímu trendu zatížení obyvatelstva ionizujícím zářením. V USA během jedné generace došlo k nárůstu efektivní dávky z medicínských důvodů o 600 %. V roce 2006 v USA již bylo dosaženo hodnoty 3,0 mSv na jednoho obyvatele a byla překročena průměrná dávka z přírodního pozadí na jednoho obyvatele za rok, která činí 2,4 mSv (6). Mezi léty 1995–2007 došlo v USA k nárůstu provedených CT vyšetření ze 2,7 na 16,2 milionu za rok, což představuje exponenciální meziroční 16% nárůst (7).

CT jako jedna z nejdůležitějších zobrazovacích modalit má v hospodářsky rozvinutých zemích největší podíl na kolektivní zátěži obyvatelstva ionizujícím zářením. V USA z celkového objemu efektivní dávky na osobu za rok při medicínském ozáření (3,01 mSv) připadá na CT vyšetření přibližně polovina (1,47 mSv) (1, 6). Údaje z jiných rozvinutých zemí ukazují, že podíl CT vyšetření (0,87 mSv) představuje asi 44 % efektivní dávky ze všech medicínských postupů (2,0 mSv na osobu za rok) (8).

Vzhledem ke stále narůstajícímu počtu CT vyšetření a s radiační zátěží spojenými zdravotními riziky je tedy nezbytně nutné pamatovat a v praxi důsledně uplatňovat zásadu radiační ochrany ALARA (as low as reasonably achievable).

Výrobci se snaží zavádět různá opatření snižující dávky ionizujícího záření. Nejsnadnější možností jak redukovat dávku je snížení proudu – a pokud je to možné, tak snížení hodnot napětí. Do MDCT technologií relativně nedávno znovu zavedená technika iterativní rekonstrukce obrazu umožňuje buď signifikantně snížit úroveň šumu v obrazu, při použití dávky ionizujícího záření obdobné jako u FBP. Nebo s redukovanou dávkou, až v řádu desítek procent, dosáhnout kvality obrazu srovnatelné s rekonstrukcí FBP. Od roku 2009 se v literatuře objevují studie potvrzující tyto možnosti IR při MDCT vyšetření břicha, hrudníku, kardiovaskulárního aparátu a mozku (4, 5, 9–19).

CT zobrazení hlavy patří k nejčastěji indikovaným CT vyšetřením. V USA tak představuje druhou nejčastější indikaci CT vyšetření s podílem 28,4 % z celkového počtu CT. Překonáno je pouze CT vyšetření břicha, které tvoří 31,7 % všech CT (1, 6). Je tedy poněkud překvapující, že mnohem méně je v literatuře věnována pozornost redukci dávky u CT hlavy spíše než CT vyšetření těla, bez přihlídnutí ke značné radiosenzitivitě oční čočky.

Studie zaměřené na zobrazení mozku (17, 18) se zabývaly porovnáním FBP a adaptivní statistické iterativní rekonstrukce (ASIR). ASIR však není čistě IR technika, protože využívá FBP pro výpočet vstupní sady dat ve snaze zrychlit průběh rekonstrukčních operací. Následně provedená IR je využita především k redukci šumu. Do určité míry je možné nastavit, jak velká část rekonstrukčního procesu má být provedena ASIR.

Práci zabývající se využitím IRIS v oblasti hlavy publikovali Korn et al. (19). Autoři uvádějí, že v souboru náhodně vybraných 90 pacientů, kteří podstoupili spirální MDCT mozku s rekonstrukcí obrazu FBP a IRIS mohou být dosaženy obvyklé hodnoty poměru kontrast/šum při 20% redukci dávky při použití algoritmu IRIS.

Žádná z výše zmíněných tří studií nepoužila simultánně další metody jak snížit radiační dávku. V našem případě byla u obou skupin využita funkce automatické modulace proudu MDCT přístrojem. Rovněž žádná z uvedených studií nebyla primárně cílena na měření dávky zasahující oční čočku, která je nejvíce radiosenzitivním orgánem, s rizikem vzniku katarakty. Mezinárodní komise pro radiační ochranu (IRCP) v roce 2011 vydala na podkladě recentních epidemiologických studií doporučení ke snížení prahu absorbované dávky v oční čočce ze 2,0 Gy na 0,5 Gy ve snaze redukovat riziko radiací indukované katarakty (20).

Při CT vyšetření mozku sekvenční akviziční technikou je obvykle možné sklopení gantry CT přístroje tak, aby rovina vrstev byla paralelní s tzv. orbitomeatální linií, tedy oční čočka by tak měla být mimo primární svazek záření. U helikální techniky však nebývá vždy dostatečné sklopení gantry do orbitomeatální linie proveditelné.

Naše práce kombinuje použití dvou dávkou redukcí systémů, IRIS a automatickou modulaci proudu. Na MDCT přístroji rutinně využíváme standardizované protokoly s redukovánými hodnotami referenčních mAs, společně s automatickou proudovou modulací ve snaze naplnit principy ALARA, při zachování diagnosticky dostačující kvality obrazového výstupu. Dosažená redukce efektivní a orgánové dávky je při spodní hranici v literatuře publikovaných hodnot (17–19).

Celkový percepční vjem a informační hodnota vyšetření se nám při subjektivním srovnání u FBP s IRIS jeví prakticky srovnatelná. V souboru nebyl zaznamenán případ, kdy by bylo vyšetření nehodnotitelné či výrazně limitované. Nebyl shledán statisticky významný rozdíl při interindividuálním vyhodnocení obrazu dvěma atestovanými radiology. Malý, avšak statisticky již významný rozdíl byl zaznamenán při hodnocení poměru signálu k šumu, a to v neprospěch IRIS.

ZÁVĚR

Použití algoritmu iterativní rekonstrukce umožňuje signifikantně redukovat orgánovou i efektivní dávku ionizujícího záření při srovnatelné kvalitě obrazu v porovnání se standardním algoritmem filtrované zpětné projekce. Jde o jednu z perspektivních možností jak zvrátit nepříznivý trend zvyšování radiační zátěže populace při medicínském ozáření CT přístroji.

LITERATURA

1. **Mettler FA Jr, Bhargavan M, Faulkner K, et al.** Radiologic and nuclear medicine studies in the United States and worldwide: frequency, radiation dose, and comparison with other radiation sources 1950–2007. *Radiology* 2009; 253(2): 520–531.
2. **Kalra MK, Maher MM, Toth TL, et al.** Strategies for CT radiation dose optimization. *Radiology* 2004; 230(3): 619–628.
3. **Rockmore AJ, Macovski A.** A maximum likelihood approach to emission image reconstruction from projections. *IEEE Trans Nucl Sci* 1976; 23(4): 1428–1432.
4. **Leipsic J, Labounty T, Heilbron B, et al.** Estimated radiation dose reduction using adaptive statistical iterative reconstruction in coronary CT angiography: the ERASIR study. *Am J Roentgenol* 2010; 195(3): 655–660.
5. **Pontana F, Pagniez J, Flohr T, et al.** Chest computed tomography using iterative reconstruction vs filtered back projection (Part 1): evaluation of image noise reduction in 32 patients. *Eur Radiol* 2011; 21(3): 636–643.
6. **Schauer DA, Linton OW.** NCRP report no. 160, ionizing radiation exposure of the population of the United States, medical exposure: are we doing less with more, and is there a role for health physicists? *Health Phys* 2009; 97(1): 1–5.
7. **Larson DB, Johnson LW, Schnell BM, Salisbury SR, Forman HP.** National trends in CT use in the emergency department: 1995–2007. *Radiology* 2011; 258(1): 164–173.
8. **United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation.** Medical radiation exposures, annex A. United Nations, New York. http://www.unscear.org/docs/reports/2008/09-86753_Report_2008_Annex_A.pdf
9. **Prakash P, Kalra MK, Ackman JB, et al.** Diffuse lung disease: CT of the chest with adaptive statistical iterative reconstruction technique. *Radiology* 2010; 256(1): 261–269.
10. **Leipsic J, LaBounty TM, Heilbron B, et al.** Adaptive statistical iterative reconstruction: assessment of image noise and image quality in coronary CT angiography. *AJR Am J Roentgenol* 2010; 195(3): 649–654.
11. **Sagara Y, Hara AK, Pavlicek W, Silva AC, Paden RG, Wu Q.** Abdominal CT: comparison of lowdose CT with adaptive statistical iterative reconstruction and routine-dose CT with filtered back projection in 53 patients. *AJR Am J Roentgenol* 2010; 195(3): 713–719.
12. **Flicek KT, Hara AK, Silva AC, et al.** Reducing the radiation dose for CT colonography using adaptive statistical iterative reconstruction: a pilot study. *AJR Am J Roentgenol* 2010; 195(1): 126–131.
13. **Mitsumori LM, Shuman WP, Busey JM, Kolokythas O, Koproicz KM.** Adaptive statistical iterative reconstruction versus filtered back projection in the same patient: 64 channel liver CT image quality and patient radiation dose. *Eur Radiol* 2012; 22(1): 138–143.
14. **Leipsic J, Nguyen G, Brown J, Sin D, Mayo JR.** A prospective evaluation of dose reduction and image quality in chest CT using adaptive statistical iterative reconstruction. *AJR Am J Roentgenol* 2010; 195(5): 1095–1099.
15. **Singh S, Kalra MK, Gilman MD, et al.** Adaptive statistical iterative reconstruction technique for radiation dose reduction in chest CT: a pilot study. *Radiology* 2011; 259(2): 565–573.
16. **Cornfeld D, Israel G, Detroy E, Bokhari J, Mojibian H.** Impact of adaptive statistical iterative reconstruction (ASIR) on radiation dose and image quality in aortic dissection studies: a qualitative and quantitative analysis. *AJR Am J Roentgenol* 2011; 196(3): W336–W340.
17. **Kilic K, Erbas G, Guryildirim M, et al.** Lowering the dose in head CT using adaptive statistical iterative reconstruction. *AJNR Am J Neuroradiol* 2011; 32(9): 1578–1582.
18. **Rapalino O, Kamalian S, Kamalian S, et al.** Cranial CT with adaptive statistical iterative reconstruction: improved image quality with concomitant radiation dose reduction. *AJNR Am J Neuroradiol* 2012; 33(4): 609–615.
19. **Korn A, Fenchel M, Bender B, et al.** Iterative reconstruction in head CT: image quality of routine and low-dose protocols in comparison with standard filtered back-projection. *AJNR Am J Neuroradiol* 2012; 33(2): 218–224.
20. **International Commission on Radiological Protection.** Statement on tissue reactions. International Commission on Radiological Protection, ref 4825-3093-1464, Seoul. <https://rpop.iaea.org/RPOP/RPOP/Content/Documents/Whitepapers/ICRP-statements-tissue-reactions.pdf>.