

RENTGEN TOMOGRAFIYASIDA CHEKLANGAN MA'LUMOTLAR SHAROITIDA TASVIRNI TIKLASHNING MATEMATIK MODELLARI VA ITERATSION ALGORITMLARI

Allamuratova Nilufar Kuat qizi¹

¹Toshkent axborot texnologiyalari universiteti

E-mail: 1ferouduke@gmail.com

DOI: 10.61587/mmit.tiue.uz.v1i1.428

Annotatsiya. Rentgen kompyuter tomografiyasi (KT)da tasvirni tiklash masalasi ko'pincha cheklangan ma'lumotlar sharoitida (kam burchakli proyeksiyalar, qisqa skan vaqti, past doza yoki qisman ko'rish maydoni) yechiladi. Bunday holatda klassik filtrlangan orqaga proyeksiya (FBP) usuli artefaktlar va shovqin kuchayishi sababli barqaror natija bermaydi. Ushbu maqolada cheklangan ma'lumotlar sharoitida rekonstruksiya uchun matematik modellar va iteratsion algoritmlar tahlil qilinadi hamda ularning amaliy samaradorligi muhokama etiladi. Asosiy e'tibor algebraik rekonstruksiya oilasiga mansub ART (Algebraic Reconstruction Technique), SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) va SART (Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique) usullariga qaratiladi. Shuningdek, ill-posed teskari masalani barqarorlashtirish uchun Tikhonov regularizatsiyasi va onunig parametr tanlash tamoyillari ko'rib chiqiladi. Simulyatsiya va tajriba ma'lumotlari asosida iteratsiyalar soni, shovqin darajasi va proyeksiya yetishmasligi rekonstruksiya aniqligiga qanday ta'sir qilishi metrikalar (RMSE, PSNR, SSIM) orqali baholanadi. Natijalar iteratsion yondashuvlar cheklangan ma'lumotlarda artefaktlarni kamaytirishi, biroq regularizatsiya va to'xtash mezonlari noto'g'ri tanlansa, silliqilanish yoki shovqin kuchayishi yuz berishini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: kompyuter tomografiyasi, cheklangan ma'lumotlar, iteratsion rekonstruksiya, ART, SIRT, SART, Tikhonov regularizatsiyasi, teskari masalalar, yarim-yaqinlashuv.

MATHEMATICAL MODELS AND ITERATIVE ALGORITHMS FOR IMAGE RECONSTRUCTION UNDER LIMITED DATA CONDITIONS IN X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY

Allamuratova Nilufar Kuat qizi¹

¹Tashkent University of Information Technologies

E-mail: 1ferouduke@gmail.com

Abstract. The problem of image reconstruction in X-ray computed tomography (CT) is frequently encountered under limited data conditions, such as sparse-view projections, short scan times, low-dose radiation, or truncated fields of view. In such scenarios, the classical Filtered Back-Projection (FBP) method fails to provide stable results due to severe artifacts and noise amplification. This paper analyzes mathematical models and iterative algorithms for reconstruction under data-starved conditions and discusses their practical efficacy. Primary focus is placed on the algebraic reconstruction family, specifically ART (Algebraic Reconstruction Technique), SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique), and SART (Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique). Furthermore, Tikhonov regularization and its parameter selection principles are examined to stabilize the ill-posed inverse problem. Based on simulation and experimental data, the impacts of iteration count, noise level, and missing projections on reconstruction accuracy are evaluated using standard metrics (RMSE, PSNR, SSIM). The results demonstrate that while iterative approaches significantly mitigate artifacts in limited data configurations, improper selection of regularization parameters and stopping criteria can lead to either over-smoothing or noise amplification.

Keywords: computed tomography, limited data, iterative reconstruction, ART, SIRT, SART, Tikhonov regularization, inverse problems, semi-convergence.

KIRISH

Rentgen tomografiyasi tasvirlashning eng muhim usullaridan biri bo'lib, u obyektning ichki tuzilishini invaziv bo'lmagan tarzda qatlamma-qatlam tiklash imkonini beradi. KT tizimida rentgen nurlari manbadan chiqib, obyekt orqali o'tadi va detektorda intensivlikning susayishi o'lchanadi; turli burchaklardan olingan proyeksiyalar to'plami asosida kesim yoki 3D hajm rekonstruksiya qilinadi. Tibbiy diagnostikada KT o'pka, yurak-qon tomir, onkologik va travmatologik holatlarni aniqlashda yuqori fazoviy aniqlik va tezkorlik sababli keng qo'llanadi; sanoatda esa nuqsonlarni nazorat qilish va materiallar tahlilida muhim o'rin tutadi.

Tasvirni tiklash jarayoni mohiyatan teskari masala bo'lib, o'lchovlar (proyeksiyalar)dan noma'lum zichlik taqsimotini topishni talab qiladi. Ideal sharoitda bu masala Radon o'zgartirishining teskari operatori orqali yechiladi, ammo real tizimlarda detektor diskretligi, geometriya xatolari, tarqalish, kvant shovqini va harakat artefaktlari sababli model va o'lchovlar o'rtasida nomuvofiqlik paydo bo'ladi. Natijada rekonstruksiya masalasi ko'pincha ill-posed bo'lib, kichik o'lchov xatolari ham yechimda katta og'ishlarga olib kelishi mumkin; shu bois barqarorlashtirish va mos optimallashtirish mezonlari zarur bo'ladi.

Cheklangan ma'lumotlar muammosi KT amaliyotida tez-tez uchraydi: bemor dozasini kamaytirish uchun proyeksiyalar soni qisqartiriladi, skan vaqti cheklanadi, ayrim burchaklar fizik yoki klinik sabablarga ko'ra mavjud bo'lmaydi, yoki ko'rish maydoni to'liq qamrab olinmaydi. Bunday sharoitda ma'lumotlar to'plami to'liq Radon fazosini qoplamaydi, natijada rekonstruksiya noaniqligi ortadi va chiziqli artefaktlar, "streak" izlar hamda kontrast yo'qolishi kuzatiladi. Muammo shundaki, yetishmayotgan proyeksiyalarni "to'ldirish" yagona yechimga ega emas; qo'shimcha aprior ma'lumot kiritilmasa, yechimlar sinfi juda keng bo'lib qoladi.

Shu nuqtai nazardan iteratsion rekonstruksiya algoritmlari cheklangan ma'lumotlarda muhim afzalliklarga ega. Ular fizik o'lchov modelini, shovqin statistikasini va regularizatsiya funksiyalarini birlashtirib, maqsad funksiyasini minimallashtirish orqali yechim topadi. Iteratsion yondashuvlar FBPga nisbatan hisoblash jihatdan qimmatroq bo'lsa-da, osongina artefaktlarni kamaytirish, shovqinga chidamlilikni oshirish va geometriyadagi murakkabliklarni hisobga olish imkonini beradi. Ayniqsa ART/SIRT/SART kabi algebraik usullar hamda gradientga asoslangan optimallashtirish (steepest descent, conjugate gradient) cheklangan burchak va siyrak proyeksiyalarda amaliy natija beradi.

Ushbu tadqiqotning maqsadi cheklangan ma'lumotlar sharoitida KT rekonstruksiyasi uchun matematik modellarni tizimli bayon qilish, ART, SIRT va SART algoritmlarining yangilanish qoidalarini taqqoslash hamda Tikhonov regularizatsiyasi yordamida barqaror yechim olish shartlarini tahlil qilishdan iborat. Ilmiy yangilik sifatida (i) cheklangan burchak va siyrak proyeksiya holatlarida diskret modelning shartlanganligi (conditioning) va regularizatsiya parametri o'rtasidagi bog'liqlikni metrikalar orqali yoritish, (ii) iteratsiyalar soni va to'xtash mezonlarining rekonstruksiya sifatiga ta'sirini amaliy tavsiyalar ko'rinishida umumlashtirish, (iii) bir xil hisoblash byudjeti sharoitida ART/SIRT/SARTning sifat-tezlik kompromissini baholash ko'zda tutiladi.

METODLAR

KTda obyektning kesimdagi yutilish koeffitsienti $f(x, y)$ uzluksiz funksiya sifatida qaraladi. Ideal parallel nur geometriyasida detektorda o'lchanadigan proyeksiya qiymati chiziqli integral bilan ifodalanadi:

$$p(\theta, s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(s \cos \theta - t \sin \theta, s \sin \theta + t \cos \theta) dt$$

Bu ifoda obyekt bo'ylab nur yo'li bo'yicha yutilishning yig'indisini beradi. Amaliy tizimlarda fan-beam yoki cone-beam geometriyalar qo'llanadi, biroq ularning hammasi umumiy ko'rinishda chiziqli operator orqali yoziladi:

$$p = Af + \varepsilon$$

bu yerda A - proyeksiyalash operatori, ε - o'lchov xatosi va shovqin. Cheklangan ma'lumotlarda A operatori to'liq axborotni bermaydi, natijada yechimning barqarorligi pasayadi va rekonstruksiya uchun qo'shimcha cheklovlar kiritish talab etiladi.

Uzluksiz model amaliy hisoblash uchun diskretlashtiriladi. Tasvir f piksel/voxel qiymatlaridan tuzilgan $x \in \mathbb{R}^n$ vektor bilan, proyeksiyalar esa $b \in \mathbb{R}^m$ vektor bilan ifodalanadi. Shunda rekonstruksiya masalasi chiziqli tenglamalar sistemasiga keladi:

$$Ax = b + \eta$$

bu yerda $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ - sistem matritsasi bo'lib, uning a_{ij} elementi i - proyeksiya nuri j - piksel orqali qancha masofa o'tishini bildiradi. Cheklangan burchak holatida A ning qatorlari ma'lum yo'nalishlarda yetishmaydi; siyrak proyeksiya (sparse-view) holatida esa m kamayadi. Har ikkala holatda ham A yomon shartlangan bo'lib, kichik η shovqin ham yechimda katta tebranishlar keltirib chiqaradi. Shu sababli rekonstruksiya odatda quyidagi minimallashtirish ko'rinishida qo'yiladi:

$$\min_x \|Ax - b\|_2^2$$

yoki shovqin statistikasi hisobga olingan holda mos ehtimollik mezonlari (data fidelity) bilan birga.

Tikhonov yondashuvi ill-posed masalani barqarorlashtirish uchun maqsad funksiyasiga silliqlovchi penalizatsiya qo'shadi:

$$\min_x \|Ax - b\|_2^2 + \lambda \|Lx\|_2^2$$

Bu yerda $\lambda > 0$ - regularizatsiya parametri, L esa aprior modelni ifodalovchi operator. λ katta bo'lsa, yechim silliqlashadi va shovqin kamayadi, ammo mayda detallar yo'qolishi mumkin; λ kichik bo'lsa, ma'lumotga moslik ortadi, lekin shovqin va artefaktlar kuchayadi. Parametr tanlash uchun L-egri, umumlashtirilgan kross-validatsiya yoki shovqin darajasiga asoslangan diskrepansiya prinsipi kabi usullar qo'llanadi. Tikhonov modeli iteratsion algoritmlar bilan birga ishlatilganda, yangilanish qoidalariga $\lambda L^* Lx$ gradienti qo'shib, yechimning barqarorligi sezilarli oshadi.

Algebraik usullar $Ax = b$ sistemasini iteratsion tarzda yechishga asoslanadi va cheklangan ma'lumotlarda moslashuvchanligi bilan ajralib tutadi:

ART (Algebraic Reconstruction Technique) - Kaczmarz turidagi ketma-ket proyeksiyalash usuli bo'lib, har bir iteratsiyada bitta o'lchov tenglamasi bo'yicha tuzatish kiritadi:

$$x^{k+1} = x^k + \omega \frac{b_i - a_i^* x^k}{\|a_i\|_2^2} a_i$$

bu yerda a_i^* - A ning i - qatori, ω - relaksatsiya koeffitsienti. ART tez yaqinlashishi mumkin, ammo shovqinga sezgir va tartib ga bog'liq.

SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) - bursiya proyeksiyalar bo'yicha xatolarni bir vaqtda hisoblab, o'rtacha tuzatish kiritadi:

$$x^{k+1} = x^k + \omega C A^* R(b - Ax^k)$$

bu yerda R va C - qator/ustun bo'yicha normallashtirish matritsalar. SIRT barqarorroq, lekin odatda ARTga nisbatan sekinroq yaqinlashadi.

SART (Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique) - ARTning tezkorligi va SIRTning barqarorligini uyg'unlashtiradi; proyeksiyalar odatda burchak bloklari bo'yicha yangilanadi. Amaliyotda SART cheklangan burchak va siyrak proyeksiyalarda artefaktlarni

kamaytirishda samarali bo'lib, relaksatsiya va bloklash strategiyasi orqali sifat-tezlik kompromissini boshqarish mumkin.

Rekonstruksiya masalasi ko'pincha optimallashtirish sifatida qaraladi:

$$\min_x \Phi(x) = D(Ax, b) + \lambda R(x)$$

Bu yerda D - ma'lumotga moslik (masalan, kvadrat norma yoki Poisson log-likelihood), $R(x)$ — regularizator. Gradientga asoslangan usullarda yangilanish

$$x^{k+1} = x^k - \alpha_k \nabla \Phi(x^k)$$

ko'rinishida bo'lib, α_k qadam uzunligi chiziqli qidiruv yoki oldindan tanlangan jadval orqali belgilanadi. Kvadrat maqsad funksiyalarida kon'yugat gradient (CG) yoki LSQR kabi Krylov usullari tez yaqinlashadi. Cheklangan ma'lumotlarda muhim masala — to'xtash mezon: iteratsiyalar soni ortishi bilan ma'lumotga moslik yaxshilansa-da, shovqin “o'rganilib” ketishi mumkin; shu bois validatsiya metrikalari, diskrepansiya prinsipi yoki regularizatsiya kuchini iteratsiya davomida moslashtirish (iterative regularization) tavsiya etiladi.

Algoritmarni baholash uchun standart fantomlar (masalan, Shepp–Logan) va soddalashtirilgan klinik kesimlarga o'xshash sintetik obyektlar ishlatiladi. Proyeksiyalar parallel nur modelida turli burchaklar soni bilan generatsiya qilinadi: (i) to'liq burchak qamrovi, (ii) cheklangan burchak, (iii) siyrak proyeksiya. Shovqin Poisson statistikasi va qo'shimcha Gauss komponenti bilan modellashtiriladi; detektor kvantlashuvi va normalizatsiya amallari hisobga olinadi. Rekonstruksiya sifati RMSE, PSNR va SSIM metrikalari bilan, hisoblash samaradorligi esa iteratsiya soni va vaqt bo'yicha baholanadi. Har bir algoritm uchun relaksatsiya koeffitsienti ω , regularizatsiya parametri λ va to'xtash mezonlari bir xil sharoitda tanlanib, adolatli taqqoslash ta'minlanadi.

NATIJARLAR

O'tkazilgan simulyatsiyalar cheklangan ma'lumotlar sharoitida iteratsion rekonstruksiya usullari FBPga nisbatan sezilarli ustunlik berishini ko'rsatdi. To'liq burchak qamrovida barcha usullar yuqori sifatli tasvirlarni tikladi, biroq siyrak proyeksiya va cheklangan burchak holatlarida FBPda kuchli “streak” artefaktlar paydo bo'ldi. ART, SIRT va SART esa ma'lumotga moslikni iteratsion yaxshilab, artefaktlarni kamaytirdi; ayniqsa SART burchak bloklari bo'yicha yangilanish tufayli vizual ravshanlikni tezroq tikladi.

Algoritmalar metrikalar bo'yicha taqqoslanganda, siyrak proyeksiya rejimida SART odatda yuqoriroq SSIM va PSNR qiymatlarini berdi, SIRT esa eng past RMSEga yaqin natijalarni barqaror tarzda ta'minladi. ART dastlabki iteratsiyalarda tez yaxshilanish ko'rsatgan bo'lsa-da, shovqin mavjud bo'lganda metrikalar tebranishi va ayrim yo'nalishlarda chiziqli artefaktlar saqlanib qolishi kuzatildi. Tikhonov regularizatsiyasi qo'shilganda barcha algoritmalarda RMSE pasaydi va SSIM oshdi, ayniqsa cheklangan burchak holatida kontrastning tiklanishi barqarorroq bo'ldi.

Iteratsiyalar soni ortishi bilan ma'lumotga moslik $\|Ax - b\|_2$ monoton kamaydi, biroq rekonstruksiya sifati metrikalari uchun “yarim-yaqinlashuv” hodisasi kuzatildi: ma'lum iteratsiyagacha PSNR/SSIM oshib bordi, undan keyin esa shovqin komponentlari kuchayishi sababli sekin pasayish yoki plato holati yuz berdi. Bu holat ayniqsa ARTda yaqqol ko'rindi; SIRT va SARTda esa normallashtirish va blokli yangilanishlar tufayli optimal iteratsiya oralig'i kengroq bo'ldi. Shuning urhun amaliyotda to'xtash mezonini faqat iteratsiya soni bilan emas, balki validatsiya metrikalari yoki diskrepansiya prinsipi bilan bog'lash maqsadga muvofiq.

Shovqin darajasi oshirilganda, regularizatsiyasiz rekonstruksiyalarda yuqori chastotali tebranishlar va donadorlik kuchaydi. Tikhonov regularizatsiyasi shovqinni sezilarli bostirdi,

ammo λ haddan tashqari katta tanlansa, chegaralar silliqalanib, mayda anatomik detallar yo'qolishi kuzatildi. Optimal λ qiymatlarida SART+Tikhonov kombinatsiyasi shovqin–detal kompromissini eng yaxshi ushlab turdi, SIRT+Tikhonov esa eng barqaror, lekin biroz silliqroq tasvirlar berdi. ART+Tikhonov shovqinga chidamlilikni oshirgan bo'lsa-da, relaksatsiya ω noto'g'ri tanlanganda konvergensiya sekinlashdi.

Natijalar grafik ko'rinishda iteratsiya bo'yicha RMSE/PSNR/SSIM egri chiziqlari, shuningdek rekonstruksiya kesimlarining vizual taqqoslanishi orqali tasdiqlandi. Statistik tahlil bir nechta shovqin realizatsiyalari bo'yicha o'rtacha va dispersiya qiymatlarini hisoblashni o'z ichiga oldi; bu yondashuv algoritmlarning nafaqat o'rtacha sifati, balki barqarorligini ham baholash imkonini berdi.

MUHOKAMA

Olingan natijalar tomografik rekonstruksiya matematik modelning aniqligi hal qiluvchi ahamiyatga ega ekanini ko'rsatadi. Diskret $Ax = b$ modeli nur yo'llari geometriyasi va detektor javobini qanchalik to'g'ri aks ettirsa, iteratsion algoritmlar shunchalik tez va barqaror yaqinlashadi. Cheklangan ma'lumotlarda esa modelning shartlanganligi yomonlashasi; bu holat rekonstruksiya yechimining ko'p variantlilikini oshiradi va aprior cheklovlarisiz natijalar artefaktlarga moyil bo'lib qoladi. Shu sababli “model + regularizatsiya + to'xtash mezon” uchligi yagona tizim sifatida ko'rilishi lozim.

Iteratsion algoritmlar orasida tezlik va aniqlik bo'yicha muvozanat turlicha. ARTning ketma-ket yangilanishi dastlabki bosqichda tez yaxshilanish beradi, bu klinik amaliyotda “tezkor qo'pol rekonstruksiya” uchun foydali bo'lishi mumkin. Biroq ART shovqinga sezgirligi va tartibga bog'liqligi sababli cheklangan burchak holatlarida barqarorlikni yo'qotishi mumkin. SIRT global tuzatish kiritgani uchun barqarorroq, lekin ko'proq iteratsiya talab qiladi. SART esa blokli yangilanish orqali amaliy jihatdan qulay kompromiss beradi: u ko'pincha ARTga yaqin tezlikda, SIRTga yaqin barqarorlikda ishlaydi, ayniqsa sparse-view ssenariylarida.

Regularizatsiya ta'siri natijalarda aniq ko'rindi: Tikhonov penalizatsiyasi shovqinni bostirib, cheklangan ma'lumotdan keladigan noaniqlikni kamaytirdi. Biroq Tikhonovning ℓ_2 tabiatli silliqlashi chegaralarni yumshatishi mumkin; bu holat yuqori kontrastli tuzilmalar uchun muhim. Shuning uchun amaliy tizimlarda Tikhonov ko'pincha boshlang'ich barqarorlashtirish sifatida, keyin esa TV yoki siyraklikka asoslangan regularizatorlar bilan kuchaytirilgan gibrid yondashuvlar sifatida qo'llanildi. Shunga qaramay, Tikhonovning hisoblashda soddaligi va parametrni talqin qilish qulayligi uni cheklangan ma'lumotli KT uchun bazaviy usul sifatida dolzarb qiladi.

Cheklangan burchak va siyrak proyeksiya holatlarida rekonstruksiya sifati asosan yetishmayotgan fazoviy chastotalar bilan bog'liq. Iteratsion algoritmlar ma'lumotga moslikni oshirsa-da, mavjud bo'lmagan yo'nalishlardagi axborotni “yaratib” bera olmaydi; ular faqat aprior farazlar orqali ehtimoliy yechimni tanlaydi. Shu ma'noda, rekonstruksiya sifatini oshirish uchun (i) fizik modelni boyitish (scatter/beam hardening tuzatishlari), (ii) regularizatsiyani moslashtirish, (iii) ma'lumot yig'ish strategiyasini optimallashtirish (burchaklarni adaptiv tanlash) muhim. Natijalarda ko'ringan semi-convergence hodisasi ham cheklangan ma'lumotlarda ayniqsa dolzarb bo'lib, “ko'proq iteratsiya — doim ham yaxshiroq” degan qoidaning noto'g'riligini ko'rsatadi.

Amaliy qo'llanmalar nuqtai nazaridan, iteratsion rekonstruksiya past doza KT, tezkor dinamik tasvirlash va metall implantlar mavjud holatlarda artefaktlarni kamaytirish uchun istiqbolli. Hisoblash xarajatini kamaytirish uchun GPU-parallelizatsiya, proyeksiyalash operatorini tezlashtiruvchi ray-driven yoki distance-driven sxemalar, hamda blokli/inkremental optimallashtirish yondashuvlari qo'llanishi mumkin. Klinik ish jarayonida esa algoritm parametrlarini avtomatik tanlash (masalan, λ va to'xtash mezonini adaptiv baholash)

rekonstruksiya sifatini barqarorlashtiradi va operatorga bog'liqlikni kamaytiradi. Shu bilan birga, iteratsion usullarni chuqur o'rganish bilan birlashtiruvchi "model-based deep reconstruction" yo'nalishi cheklangan ma'lumotlarda yanada yuqori sifatga erishish imkonini beradi..

XULOSA

Ushbu maqolada rentgen tomografiyasida cheklangan ma'lumotlar sharoitida tasvirni tiklash masalasi chiziqli operator modeli $p = Af + \varepsilon$ va uning diskret ko'rinishi $Ax = b + \eta$ orqali bayon qilindi. Cheklangan burchak va siyrak proyeksiya holatlarida sistem matritsaning yomon shartlanganligi rekonstruksiya masalasini ill-posed holatga olib kelishi, natijada artefaktlar va shovqinga sezgirlik ortishi ko'rsatildi. Shu muammoni yumshatish uchun iteratsion rekonstruksiya va regularizatsiya yondashuvlari zarurligi asoslandi.

Taqqoslashlar shuni ko'rsatdiki, ART, SIRT va SART algoritmlari orasida SART ko'pincha sifat-tezlik kompromissi bo'yicha eng qulay natijani beradi: u sparse-view va limited-angle ssenariylarida artefaktlarni tezroq kamaytiradi va metrikalar bo'yicha barqaror yaxshilanish ko'rsatadi. SIRT eng barqaror rekonstruksiyaning ta'minlab, shovqin realizatsiyalariga nisbatan kamroq tebranishga ega bo'ldi, biroq ko'proq iteratsiya talab qildi. Tikhonov regularizatsiyasi barcha usullarda shovqinni bostirish va yechimni barqarorlashtirishda samarali bo'lib, parametr λ va to'xtash mezonini to'g'ri tanlash hal qiluvchi omil ekanligi aniqlandi.

Tadqiqot natijalari past doza va tezkor KT protokollarida rekonstruksiya sifatini oshirish, artefaktlarni kamaytirish hamda hisoblash resurslarini oqilona taqsimlash uchun amaliy ahamiyatga ega. Kelgusida (i) Tikhonovdan tashqari TV va siyraklikka asoslangan regularizatorlarni ART/SIRT/SART bilan gibridlashtirish, (ii) adaptiv burchak tanlash va ma'lumot yig'ishni optimallashtirish, (iii) modelga asoslangan iteratsion rekonstruksiyaning chuqur o'rganish bilan integratsiyalash orqali cheklangan ma'lumotlarda yanada yuqori aniqlik va barqarorlikka erishish istiqbollari mavjud.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Kak, A. C., & Slaney, M. (2001). Principles of Computerized Tomographic Imaging. SIAM.
2. Natterer, F. (2001). The Mathematics of Computerized Tomography. SIAM.
3. Herman, G. T. (2009). Fundamentals of Computerized Tomography: Image Reconstruction from Projections (2nd ed.). Springer.
4. Gordon, R., Bender, R., & Herman, G. T. (1970). Algebraic reconstruction techniques (ART) for three-dimensional electron microscopy and X-ray photography. Journal of Theoretical Biology, 29(3), 471–481.
5. Andersen, A. H., & Kak, A. C. (1984). Simultaneous algebraic reconstruction technique (SART): A superior implementation of the ART algorithm. Ultrasonic Imaging, 6(1), 81–94.
6. Gilbert, P. (1972). Iterative methods for the three-dimensional reconstruction of an object from projections. Journal of Theoretical Biology, 36(1), 105–117.