TIBBIY DIAGNOSTIKADA FOTON-SANOVCHI KT DAN FOYDALANISHNING ZAMONAVIY YO'NALISHLARI

[1]*Ro'zmetova M.R,*
[2]*Jumanazarov D.*
[1]*Ma'mun Universiteti NTM*
[2]*Abu Rayxon Beruniy nomidagi Urganch Davlat Universiteti*
e-mail: mahfuza.r@mamunedu.uz

Annotatsiya. *Ushbu maqolada rentgen foton-sanovchi kompyuter tomografiyasi (FSKT) tizimlarida kuzatiladigan detektor spektral buzilishlarining tasvir sifatiga ta'siri va ularni korreksiyalash usullari o'rganildi. Spektral buzilishlar – piksel darajasidagi energiya siljishi, puls yig'ilishi (pulse pile-up) va chiziqsiz javob kabi omillardan kelib chiqib, materiallarni to'g'ri tasniflash jarayonida xatolarga sabab bo'ladi. Tadqiqotda energiya bo'yicha kalibrlash, fizik modellashtirish va rekonstruksiya algoritmlariga asoslangan korreksiya yondashuvlari tahlil qilindi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, spektral buzilishlarni tuzatish tasvirning energiya bo'yicha aniqligini oshiradi hamda yumshoq va qattiq to'qimalarni differensial aniqlashda sezilarli yaxshilanishga olib keladi. Ushbu natijalar foton-sanovchi KT texnologiyasini klinik diagnostikada yanada ishonchli qo'llash imkonini beradi.*

Kalit so'zlar: *foton sanovchi kompyuter tomografiyasi,spectral buzilish, detector kalibrlashi, materiallarni tasniflash, spectral korreksiya algoritmlari, tasvir sifatini oshirish.*

АННОТАЦИЯ. *В данной работе исследуется влияние спектральных искажений детектора, наблюдаемых в системах рентгеновской фотонно-счетной компьютерной томографии (РФКТ), на качество изображения и методы их коррекции. Спектральные искажения, вызванные такими факторами, как энергетический сдвиг на уровне пикселей, наложение импульсов и нелинейный отклик, приводят к ошибкам в правильной классификации материалов. В исследовании анализируются подходы к коррекции, основанные на энергетической калибровке, физическом моделировании и алгоритмах реконструкции. Результаты показали, что коррекция спектральных искажений повышает энергетическое разрешение изображения и приводит к значительному улучшению дифференциальной диагностики мягких и твердых тканей. Эти результаты позволяют более надежно использовать технологию компьютерной томографии с подсчетом фотонов в клинической диагностике.*

Ключевые слова: *компьютерная томография с подсчетом фотонов, спектральные искажения, калибровка детектора, классификация материалов, алгоритмы спектральной коррекции, улучшение качества изображения.*

ABSTRACT. *This article examines the impact of detector spectral distortions observed in X-ray photon-counting computed tomography (X-CT) systems on image quality and methods for correcting them. Spectral distortions, which are caused by factors such as pixel-level energy shift, pulse pile-up, and nonlinear response, cause errors in the correct classification of materials. The study analyzed correction approaches based on energy calibration, physical modeling, and reconstruction algorithms. The results showed that spectral distortion correction increases the energy resolution of the image and leads to a significant improvement in the differential detection of soft and hard tissues. These results allow for more reliable use of photon-counting CT technology in clinical diagnostics.*

Keywords: *photon counting computed tomography, spectral distortion, detector calibration, material classification, spectral correction algorithms, image quality enhancement.*

KIRISH

Foton-sanovchi kompyuter tomografiya (Photon-Counting CT, PCCT) — energiya bo‘yicha ajratilgan rentgen fotonlarini to‘g‘ridan to‘g‘ri sanab oluvchi yangi avlod detektoriga asoslangan tasvirlash texnologiyasidir. An’anaviy integratsion detektorlardan farqli ravishda foton-sanovchi kompyuter tomografiya yuqori fazoviy aniqlik, past dozada tasvirlash va materiallarni spektral asosda tasniflash imkoniyatiga ega. So‘nggi yillarda foton-sanovchi kompyuter tomografiya yurak-qon tomir kasalliklari, onkologiya, neyrodiagnostika va pediatriyada diagnostikaning aniqligini oshirishda katta salohiyat ko‘rsatmoqda. Shunga qaramay, foton sanash jarayoniga xos pile-up va charge sharing kabi spektral buzilishlar ham mavjud. Ushbu tadqiqotning maqsadi — tibbiy diagnostikada foton-sanovchi KTning asosiy afzalliklari, qo‘llanilish yo‘nalishlari va texnologiyaning zamonaviy klinik imkoniyatlarini tahlil qilishdir.

ADABIYOTLAR TAHLILI VA METODOLOGIYA

Ushbu tadqiqot ilmiy adabiyotlarni tizimli tahlil qilish metodiga asoslandi. 2016–2024-yillar oralig‘ida Scopus, PubMed va IEEE Xplore ma’lumotlar bazalarida chop etilgan maqolalar ko‘rib chiqildi. Energiya bilan ajratilgan foton sanovchi detektorlar (FSD) sanoat va xavfsizlik maqsadlarida ishlatiladigan turli xil rentgen radiografiyasi va tomografiya tizimlarida material identifikatsiyasini yaxshilash qobiliyatini taqdim etadi. Ularning potentsiali hozirgi kunda keng qo'llaniladigan qo'sh energiya sintilyator detektorlaridan yuqori ekanligi isbotlangan. Biroq, foton to'planishi va zaryad almashinuvi kabi detektor effektlari FSD lardagi energiya spektrini buzadi. Bu effektlar ko'p energiyali chiziqli susaytirish koeffitsientlarining

(CHSK) aniq o'lchovlari zarur bo'lgan material identifikatsiyasi uchun ishlatilganda FSD larning ishlashida sezilarli yomonlashuvga olib keladi. Kompyuter tomografiyasi (KT) texnologiyasi deyarli yarim asrlik mavjudligi davomida sezilarli yaxshilanishlarga qaramay, foton hisoblovchi detektorlar (FSD) tomonidan va'da qilingan takomillashtirishlar klinik muammolarga yechim taklif qila oladigan ko'plab sohalar mavjud. Ularning yuqori fazoviy aniqligi o'pka tugunlarining vizualizatsiyasini yaxshilashi mumkin ;vaqtinchalik suyak tasviridagi kabi kichik suyak detallari; kaltsiy "gullashi" muammo bo'lgan koronar arteriyalar kabi kichik qon tomirlari; yoki stentlar kabi implantatlar. Ayniqsa, kontrast kuchaytirilgan tasvir uchun yaxshilangan kontrast-shovqin nisbati (CNR) qon tomirlarining vizualizatsiyasini yaxshilash yoki kontrast kuchaytiruvchi o'smalarni yaxshilash uchun ishlatilishi mumkin.

FSD lar miyadagi kulrang va oq moddalar o'rtasidagi farqni yaxshilashini ham ko'rsatdi. Bundan tashqari, material-selektiv tasvirlarni yaratish qobiliyati neyroradiologiyada, masalan, miya ichidagi qon ketishini kaltsifikatsiyadan va yodli kontrastdan ajratish kabi ilovalarga ega, bunda ikki energiyali KT samarali ekanligi ko'rsatilgan. FSDlar bilan yaxshilangan material-selektiv tasvir olish imkoniyati lipid, kaltsiy va yod kabi materiallarni ajratish qobiliyatini yaxshilash orqali aterosklerotik blyashkalarning yaxshiroq vizualizatsiyasini ham taklif qilishi mumkin. Yana bir istiqbolli jihat - yaxshilangan past dozali tasvir. Past dozali ionlashtiruvchi nurlanishning sog'liq uchun xavfi bahsli masala, ammo 50-60 mGy dan ortiq kumulyativ dozalar bilan KT tekshiruvidan o'tgan pediatrik bemorlarda miya saratoni va leykemiya xavfi ortganligi ko'rsatilgan. Shunga qaramay, KT ko'pincha bemor uchun eng yaxshi foyda va xavf nisbati bo'lgan tasviriy muqobil hisoblanadi va rentgen tasviridagi doza imkon qadar past darajada saqlanishi kerak.

Elektron shovqinni rad etish orqali FSD lar bugungi kunda mumkin bo'lganidan pastroq dozalar bilan yangi tasvir protokollarini yaratishga imkon beradi. Bu fakt kattalarga qaraganda nurlanishga sezgirroq bo'lgan bolalar va o'smirlarni tasvirlash va o'pka saratoni skriningi uchun muhim ahamiyatga ega bo'lishi mumkin, chunki tekshiruv ko'p sonli sog'lom odamlarda amalga oshiriladi. FSD larning energiya aniqlash qobiliyatlari nurlanish qattiqlashuvi yoki metall implantlar tufayli artefaktlarni kamaytirish uchun ishlatilishi mumkin. Shunday qilib, miya kabi zich suyak tuzilmalari bilan o'ralgan zaif susaytirish farqlari bo'lgan mintaqalarni tasvirlashda yaxshilangan diagnostika sifatini ta'minlaydi. Yana bir potentsial qo'llanilishi radiomika sohasida topiladi, bu yerda tibbiy tasvirlardan ko'p sonli miqdoriy radiomik xususiyatlar olinadi va tashxisni ko'rsatuvchi naqshlarni topish uchun tahlil qilinadi. Ushbu radiomik xususiyatlar hozirda takrorlanishni cheklaydigan olingan parametrlariga bog'liq.

NATIJALAR

Natijalar PCCT texnologiyasi diagnostik aniqlikni real klinik sharoitlarda sezilarli darajada oshirishini ko‘rsatdi. Foton hisoblovchi KT ning miqdoriy material xaritalarini yaratish potentsiali bu o'zgaruvchanlikni kamaytirishi mumkin. Yaxshilangan to'qimalarni tavsiflash radioterapiya rejalashtirishni yaxshilash uchun ham potentsialni ko'rsatadi. Foton hisoblovchi KT ning eng taxminiy taklif qilingan ilovalari orasida yangi kontrast moddalardan foydalanish mavjud. MRI da ishlatiladigan gadoliniy foton hisoblovchi KT uchun jozibador nomzoddir, chunki uning K-chegarasi diagnostika energiya diapazonining markaziy qismida joylashgan. Biroq, gadoliniy kontrast moddalari bemor uchun xavfsiz konsentratsiyalarda etarli kontrast hosil qila oladimi yoki yo'qmi, hali aniq emas. Yagona skanerlashda kontrastning turli fazalarini ko'rsatish uchun yod, gadoliniy va ehtimol vismut kabi ikki yoki uch kontrast moddalari protokollari ham taklif qilingan.

O‘tkazilgan tahlillar va adabiyotlar asosidagi qiyosiy baholash natijalari foton-sanovchi kompyuter tomografiya (FSKT) tizimlarida detektor spektral buzilishlarini tuzatish tasvir sifati va materiallarni energiya bo‘yicha tasniflash aniqligiga bevosita ta’sir ko‘rsatishini aniqladi. Spektral korreksiya qo‘llanilgandan so‘ng energiya bo‘yicha ajratilgan tasvirlarning barqarorligi va ishonchliligi sezilarli darajada yaxshilandi.

Birinchidan, spektral javobning aniqligi baholanganda, pile-up va charge sharing effektlari hisobga olinmagan holatlarda energiya spektrining past energiya sohasida sezilarli siljishlar kuzatildi. Korreksiya algoritmlari joriy etilgach, foton energiyalarining noto‘g‘ri ro‘yxatga olinishi kamaydi va detektor javobining chiziqliligi yaxshilandi. Bu holat energiya binlari bo‘yicha ajratilgan tasvirlarning aniqligini oshirdi hamda spektral xatoliklarni sezilarli darajada pasaytirdi.

Ikkinchidan, tasvir sifati ko‘rsatkichlari tahlil qilinganda, spektral korreksiyadan so‘ng signal-shovqin nisbati (SNR) va kontrast-shovqin nisbati (CNR) ning oshishi qayd etildi. Ayniqsa, past dozali skanerlash rejimlarida shovqinning kamayishi tasvirning klinik qiymatini oshirdi. Bu natija PCCT texnologiyasining past dozada ham yuqori sifatli tasvir hosil qilish imkoniyatini tasdiqlaydi.

Uchinchidan, materiallarni tasniflash aniqligi baholanganda, spektral buzilishlarni tuzatish kalsiy, yod, qon quyqalari va yumshoq to‘qimalarni energiya bo‘yicha farqlashda muhim rol o‘ynashi aniqlandi. Korreksiya qo‘llanilgan tasvirlarda materiallar o‘rtasidagi spektral farqlar yanada ravshanlashdi, bu esa ko‘p materialli dekompozitsiya algoritmlarining aniqligini oshirdi. Natijada materiallarning noto‘g‘ri klassifikatsiyasi sezilarli darajada kamaydi.

To‘rtinchidan, fazoviy aniqlik bo‘yicha o‘tkazilgan qiyosiy baholash shuni ko‘rsatdiki, spektral korreksiya detektor piksel javobining bir xilligini ta’minlab, mayda strukturaviy elementlarning tasvirda aniqroq aks etishiga yordam berdi. Bu, ayniqsa, suyak mikrostrukturasi, koronar tomirlar va o‘pka to‘qimalarini tasvirlashda muhim ahamiyat kasb etdi.

Beshinchidan, klinik qo‘llanilish nuqtai nazaridan, spektral tuzatilgan PCCT tasvirlari diagnostik ishonchlilikni oshirdi. Kardiologiyada tomir devoridagi kalsiy birikmalarini kontrast moddalardan farqlash, onkologiyada esa o‘simta va sog‘lom to‘qimalar o‘rtasidagi spektral farqlarni aniqlash imkoniyati yaxshilandi. Neyrodiagnostikada qon quyqalarini kalsifikatsiyalardan ajratish aniqligi ortdi.

Umuman olganda, olingan natijalar detektor spektral buzilishlarini samarali tuzatish foton-sanovchi KT tizimlarida yuqori aniqlikdagi energiya-resolved tasvirlar hosil qilish va materiallarni ishonchli tasniflash uchun zarur shart ekanligini ko‘rsatdi. Ushbu natijalar PCCT texnologiyasining klinik diagnostikada keng joriy etilishi uchun mustahkam ilmiy asos yaratadi.

MUHOKAMA

Ushbu tadqiqot natijalari foton-sanovchi kompyuter tomografiya (FSKT) texnologiyasining tibbiy diagnostikadagi yuqori salohiyatini yana bir bor tasdiqlaydi. Olingan natijalarga ko‘ra, detektor spektral buzilishlarini to‘g‘ri aniqlash va ularni samarali korreksiyalash materiallarni energiya bo‘yicha tasniflash aniqligini sezilarli darajada oshiradi. Bu holat, ayniqsa, ko‘p materialli muhitlarda, jumladan biologik to‘qimalar va kontrast moddalar mavjud bo‘lgan klinik holatlarda muhim ahamiyat kasb etadi.

Foton-sanovchi detektorlarning asosiy afzalligi – har bir rentgen fotonini energiya bo‘yicha alohida sanash imkoniyatidir. Biroq, amaliy sharoitda pile-up, charge sharing va energiya rezolyutsiyasining cheklanganligi kabi omillar spektral ma’lumotlarning buzilishiga olib keladi. Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatdiki, ushbu buzilishlar e’tiborga olinmagan holatlarda materiallarni noto‘g‘ri tasniflash, masalan, kalsiy va yod yoki qon quyqasi va yumshoq to‘qimalarni ajratishda xatoliklar yuzaga kelishi mumkin. Shu sababli spektral korreksiya bosqichi PCCT rekonstruksiya jarayonining ajralmas qismi bo‘lishi zarur.

O‘rganilgan kalibrlash va modellashtirishga asoslangan korreksiya usullari spektral javobning barqarorligini sezilarli darajada yaxshilaydi. Ayniqsa, energiya bo‘yicha detektor javobini modellashtirish va iterativ rekonstruksiya algoritmlaridan foydalanish tasvirning signal-shovqin nisbatini oshirish bilan birga, material ajratish aniqligini ham kuchaytiradi. Bu esa an’anaviy integratsion KT tizimlariga nisbatan PCCT ning muhim ustunligini namoyon etadi.

Natijalar avvalgi tadqiqotlar bilan taqqoslanganda, PCCT da spektral buzilishlarni tuzatish klinik diagnostika sifatiga bevosita ijobiy ta'sir ko'rsatishini ko'rsatadi. Xususan, yurak-qon tomir tizimi kasalliklarida tomir devoridagi kalsiy birikmalarini kontrast moddalaridan aniq farqlash, onkologiyada esa o'simta to'qimalarining kimyoviy tarkibini baholash imkoniyati kengayadi. Bu holat PCCT ning nafaqat tasvirlash texnologiyasi, balki funktsional va materialga yo'naltirilgan diagnostika vositasi sifatida ham ahamiyatli ekanligini ko'rsatadi. Shu bilan birga, tadqiqot ayrim cheklovlarga ega. Foton-sanovchi KT tizimlarining yuqori texnologik murakkabligi va qurilma narxining balandligi ularning klinik muassasalarda keng joriy etilishini sekinlashtirmoqda. Bundan tashqari, spektral ma'lumotlar hajmining kattaligi hisoblash resurslariga bo'lgan talabni oshiradi, bu esa real vaqt rejimida rekonstruksiya jarayonini qiyinlashtiradi. Spektral buzilishlarni to'liq bartaraf etish uchun yanada mukammal modellar va hisoblash algoritmlariga ehtiyoj mavjud. Kelajak tadqiqotlari uchun sun'iy intellekt va mashinaviy o'rganish usullarini spektral korreksiya va material tasniflash jarayonlariga integratsiya qilish istiqbolli yo'nalish hisoblanadi. Bunday yondashuvlar spektral xatoliklarni avtomatik aniqlash va tuzatish, shuningdek, klinik qaror qabul qilish jarayonini tezlashtirish imkonini beradi. Shu jihatdan, PCCT texnologiyasi kelajakda tibbiy diagnostikaning aniqligi va xavfsizligini oshirishda muhim rol o'ynashi kutilmoqda.

XULOSA

Mazkur tadqiqot rentgen foton-sanovchi kompyuter tomografiya (FSKT) tizimlarida detektor spektral buzilishlarini tuzatish masalasi tasvir sifati va materiallarni tasniflash aniqligi uchun muhim omil ekanligini ko'rsatdi. O'rganilgan natijalarga ko'ra, pile-up, charge sharing va energiya rezolyutsiyasining cheklanganligi kabi spektral buzilishlar e'tiborga olinmagan holatlarda energiya bo'yicha tasniflashda sezilarli xatoliklarga olib keladi hamda klinik qaror qabul qilish ishonchliligini pasaytiradi. Tadqiqot davomida tahlil qilingan kalibrlash, fizik modellashtirish va iterativ rekonstruksiya algoritmlariga asoslangan korreksiya yondashuvlari detektor javobining barqarorligini oshirishi, tasvirning signal-shovqin nisbatini yaxshilashi va material ajratish aniqligini sezilarli darajada kuchaytirishi aniqlandi. Bu yondashuvlar yordamida yumshoq va qattiq biologik to'qimalar, shuningdek kontrast moddalarning energiya bo'yicha farqlanishi ancha ravshanlashadi. Natijada PCCT texnologiyasi an'anaviy KT tizimlariga nisbatan yuqori diagnostik imkoniyatlarga ega ekanligi tasdiqlandi. Olingan xulosalar PCCT ning kardiologiya, onkologiya, neyrodiagnostika va shoshilinch tibbiyot kabi sohalarda amaliy ahamiyatga ega ekanligini ko'rsatadi.

Umuman olganda, foton-sanovchi KT va unda spektral buzilishlarni samarali tuzatish texnologiyasi kelajakda tibbiy diagnostikaning aniqligi, ishonchliligi va

xavfsizligini oshirishda muhim o‘rin egallaydi. Ushbu tadqiqot natijalari PCCT asosida yangi klinik protokollarni ishlab chiqish va materialga yo‘naltirilgan diagnostik yondashuvlarni yanada rivojlantirish uchun ilmiy asos bo‘lib xizmat qiladi.

ADABIYOTLAR RO’YXATI

1. D. Jumanazarov, J. Koo, M. Busi, H. F. Poulsen, U. L. Olsen, M. Iovea, System-independent material classification through X-ray attenuation decomposition from spectral X-ray CT, NDT and EInternational 116 (2020) 102336.
2. Ding, H., et al. (2018). Spectral distortion correction for photon-counting detectors in CT. Physics in Medicine & Biology, 63(3), 035008. Xu, Q., et al. (2021).
3. Leng, S., et al. (2019). Photon-counting detector CT: System design and clinical applications. Radiographics, 39(3), 729–743.
4. Modeling and correction of pulse pile-up effects in photon-counting CT detectors. Medical Physics, 48(6), 2875–2888. Yu, Z., et al. (2016).
5. Simulation and correction of charge sharing in photon-counting detectors. Medical Physics, 43(1), 121–132. Zhang, Y., et al. (2020).
6. Spectral calibration and material classification in photon-counting CT. Physics in Medicine & Biology, 65(12), 125010.
7. Si-Mohamed, S., et al. (2017). Review of spectral CT: Principles, applications and future directions. European Radiology, 27(8), 3213–3226.
8. Taguchi, K., & Iwanczyk, J. S. (2013). Vision 20/20: Single photon counting X-ray detectors in medical imaging. Medical Physics, 40(10), 100901.
9. Willemink, M. J., et al. (2018). Photon-counting CT: Technical principles and clinical prospects. Radiology, 289(2), 293–312.