UNIVERSAL JOURNAL OF MEDICAL AND NATURAL SCIENCES
ISSN 2992-8826
https://sr-journals.org/index.php/UJMANS



SPEKTRAL RENTGEN KT YORDAMIDA RENTGEN NURLANISHI SUSAYISHINI AJRATISH ORQALI TIZIMGA BOG‘LIQ BO‘LMAGAN MATERIALLARNI TASNIFLASH

Ismailova Nilufar Nuriddinovna
Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch davlat universiteti magistranti;
E-mail: ismailovanilufar191@gmail.com
Jumanazarov Doniyor Rustamovich
Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch davlat universiteti fizika kafedrasi dotsenti, DSc;
E-mail: doniyor13021991@gmail.com

Annotatsiya. Biz spektral rentgen kompyuter tomografiyasida (SKT) materiallarni tasniflash uchun usulni taqdim etamiz, bunda energiyani ajrata oluvchi 2D detektorlardan foydalanib materialning chiziqli susayish koeffitsiyentining (CHSK) energiyaga bog‘liqligi bir vaqtning o‘zida olinadi. Ushbu usul Alvarez va boshqalar tomonidan taqdim etilgan susayishni ajratish yondashuviga asoslanadi hamda energiyaga bog‘liq CHSK o‘lchovlaridan foydalanib skanerdan mustaqil material xossalari — elektron zichlik (ρ_e) va samarali atom raqamini (Z_{eff}) baholaydi. Usul spektral tuzatish algoritmidan foydalanadi va detektor javobi tuzatilganidan keyin ham mavjud bo‘lishi mumkin bo‘lgan foton yetishmovchiligi hamda spektral buzilishlarni o‘z ichiga olgan energiya kanallari chiqarib tashlanadi. Tasniflash samaradorligini optimallashtirish uchun energiya kanallarini tanlashning yangi usuli qo‘llaniladi. Usul $6 \leq Z_{eff} \leq 23$ oralig‘idagi materiallarni tekshirish uchun SRZE deb ataluvchi boshqa SKT tasniflash usuli bilan solishtirib sinovdan o‘tkazilgan. Bizning usulimiz ma’lumotlarni yig‘ishdan keyingi qayta ishlash jarayonining tezligini oshirishga qaratilgan bo‘lib, rekonstruksiya uchun vaqt samaradorligini aniq holda 32 martagacha yaxshilaydi, shu bilan birga xavfni aniqlashda muhim bo‘lgan materiallar uchun taqqoslanadigan aniqlikni saqlab qoladi.

Kalit sozlar: spektral KT, elektron zichlik, samarali atom raqami, foton sanovchi detektor.

Аннотация: Мы представляем метод классификации материалов в спектральной рентгеновской компьютерной томографии (SCT), использующий энергетически разрешающие двумерные детекторы для одновременного извлечения энергетической зависимости линейного коэффициента ослабления (LAC) материала. Метод основан на разложении ослабления, предложенном Alvarez и соавторами, и позволяет оценивать независимые от сканера свойства материала — электронную плотность (ρ_e) и эффективный атомный номер (Z_{eff}) — на основе энергетически зависимых измерений LAC. Метод использует алгоритм спектральной коррекции, при этом энергетический диапазон ограничивается с исключением интервалов, содержащих фотонное голодание и спектральные искажения, присутствующие даже после коррекции отклика детектора. Для оптимизации эффективности классификации применяется новый метод выбора энергетических интервалов. Метод протестирован в сравнении с другим методом классификации SCT, называемым SRZE, для анализа материалов в диапазоне $6 \leq Z_{eff} \leq 23$. Предложенный метод направлен на повышение скорости постобработки после сбора данных и обеспечивает до 32-кратного увеличения временной эффективности реконструкции при сопоставимой точности для материалов, важных в задачах обнаружения угроз.

Ключевые слова: Спектральная рентгеновская компьютерная томография , Электронная плотность, Эффективный атомный номер, Фотон-считающие детекторы.

Abstract. We present a method for material classifications in spectral X-ray Computed Tomography (SCT) taking advantage of energy-resolving 2D detectors to simultaneously extract the energy dependence of a material's linear attenuation coefficient (LAC). The method employs an attenuation decomposition presented by Alvarez et al., and estimates system-independent material properties of electron density (ρ_e) and effective atomic number (Z_{eff}), independent of the scanner, from the energy-dependent LAC measurements. The method uses a spectral correction algorithm and the energy range is truncated to exclude bins with photon starvation and spectral distortion present even after correction of detector response. A novel technique of energy bin selection is used for optimized classification performance. The method is tested against another SCT classification method called SRZE for inspecting materials in the range of $6 \leq Z_{eff} \leq 23$. Our method aims at an increase in the speed of pot processing workflow after the data acquisition, and it achieves explicitly up to 32 times better time efficiency for the reconstruction with comparable accuracy for a range of materials important in threat detection.

Keywords: Spectral X-ray CT**,** Electron density**,** Effective atomic number**,** Photon counting detectors

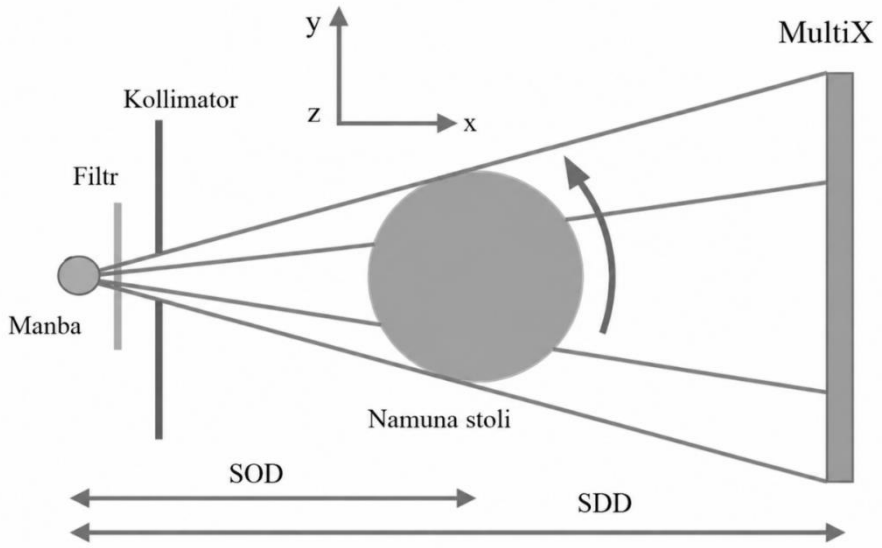
Kirish. Zararsiz suyuqliklar hamda qo‘lbola portlovchi moddalar uchun prekursorlarni o‘zaro farqlash fuqarolik aviatsiyasi xavfsizlik nazorati tizimlari uchun murakkab masalalardan biri hisoblanadi. Bunga sabab, ushbu materiallarning aksariyati o‘xshash rentgen nurlanishi susayish xususiyatlariga ega bo‘lgan organik suyuqliklardan iboratdir. Shu bois, bunday tahdidlarni, shuningdek an’anaviy portlovchi moddalarni aniqlash yuqori aniqlikka ega bo‘lgan material xususiyatlarini baholay oladigan texnologiyalarni talab etadi [1]. Rentgen kompyuter tomografiyasi (KT) uzoq yillar davomida buzilmasdan nazorat qilish hamda noqonuniy materiallarni aniqlash sohalarida keng qo‘llanilib kelinmoqda [2]. An’anaviy KT tizimlari odatda polixromatik rentgen nurlanish manbalaridan foydalanadi va natijada keng energiya kanalida samarali chiziqli susayish koeffitsiyentini (CHSK) o‘lchaydi. Ushbu tizimlarda susayish xususiyatlarini ifodalash uchun ko‘pincha Hounsfield birligidan foydalaniladi. Biroq, bu yondashuvda susayish spektri yagona qiymat bilan ifodalanadi, bu esa ayrim hollarda materiallar orasidagi farqlardan kattaroq noaniqliklarga olib kelishi mumkin [1]. 1976-yilda Alvarez va hammualliflar tomonidan taklif etilgan yondashuvda CHSK fotoelektr yutilish va Kompton sochilish komponentlariga ajratilishi ko‘rsatib berilgan [3]. Ushbu yondashuvga ko‘ra, materialni tavsiflash uchun faqat ikkita asosiy parametr — zichlik (ρ) va samarali atom raqami (Z_{eff}) yetarli bo‘lib, ular yordamida CHSKning butun spektral kanalini ifodalash mumkin. Ikki energiyali kompyuter tomografiyasi susayish spektridan ikki xil signalni o‘lchash orqali ushbu parametrlarni tiklash imkonini beradi [4–8]. Biroq, mavjud ikki energiyali detektorlar past va yuqori energiya kanallarining sezilarli darajada ustma-ust tushishi bilan tavsiflanadi, bu esa energiyalarni ajratish sifatini pasaytiradi. Natijada, bunday tizimlar asosida amalga oshiriladigan material tasnifi ko‘pincha tizimga bog‘liq bo‘lib qoladi, ya’ni u rentgen manbasi spektri, filtrlash darajasi va detektor samaradorligiga sezilarli darajada bog‘liq bo‘ladi [4,9]. So‘nggi yillarda Azevedo va hammualliflar tomonidan ikki energiyali KT ma’lumotlari asosida elektron zichlik (ρ_e) va samarali atom raqamini (Z_{eff}) aniqlashga qaratilgan, skanerdan mustaqil bo‘lgan SIRZ (System-Independent ρ_e/Z_{eff}) usuli taklif etildi [4]. Keyinchalik ushbu yondashuv Champley va hammualliflar tomonidan yanada takomillashtirilib, SIRZ-2 varianti ishlab chiqildi [10]. Mazkur usullar, barcha DECT texnologiyalarida bo‘lgani kabi, turli pik kuchlanish va filtrlash parametrlariga ega bo‘lgan ikkita ketma-ket skanerlashni talab etadi. Bundan tashqari, detektorning spektral javobini aniqlash uchun etalon materiallar asosida kalibrlash jarayoni ham zarur hisoblanadi.

Tajriba natijalari shuni ko‘rsatadiki, Z_{eff} = 6–20 oralig‘ida va 200 keV gacha bo‘lgan energiyalarda SIRZ usuli yordamida (ρ_e, Z_{eff}) parametrlarini baholashda aniqlik xatoligi 3% dan, takrorlanuvchanlik xatoligi esa 2% dan oshmaydi. SIRZ-2 usulida esa aniqlik xatoligi elektron

zichlik uchun 0,7% ni, samarali atom raqami uchun esa 1,5% dan kam qiymatni tashkil etadi, takrorlanuvchanlik xatoligi esa har ikkala parametr uchun 2,3% gacha yetadi.

Mavzuga oid adabiyotlarning tahlili (Literature review). Radiografiya yordamida materiallarni aniqlashda Rinkel va boshqalar [17] tajriba natijalari orqali shuni ko‘rsatdiki, FSDda 90 ta energiya kanalidan foydalanilganda noto‘g‘ri aniqlash darajasi optimallashtirilgan ikki energiyali kanal yondashuviga nisbatan 2 martagacha, yupqa obyektlar uchun esa 3 martadan ko‘proq kamaygan. Beldjoudi va boshqalar [8,11] simulyatsiyalar orqali FSD ma’lumotlarini ikki energiya kanaliga jamlash ham bir materialni aniqlash samaradorligini ikki qatlamli detektorlarga nisbatan 50% dan ortiq oshirishini ko‘rsatdi. Energiya kanallari sonini oshirish esa materialni aniqlashni yanada yaxshilab, 90 ta kanal ishlatilgan detektorlarga nisbatan 80% gacha yuqori natija bergan. Aksincha, FSDlar ancha yuqori spektral aniqlikka ega. Kutilganidek, detektorning energiya aniqligidan kichik bo‘lgan bin kengliklaridan foydalanish aniqlash samaradorligini sezilarli oshirmaydi. Biroq, energiya kanallari sonini ko‘paytirish yoki torroq kanallardan foydalanish materialning qalinligi va turidan qat’i nazar yanada barqaror natija beradi. Wang va boshqalar [7] simulyatsiya asosida materiallarni aniqlashda asosiy materiallarga ajratishni optimallashtirish uchun energiya kanallari kengligini qanday tanlash mumkinligini ko‘rsatdi. Ular besh xil energiya kanal konfiguratsiyasini ko‘rib chiqdilar: teng kenglikdagi kanallar, teng tushuvchi foton soniga ega kanallar, teng foton intensivligiga ega kanallar, teng foton soniga ega kanallar va 3 sm PMMA orqali o‘tgandan keyingi teng foton intensivligiga ega kanallar. Eng yaxshi natijalar tushuvchi foton soni bir xil bo‘lgan kanallarda kuzatildi.

Tadqiqot metodologiyasi (Research Methodology). Ushbu bo‘limning maqsadi, birinchidan, tajriba ma’lumotlari asosida materiallarni tasniflashda qo‘llaniladigan tizimga bog‘liq bo‘lmagan material xususiyatlarini aniqlash, ikkinchidan esa aniqlash algoritmi bilan birgalikda asbob-uskunalar va usullarni bayon etishdan iborat.



1-rasm. Instrumental o'rnatish tasviri.

Bragg va Pirs (1914) [34], Ouen (1919) [35], hamda Floyd K. Richtmyer va Warburton (1923) [6] fotonlarning modda bilan o‘zaro ta’sirining atom raqamiga (Z) bog‘liqligi haqidagi dastlabki konsepsiyani ishlab chiqdilar. Ushbu konsepsiya ko‘plab nurlanish tadqiqotlarida qo‘llanilgan [11]. Kompyuter tomografiyasi tizimlari uchun Alvarez va boshqalar [3] 30–200 keV energiya kanalida tajriba asosida shuni ko‘rsatdilarki, chiziqli susayish koeffitsiyenti (CHSK) quyidagi ko‘rinishda ajratilishi mumkin:

$$\mu(E) = a_1 \frac{1}{E^3} + a_2 f_{KN}(E) \qquad (1)$$

bu yerda $f_{KN}(E)$ - Klein-Nishina funksiyasi

$$f_{KN}(\varepsilon) = \frac{1+\varepsilon}{\varepsilon^2}\left(2\frac{1+\varepsilon}{1+2\varepsilon} - \frac{\ln(1+2\varepsilon)}{\varepsilon}\right) + \frac{\ln(1+2\varepsilon)}{2\varepsilon} - \frac{1+3\varepsilon}{(1+2\varepsilon)^2} \qquad (2)$$

UNIVERSAL JOURNAL OF MEDICAL AND NATURAL SCIENCES
ISSN 2992-8826
https://sr-journals.org/index.php/UJMANS

va $\varepsilon = E/511$ keV ($\varepsilon = E/m_e c2$) - tushayotgan fotonning kamaytirilgan energiyasidir. $1/E^3$ va $f_{KN}(E)$ funksiyalari mos ravishda fotoelektrik yutilish va Kompton sochilishning energiyaga bog‘liqligini yaqinlashtiradi. Rentgen nurlarining susayishi materialning elektron zichligiga proporsional [8]. Elektron zichlik — bu birlik hajmdagi elektronlar soni (elektron-mol/cm³) bo‘lib, u elementning massaviy zichligi, atom raqami va atom massasi bilan quyidagicha bog‘langan:

$$(\rho E) = \frac{Z}{A(Z)}\rho, \qquad (6)$$

Agar modda N ta turli elementdan iborat birikma yoki aralashma bo‘lsa va har bir element iii uchun atomlar soni αi\alpha_iαi bo‘lsa, elektron zichlik quyidagicha aniqlanadi:

$$\rho_e = \frac{\sum_{i=1}^{N} a_i Z_i}{\sum_{i=1}^{N} a_i A_i}\rho \qquad (7)$$

Birikmalar uchun atom raqami samarali atom raqami Z_{eff} deb ataladi va klassik parametrizatsiya Mayneord (1937) hamda Spiers (1946) tomonidan quyidagicha taklif qilingan:

$$Z_{eff} = \sqrt[l]{\sum_{i=1}^{N} r_i Z_i^l} \qquad (8)$$

bu yerda N - materialdagi elementlar soni, Z_i – atom Har bir element uchun raqam, i, r_i "nisbiy elektron kasr" hissasidir.

Elementning nisbiy elektron ulushi quyidagicha ifodalanadi:

$$r_i = \frac{a_i Z_i}{\sum_{j=1}^{N} a_j Z_j}$$

bu erda α_i - atom raqami Z_i ga ega atomlar soni.

Kalibrlash parametrlari ((E_k), (E_k) va n) hamda o‘lchangan chiziqli susayish koeffitsiyenti $\mu(E_k)$ yordamida (ρ_e, Z_{eff}) aniqlanadi.

Usulning aniqligi nisbiy foiz sifatida baholandi ρ_e va Z_{eff} uchun mos yozuvlar qiymatlaridan og'ish quyidagicha:

$$\Delta Z_{eff}^{nat} = 100\% \cdot \frac{Z_{eff}^{est} - Z_{eff}^{ref}}{Z_{eff}^{ref}}, \qquad (16)$$

$$\Delta \rho_e^{jad} = 100\% \cdot \frac{\rho_e^{est} - \rho_e^{ref}}{\rho_e^{ref}}, \qquad (17)$$

bu yerda nat — hisoblangan, jad — haqiqiy qiymatlarni bildiradi.

1-jadval. Klassifikatsiya metodining kalibrovka bosqichida ishlatilgan referens materiallar. Plastiklar uchun massa zichligi ρ qiymatlari ±0.15% noaniqlik bilan baholangan. Qolgan materiallarning zichlik qiymatlari PubChem ma’lumotlar bazasidan olingan.

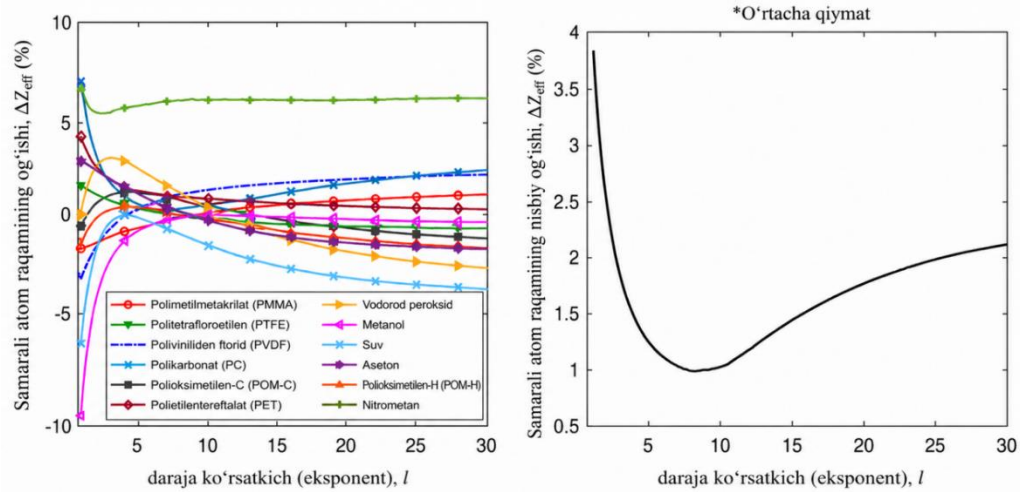
Material	Kimyoviy formula	O‘lcham (mm)	ρ (g/cm³)	Z_{eff}
Grafit	C	12.7	1.8	6
N,N-Dimetilgidrazin	$C_2H_8N_2$	67	0.791	6.14
Etilendiamin	$C_2H_8N_2$	67	0.90	6.14
PC	$(CO_3C_{13}H_8)_n$	8.2 × 53.5	1.18	6.48
Aseton	C_3H_6O	54	0.785	6.44

OPEN ACCESS

Nitrobenzol	$C_6H_5NO_2$	49	1.20	6.68
PMMA	$(C_5O_2H_8)_n$	40 × 42	1.18	6.60
Etanol 96%	C_2H_6O (96%)	67 × 67	0.798	6.58
Metanol	CH_3OH	20	0.792	6.86
POM-C	$(CH_2O)_n$	9 × 53.5	1.41	7.07
Gidrazin eritmasi	H_4N_2 (35%)	54	1.0	7.24
Nitrometan	CH_3NO_2	20	1.14	7.27
Suv	H_2O	20	0.997	7.54
Suv 3	H_2O	12.7	0.997	7.54
H_2O_2 (50%)	H_2O_2	73 × 74	1.22	7.65
PTFE	$(C_2F_4)_n$	9 × 53.3	2.16	8.50
Magniy	Mg	18	1.74	12
Alyuminiy	Al	20 × 20	2.70	13

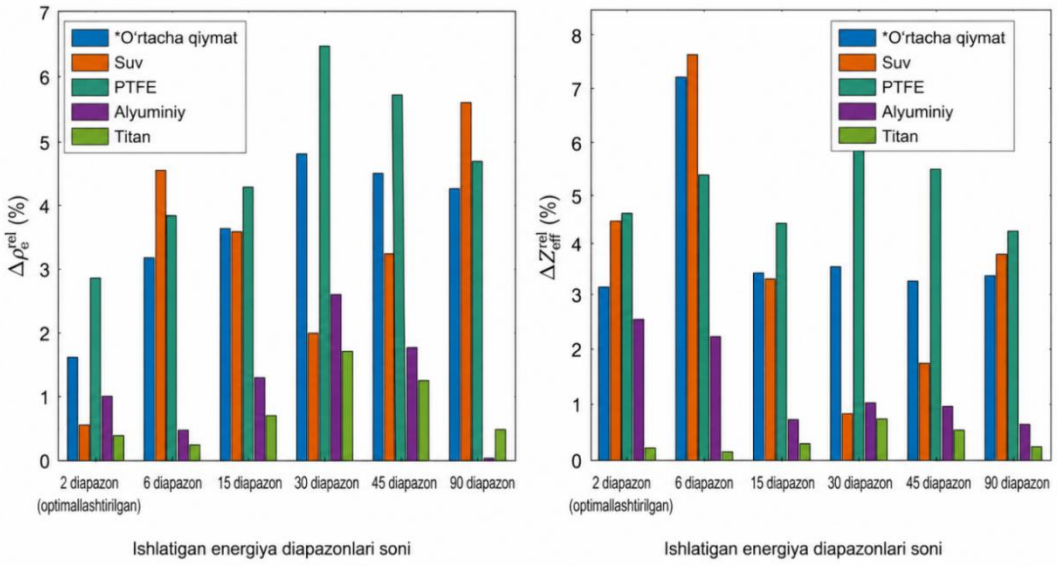
Eksperimental sozlash va materiallar. Tajribalar Daniya Texnika Universitetining 3D tasvirlash markazida o‘tkazildi. Hamamatsu Photonics rentgen manbasi qo‘llanildi, u tezlashtiruvchi kuchlanish 160 kV va filament toki mos ravishda 0.5 mA qilib sozlangan holda ishlatildi. Ushbu parametrlar uchun fokus nuqtasi 75 µm ni tashkil qiladi. Detektor energiya kanalidan past energiyali fotonlarni olib tashlash uchun 2 mm qalinlikdagi alyuminiy filtr ishlatildi. Namunalar aylanish stoliga joylashtirildi va 360° kanalda 1° qadam bilan diskret aylantirish orqali skanerlash amalga oshirildi. Manbadan detektorgacha bo‘lgan masofa (SDD) 701 mm, manbadan namunagacha bo‘lgan masofa (SOD) esa 500 mm qilib belgilandi. Detektor tizimi beshta MultiX ME100 modullaridan iborat bo‘lib, har biri 1 × 128 ta pikselga ega, piksel o‘lchami 0.8 × 0.8 mm². Energiya kanallari soni moslashuvchan bo‘lib, tajriba maqsadiga qarab 2 dan 128 gacha sozlanishi mumkin. Ushbu ishda u 128 ga teng qilib olinib, har biri 1.1 keV kenglikda, 20 dan 160 keV gacha bo‘lgan energiya oralig‘ida teng taqsimlangan. Detektorning energiya aniqligi (FWHM — yarim maksimal kenglik) yuqori rentgen oqimlarida 6.5% ni tashkil etadi (122 keV da 8 keV) [23]. Ushbu ishda har bir proyeksiya uchun umumiy integratsiya vaqti 8 soniya qilib olingan. FSD (foton hisoblovchi detektorlar) da zaryad taqsimlanishi, og‘irlik potensiali, chiqib ketuvchi piklar, impulslarning ustma-ust tushishi va zaryadning to‘liq yig‘ilmasligi ma’lumotlarning buzilishiga olib keladi Klassifikatsiya kalibrlash bosqichida referens sifatida plastmassa materiallardan foydalanilgan holda va hisoblashlar uchun optimallashtirilgan ikki energiyali kanallar asosida amalga oshirildi.

UNIVERSAL JOURNAL OF MEDICAL AND NATURAL SCIENCES
ISSN 2992-8826
https://sr-journals.org/index.php/UJMANS



1-rasm. Ushbu rasmda materiallar uchun Z_{eff} ning nisbiy xatoliklarining l daraja ko‘rsatkichiga bog‘liqligi ko‘rsatilgan. O‘rtacha nisbiy og‘ishlarga asoslanib, l ning optimal kanali 7.2 dan 10.5 gacha ekanligi aniqlandi, bu oraliqda og‘ishlar 1% dan kichik bo‘ladi. Minimal og‘ish taxminan 0.9% bo‘lib, u l=8.0l = 8.0l=8.0 da kuzatiladi, holbuki referens qiymat l=3.8l = 3.8l=3.8 uchun og‘ish 1.4% ni tashkil etadi. Optimal klassifikatsiya samaradorligi quyidagi energiya kanallarida erishiladi: past energiya: 57.5 keV – 107 keV , yuqori energiya: 109.3 keV – 131.3 keV bu holda ρe va Z_{eff} uchun o‘rtacha nisbiy og‘ishlar mos ravishda 1.5% va 3.1% ni tashkil etadi. Optimallashtirilgan ikki energiyali kanallar asosida barcha materiallar uchun olingan natijalar keyingi kichik bo‘limda keltirilgan.

Natijalar va muhokamalar



2-rasm. Klassifikatsiya uchun ishlatilgan energiya kanallari soniga bog‘liq holda ρ_e (chapda) va Z_{eff} (o‘ngda) uchun foizli nisbiy og‘ishlar ko‘rsatilgan. Optimallashtirilgan ikki energiyali kanallar yaxshiroq klassifikatsiya samaradorligini ta’minlaydi. O‘rtacha og‘ish 1-jadvalda keltirilgan har bir material uchun nisbiy og‘ishlarning absolut qiymatlari asosida hisoblangan.

2-rasmda (ρ_e, Z_{eff}) uchun nisbiy xatoliklarning energiya kanallari soniga bog‘liqligi ko‘rsatilgan. ρ_e uchun o‘rtacha nisbiy xatolik energiya kanallari soni ortishi bilan oshib, 90 ta kanalda 4.2% ga yetadi. Z_{eff} uchun esa xatolik deyarli o‘zgarmaydi (≈3.3%), faqat 6 kanalda 7.2% ga oshadi. Yuqori Z_{eff} ga ega materiallar (alyuminiy, titan) barcha hollarda plastmassa va suyuqliklarga nisbatan pastroq xatolik ko‘rsatadi. 6 kanalli yondashuv optimallashtirilgan ikki energiyali usuldan yomonroq natija beradi, chunki unda energiya chegaralari optimallashtirilmagan. Shu sababli kam kanalli hollarda optimallashtirish muhim. 15, 30, 45 va 90 kanalli yondashuvlar esa kutilganidek natijani yaxshilamaydi, aksincha yomonlashtiradi. Bunga sabab — kanal

kengliklarining detektor rezolyutsiyasidan kichikligi va kanallar soni ortishi bilan shovqinning oshishidir. Shunga qaramay, 15 kanalli yondashuv 30, 45 va 90 kanallarga qaraganda yaxshiroq natija beradi. Umuman, optimallashtirilgan ikki energiyali kanallar eng yaxshi va eng barqaror klassifikatsiya samaradorligini ta'minlaydi.

Xulosa. Ushbu tadqiqotda spektral KT tizimlari asosida tizimdan mustaqil fizik parametrlar (ρ_e,Z_{eff}) orqali materiallarni tavsiflash uchun SIMCAD usuli ishlab chiqildi. Energiya kanallari sonining klassifikatsiya samaradorligiga ta'siri batafsil tahlil qilinib, optimallashtirilmagan va kichik kanalli yondashuvlar aniqlikni sezilarli darajada pasaytirishi aniqlandi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, energiya kanal kengligi detektor rezolyutsiyasidan kichik bo'lgan hollarda klassifikatsiya sifati yaxshilanmaydi. Eng yuqori aniqlik optimallashtirilgan ikki energiyali kanallar yordamida erishildi, bu esa hisoblash murakkabligini kamaytirgan holda yuqori samaradorlikni ta'minlaydi. SIMCAD usuli SRZE bilan taqqoslaganda kam sonli kanallar bilan ham o'xshash aniqlik beradi va hisoblash vaqtini sezilarli qisqartiradi. Ushbu yondashuv yuqori tezlikda ishlovchi xavfsizlik skanerlari uchun ayniqsa dolzarb hisoblanadi. Bundan tashqari, usul yuqori Z_{eff} materiallar uchun yanada yuqori aniqlik ko'rsatib, keng kanaldagi materiallarga qo'llanish imkoniyatiga ega ekanligi aniqlandi. Kelgusida usulni K-chegaralar mavjud bo'lgan holatlar va kengroq material kanalida sinovdan o'tkazish rejalashtirilmoqda.

Foydalanilgan adabiyotlar.

(1). Yu Zet al Evaluation of conventional imaging performance in a research whole-body CT system with a photon-counting detector array //Phys. Med. Biol. 2016c. P. 61 1572–1595.
(2). Si-Mohamed S et al Review of an initial experience with an experimental spectral photon-counting computed tomography system //Nucl. Instrum. Methods A 2017a. P. 873 27–35.
(3). Han-soo L 2017 Samsung unveils next-generation radiology tech in us Korea Biomedical Review (Seoul, Korea: The Korean Doctors' Weekly Co., Ltd.) (available at: www.koreabiomed.com/news/articleView.html?idxno=1981) (Accessed: 9 Feb 2020).
(4). Yu Z, Leng S, Kappler S, Hahn K, Li Z, Halaweish A F, Henning A and McCollough C. H Noise performance of low-dose CT: comparison between an energy integrating detector and a photon counting detector using a whole-body research photon counting CT scanner //J. Med. Imaging. 2016a. P. 3 043503
(5). Pourmorteza A, Symons R, Reich D, Bagheri M, Cork T, Kappler S, Ulzheimer S and Bluemke D Photon-counting CT of the brain: in vivo human results and image-quality assessment //AJNR Am. J. Neuroradiol. 2017. P. 38 2257–2263.
(6). Symons R et al Quarter-millimeter spectral coronary stent imaging with photon-counting CT: initial experience J. Cardiovasc. //Comput. Tomogr. 2018a. P. 12 509–615.
(7). Symons R, Reich DS, Bagheri M, Cork TE, Krauss B, Ulzheimer S, Kappler S, Bluemke D. A, Pourmorteza A Photon-counting computed tomography for vascular imaging of the head and neck: first in vivo human results Invest. //Radiol. 2018b. 53 135–142. 64.
(8). Kalender W A, Kolditz D, Steiding C, Ruth V, Lück F, Rößler A C and Wenkel E Technical feasibility proof for high-resolution low-dose photon-counting CT of the breast //Eur. Radiol. 2017. P. 27 1081–6.
(9). 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 E Inter national 2020. P. 116. 102336.
(10). D. Jumanazarov, A. Alimova, A. Abdikarimov, J. Koo, H. F. Poulsen, U. L. Olsen, M. Iovea, Material classification using basis material de composition from spectral x-ray ct, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section //A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2023. P. 1056 168637.
(11). The Organisation for Economic Co-operation and Devel opment. Computed tomography (CT) exams (indicator). OECD website.
https:data.oecd.org/healthcare/computedtomography-ct-exams.htm.
Published 2018. Accessed March 23.