

АНОТАЦІЯ

Даник А. Ю. Фізичні основи мінімізації дозового навантаження на пацієнта при корекції впливу розсіяного випромінювання у рентгенівській діагностиці. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» (10 – Природничі науки). – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, МОН України, Київ, 2021.

Дослідження присвячено розробці методу алгоритмічної компенсації впливу розсіяного випромінювання на якість рентгенівських зображень, що має дозволити покращувати якість рентгенівських зображень на рівні існуючих апаратних рішень без необхідності збільшення дозового навантаження на пацієнта.

Рентгенівське обстеження – дуже поширений метод інтроскопії у медицині в основі якого лежить реєстрація тіньових зображень обстежуваного об'єкта у рентгенівських променях. Супутня шкідлива дія рентгенівського випромінювання вважається допустимою оскільки у ряді випадків альтернатива відсутня.

Взаємодію рентгенівського випромінювання із речовиною об'єкта спрощено можна описати процесами розсіяння та поглинання. Фотони, що пройшли без взаємодії (надалі первинне випромінювання) із речовиною об'єкта, створюють чітке тіньове зображення його внутрішньої структури. Фотони, що зазнали розсіювання - знижують контраст результуючого рентгенівського зображення та спотворюють інформативність діагностики.

Наявні методи вирішення проблеми впливу розсіяного випромінювання на рентгенівські зображення мають недоліки. Зокрема,

застосування протирозсіюючого растру веде до збільшення дозового навантаження на досліджуваний об'єкт, а застосування щілинних схем із висококолімованими рентгенівськими пучками сповільнює діагностику та створює велике теплове навантаження на обладнання, що підвищує ціну і складність обладнання та зменшує його надійність.

Зменшення дозового навантаження на пацієнтів і підвищення контрасту діагностичних зображень є актуальною задачею, вирішенню якої присвячено велику кількість наукових робіт і технічних розробок. Незважаючи на значний інтерес до цієї задачі вона не є у повній мірі вирішеною. Зокрема, актуальною є оптимізація алгоритмів безрастрової компенсації розсіяного випромінювання з метою мінімізації дози, максимізації контрасту тощо.

Метою роботи є розробка алгоритмічного методу корекції впливу розсіяного випромінювання на рентгенівські зображення шляхом математичної обробки вимірних даних, що дозволить підвищити контраст рентгенівських зображень та уникнути недоліків апаратних рішень, зокрема підвищення дозового навантаження. Важливим етапом дослідження є перевірка ефективності запропонованого методу у порівнянні із найпоширенішими у діагностичній практиці апаратними методами корекції впливу розсіяного випромінювання на рентгенівські зображення: варіювання повітряним зазором між досліджуваним об'єктом та детектором; застосуванням протирозсіюючого растру.

Об'єктом дослідження є моделі фізичних процесів впливу розсіяного рентгенівського випромінювання на сформоване рентгенівське зображення, рентгенівські зображення модельних фантомів.

Предметом дослідження є моделі точкових ядер розсіювання та методи компенсації впливу розсіяного рентгенівського випромінювання на сформовані під його впливом рентгенівські зображення.

На основі чисельного моделювання показано, що протирозсіюючі растри по ефективності відсіювання розсіяного випромінювання відповідають значному збільшенню повітряного проміжку між обстежуваним об'єктом та детектором. В роботі було досліджено декілька растрів із типовими для реальної діагностики параметрами (частота растра $N = 60 \text{ см}^{-1}$, товщина пластини $d = 49 \text{ мкм}$, міжпластинна відстань $D = 120 \text{ мкм}$ та декілька значень відношення висоти пластини до її товщини $r = 4, 8, 12$) та різні значення повітряного проміжку від 5 см до 12 м. Виявлено, що растр із найбільшим значенням r покращує зображення на рівні трохи гірше від найбільшого повітряного проміжку. В цілому великий повітряний проміжок здатний гарно послабити розсіяне випромінювання покращуючи результуюче рентгенівське зображення, що досягається завдяки вибірковості, яка сягає значень більше 10. Хороший растр здатен повністю замінити повітряний проміжок зменшуючи розміри сканера, але ціною в рази більшого фактора Баке, що компенсується пропорційним підвищенням дозового навантаження.

Запропонована модель точкового ядра розсіювання гарно описує симетричні та несиметричні ядра розсіювання отримані під час дослідження тренувального фантома завдяки «секторному» доданку (похибка екстраполяції асиметричних ядер в середньому не перевищувала 10%). Асиметрія ядер здебільшого виникає при опроміненні меж поділу різних тканин. Продемонстровано, що при компенсації впливу розсіяного випромінювання важливо використовувати ядра із просторовим розміром не менше за подвійний розмір зображення, що зазнає обробки. Чисельне моделювання із використанням тренувального та тестувального фантомів

показало: точкові ядра обмежені розмірами зображення (розмірами детектора який було використано для отримання рентгенівського зображення та відповідно ядра) втрачають до 30% енергії (розсіяного випромінювання); застосування повного ядра (розміром вдвічі більше за розміри зображення, що зазнає обробки) та екстраполяція неповного ядра (обмеженого розмірами зображення) із використанням запропонованої моделі призводять до схожого результату – зменшення помилки компенсації на 50%.

Запропоновано алгоритм компенсації впливу розсіяного випромінювання на сформовані під його впливом рентгенівські зображення. Метод базується на сегментації рентгенівських зображень та ітеративній деконволюції при використанні бібліотеки ядер розсіювання накопиченої в ході реалістичної симуляції взаємодії рентгенівського випромінювання із модельними фантомами та збагаченої методами кластерного аналізу. Показано, що застосування алгоритмічної компенсації для покращення рентгенівських зображень призводить до 25% покращення контрасту та кратного покращення співвідношення сигнал-шум у випадку математичного фантома та 100% покращення контрасту із кратним покращенням співвідношення сигнал-шум у випадку людиноподібного фантома Зубала без збільшення фактору Бакі. Порівнюючи із результатами застосування протирозсіюючого растра, алгоритмічна компенсація призвела до близького за контрастом та співвідношенням сигнал-шум покращення рентгенівського зображення (різниця в межах 10%) без збільшення фактору Бакі. Таким чином алгоритмічна компенсація дозволяє зменшити дозове навантаження на обстежуваний об'єкт при збереженні інформативності діагностики (рентгенівське обстеження людиноподібного фантома змодельоване в цій роботі продемонструвало значення фактору Бакі близьке до 1.5, що відповідає

підвищенню дозового навантаження сприйнятого людиноподібним фантомом на 50% при застосуванні растра).

Запропонована пара методів кластерного аналізу бібліотеки ядер розсіювання (зменшення розміру бібліотеки ядер розсіювання) та сегментації рентгенівських зображень (класифікація точок рентгенівського зображення у відповідності до бібліотеки ядер розсіювання характерних для даного типу об'єктів):

- кластерний аналіз виконаний модельно-орієнтованим методом суміші гаусових розподілів із такими ознаками: інтеграл від ядра, максимальне та мінімальне значення ядра, координати центру мас ядра, діагональні елементи тензора інерції та напівширина ядра призводить до поділу зображень на більш зв'язні ділянки ціною включення до одного кластера «далекі» ядра (ядра, що за евклідовою відстанню ближче до центроїду іншого кластеру).
- кластерний аналіз виконаний класичним методом к-середніх для значень ядер із прямим обрахунком евклідової відстані між ядрами (ознаки – значення ядра в усіх точках детектора) призводить до кращого розподілу ядер по кластерах ціною поділу рентгенівського зображення на менш зв'язні ділянки.

Обидва зазначених фактори вагомі в рамках запропонованого алгоритму компенсації та в залежності від типу об'єкта можуть зіграти важливу роль при компенсації впливу розсіяного випромінювання. Алгоритм компенсації вирішує некоректно поставлену задачу та краще визначений при розбитті рентгенівського зображення на невелику кількість зв'язних областей. В рамках цієї роботи було виявлено меншу помилку (10% проти 5% у випадку оптимального розбиття) компенсації при застосуванні методу к-середніх та прямої евклідової відстані між ядрами для оптимального зменшення розмірів

бібліотеки розсіювання. Зокрема виявлено, що оптимальним є розбиття зображення грудної клітки людиноподібного фантома на 5 - 8 областей.

Класифікатор, побудований на основі машини опорних векторів із використанням набору базових ознак: координат точки на зображенні, значення променевого інтегралу для точки, та додаткових ознак, що підкреслюють краї: центр мас та похідна порашовані у околі точки, показав достатню для якісної компенсації точність класифікації у випадку тестувального фантому (у випадку оптимального розбиття помилка не перевищує 5%) та людиноподібного фантому Зубала. Серед розглянутих методів побудови класифікатора – метод *C-svc* із лапласовим ядром та *Spro-svc* із лапласовим ядром дали найкращий результат.

Ключові слова: Рентгенівське зображення, розсіяне рентгенівське випромінювання, точкові ядра розсіювання, кластерний аналіз, сегментація, Gate.

ANNOTATION

Danyk A. Y. Physical bases for scattered radiation correction in X-ray imaging. — Qualifying scientific work on the rights of the manuscript. Thesis for the degree of PhD (Doctor of Philosophy) according to the specialty 105 – “Applied physics and nanomaterials” (10 Natural sciences). – Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The present work is devoted to the development of an algorithmic scattering correction method for improving the quality of X-ray images obtained using existing hardware solutions without the need to increase the patient absorbed dose.

X-ray study is a very common medical introsopic method based on registration of investigated object’s shadow images in X-rays. Concomitant harmful

effects of X-rays are considered acceptable because there is no alternatives in the most cases.

The interaction of X-rays with the object's matter can be described in terms of the scattering and absorption processes. Photons that have passed through the object without interaction with objects' matter (a primary radiation hereinafter) provide a clear shadow image of the objects' internal structure. Scattered photons reduce the contrast of the resulting X-ray image and distort the informativeness of the diagnosis.

Existing solutions for the scattered radiation problem haven their drawbacks. In particular application of an anti-scattering grid leads to the dose increase and application of the slit schemes with highly collimated X-ray beams slows diagnostic procedure providing a large heat load on the equipment that increases the cost and complexity of equipment and reduces its reliability in turn.

Reducing the dose and increasing the diagnostic images contrast is an actual problem and numerous scientific works and technical developments are devoted to its solution. Despite considerable interest in this problem, it is not fully solved. In particular, it is important to optimize the algorithms for non-grid compensation of scattered radiation in order to minimize the dose, maximize contrast, etc.

The aim of the present work is development of an algorithmic method for correcting the effects of scattered radiation on X-ray images by mathematical processing of measured data that increase the contrast of X-ray images while avoiding the shortcomings of hardware solutions, including dose increasing. An important stage of the study is to proof the efficiency of the proposed approach in comparison with the most common hardware approaches for correcting the effects of scattered radiation on X-ray images used in diagnostic practice: variation of the air gap between the object and the detector; using an anti-scattering grid.

The object of the research are models of physical processes of scattered X-ray radiation effect on the formed X-ray image, X-ray images of model phantoms.

The subject of the research is the models of scattering point-spread functions (scattering kernels) and methods of scattered radiation compensation on the X - ray images.

The anti-scatter grid efficiency is comparable to large air gapping (increasing the distance between the examined object and the detector), that was demonstrated by the results of numerical simulations. Several grids with parameters typical for real diagnostics (grid frequency $N = 60 \text{ cm}^{-1}$, plate thickness $d = 49 \text{ }\mu\text{m}$, interplate distance $D = 120 \text{ }\mu\text{m}$ and several values of the plates' height to thickness ratios $r = 4, 8, 12$) and different values of the air gap from 5 cm to 12 m were investigated. The largest investigated air gap (12m) has been found to be slightly better than the best investigated anti-scatter grid. The large air gaps could be very useful in scattered radiation suppression due to the high selectivity value (10 achieved for 2m air gap). At the same time, high quality grid is a very compact solution that is able to completely replace the air gap reducing the size of the scanner but with the radiation dose increase trade off.

The proposed model of a scattering kernel well describes symmetric and asymmetric scattering functions obtained during the study of the training phantom due to the "sectoral" term. Asymmetry mostly occurs in the case when the irradiated point lies on the different tissues' boundaries. Scattered radiation compensation is proved to be more effective if kernels with a spatial size of at least twice the size of the image being processed are used. Training and testing phantoms involved numerical simulations proved the follows: scattering kernel limited to the size of the image (the same size as the detector used to obtain an X-ray image) lose up to 30% of energy (scattered radiation); the use of a full kernel (twice the size of the processed image) and extrapolation of an incomplete kernel (limited by the size of the image)

with the help of proposed model provide a similar result - a reduction of the compensation error by 50%.

Proposed scattering correction algorithm is based on the segmentation of the X-ray images and an iterative deconvolution procedure performed using a scattering kernels library sampled during the realistic simulation of the interaction of X-rays with model phantoms and enriched by cluster analysis methods. Algorithmic scattering correction improves mathematical phantom X-ray images contrast up to 25% with several fold increased signal to noise ratio. Zubal phantom X-ray images contrast is increased up to 100% with several times signal to noise ratio increase. These contrast and signal-to-noise improvements occur without Bucky factor increase that was proved by numerical simulation. Algorithmic compensation provided comparable to anti scatter grid quality improvement without Bucky factor increase (SNR and contrast for both methods are demonstrated to differ less than 10%), thus providing lower dose while maintaining the informativeness of the diagnosis on the same level.

Cluster analysis of the scattering kernels library (reducing the size of the scattering kernels library) and segmentation of X-ray images (classification of X-ray image points according to the scattering kernels library characteristic) are the pair of methods proposed to be a core of scattering compensation procedure:

- cluster analysis performed by model-based method of a Gaussian distributions mixture using the following features: kernel integral, maximum and minimum values of the kernel, "mass center" coordinates of the kernel, diagonal elements of the inertia tensor and half-width of the kernel leads to segmentation of the image onto better connected areas despite including the "distinctive" kernels into kernels groups (kernels that are closer in Euclidean distance to the centroid of another cluster).

- cluster analysis performed by the classical method of k-means using direct values of scattering kernels by direct calculation of Euclidean distance between kernels (features are the values of the kernel at all its points) leads to better distribution of kernels among clusters.

Both these approaches are important for the proposed compensation algorithm and, depending on the type of object, one or other could be implied in a compensation procedure. The compensation algorithm solves an ill-posed problem and performs better for the case of X-ray image split into a small number of connected areas. k-means with direct Euclidean distance features set have provided better result solving the scattering kernels library shrunk size task. It was found, that 5-8 is the optimal cluster number for Human chest images (Zubal phantom).

Classifier is based on the support vector machine using a set of basic features: coordinates of a point on the image, the value of the ray integral for the point and extra features that emphasize the edges: mass center and derivative. The classifier is proved to be accurate enough for the scattering compensation procedure: in the case of optimal X-ray image segmentation the error is not exceed 5%. The C-svc with Laplace kernel and Spoc-svc with Laplace kernel provided the best results among the considered methods of classifier constructing.

Keywords: X-ray image, scattered X-ray radiation, scattering kernel, cluster analysis, segmentation, Gate.

Список публікацій здобувача

1. Danyk, A., Sudakov, O. (2021). Physical bases for determination of scattering kernels from incomplete data in grid-less x-ray imaging. *Nuclear Physics and Atomic Energy*, 22(2).
2. Danyk, A., Sudakov, O. (2021). Scattered X-ray radiation algorithmic compensation procedure in the X-ray imaging as an alternative to hardware methods. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, (4), 114–122. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2021.04.114>.
3. Danyk, A.Y., Sudakov, O.O. (2020). Optimized Estimation of Scattered Radiation for X-ray Image Improvement: Realistic Simulation. *Radioelectron.Commun.Syst.* 63(8), 387–397. <https://doi.org/10.3103/S0735272720080014>
4. Danyk, A. Y., Sudakov, O. O. (2020). Scattered radiation in X-ray imaging: scattering kernels model. *Proceedings of the IX International conference “Medical physics – the current status, problems, the ways of development. Innovation technologies”*, 152-156.
5. Danyk, A. Y., Sudakov, O. O., Radchenko, S. P. (2019). Scattering kernels library size effect on the scattering compensation procedure in X-ray imaging. *Proceedings of the VIII International conference “Medical physics – the current status, problems, the ways of development. Innovation technologies”*, 211-215.
6. Danyk, A., Radchenko, S., Natreba, A., Sudakov, O. (2019). Using clustering analysis for determination of scattering kernels in X-ray imaging. *Proc. 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS*, 1, 211-215. <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2019.8924353>

7. Danyk A. Y., Sudakov O. O., Radchenko S. P. (2018). Scatter reduction and scatter compensation in X-ray imaging: simulation study. *Proceedings of the XIV International Scientific Conference «Electronics and Applied Physics»*, 96.
8. Danyk, A. Y., Sudakov, O. O., Radchenko, S. P. (2018). Scatter reduction in X-ray imaging. *Proceedings of the VII International conference “Medical physics – the current status, problems, the ways of development. Innovation technologies”*, 154-155.
9. Danyk A. (2018). The problem of scattered radiation in X-ray imaging. *Вісник Київського Національного Університету Імені Тараса Шевченка, серія: фізико-математичні науки*.
10. Danyk, A. Y., Radchenko, S., Sudakov, O. O. (2017). Optimization of grid-less scattering compensation in X-ray imaging: Simulation study. *2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 316-320. <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2017.7939770>
11. Danyk, A. Y., Sudakov, O. O. (2015). Optimal number of kernel functions for scattering estimation in x-ray imaging. *Proceedings of the XV International young scientists conference on applied physics*, 158-159.
12. Danyk A. Y., Sudakov O. O. (2015). Determination of kernel functions for scattering estimation in X-ray imaging. *Proceedings of the V International conference “Medical physics – the current status, problems, the ways of development. Innovation technologies”*, 35.

Апробація результатів дисертації

Основні положення дисертаційної роботи доповідалися на 11 конференціях:

1. IX International conference “Medical physics – the current status, problems, the ways of development. Innovation technologies” – September 23-25, 2020, Kyiv, Ukraine.
2. VIII International conference “Medical physics – the current status, problems, the ways of development. Innovation technologies” – September 26-27, 2020, Kyiv, Ukraine.
3. 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS. – September 18-21, 2019, Metz, France.
4. XIV International Scientific Conference «Electronics and Applied Physics» – October 23-26, 2018, Kyiv, Ukraine.
5. VII International conference “Medical physics – the current status, problems, the ways of development. Innovation technologies” – September 27-28, 2020, Kyiv, Ukraine.
6. Conference (competition) of Students’ Projects organized by LIA IDEATE, CNRS, CEA, Paris-Sud University, French Embassy and French Institute in Ukraine - March 7, 2018, Kyiv, Ukraine
7. VI International conference “Medical physics – the current status, problems, the ways of development. Innovation technologies” – September 28-29, 2017, Kyiv, Ukraine.
8. IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) – April 18-20, 2017, Kyiv, Ukraine.

9. Special Semester on Computational Methods in Science and Engineering.
“Workshop 4: Numerics for Stochastic Partial Differential Equations and their Applications”. - December 12-16, 2016, Linz, Austria.
10. XV International young scientists conference on applied physics – June 10-13, 2015, Kyiv Ukraine.
11. V International conference “Medical physics – the current status, problems, the ways of development. Innovation technologies” – September 24-25, 2015, Kyiv, Ukraine.