

ЗОЛОТАРЕВ С. А.¹, ТАРУАТ А. Т.², БИЛЕНКО Э. Г.³

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УРОВНЯ ШУМА НА ТОЧНОСТЬ РЕКОНСТРУКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ИЗДЕЛИЯ

¹ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»

²Белорусский национальный технический университет

³ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»

Традиционная томография является эффективным средством для медицинской диагностики, неразрушающего контроля промышленных конструкций и для проверки качества индустриальных изделий. Томографическая визуализация объектов в случае неполного угла обзора, ограниченного числа проекций и/или недостаточной мощности источника рентгеновского излучения является сильно некорректной обратной задачей. Статья посвящена исследованию случая, когда шум в входных данных существенно влияют на сходимость и качество реконструируемого изображения.

Ключевые слова: итерационные методы; реконструкция изображений; томография.

Введение

В настоящее время для контроля различных отливок сложной формы все чаще применяют промышленную рентгеновскую томографию [1]. Использование трехмерных томографических изображений литейных изделий позволяет не только осуществлять эффективный контроль формы изделий и наличия в них дефектов, но и оказывает принципиальное влияние на промышленные технологии производства сложных изделий машиностроения, замкнув технологический цикл производства в цепочку: автоматизированное проектирование – автоматизированное производство – автоматический контроль. Рентгеновская томография позволила вывести контроль фасонных отливок различных деталей автомобильных и тракторных двигателей на качественно новый уровень. Производство ответственных изделий современного машиностроения: автомобильных, тракторных и авиационных двигателей, вертолетных лопастей, охлаждаемых турбинных лопаток невозможно без использования современных средств измерения линейных размеров. Однако, традиционные средства измерения, незаметные при оценке характеристик отдельных деталей и образцов простейшей формы, неприменимы при измерениях внутри сложных пространственно разветвленных деталей и сборных либо неразборных соединений. Понятно, что штангенциркулем невозможно измерить толщину стенки охлаждаемой турбинной лопатки сложной формы, также как, например, и величину зазора внутри неразборного клапана. Такие задачи решаются с помощью промышленной рентгеновской томографии способной без геометрических искажений и с высокой степенью точности бесконтактно измерить размеры вышеуказанных структурных элементов внутри изделий любой сложности. С ее помощью достижима уникально высокая точность бесконтактного неразрушающего измерения размеров внутренних структурных элементов и их локальных дефектов, соизмеримая с точностью традиционных средств контактного измерения наружных размеров промышленных изделий.

1. Методы статистической реконструкции изображений

Группа статистических алгоритмов реконструкции принадлежит к классу итерационных методов реконструкции. Статистические методы реконструкции обеспечивают различные преимущества, такие как моделирование физических эффектов и учет вероятностного распределения экспериментальных измерений. Недостатком этих методов является то, что они являются более сложными, чем детерминированные итерационные методы и приводят к более высоким вычислительным затратам. Поэтому они в основном используются в тех случаях, когда другие методы не могут удовлетворить требованиям к качеству реконструируемых изображений. Обычно итерационные статистические методы реконструкции широко используются в эмиссионной томографии и более редко в трансмиссионной компьютерной томографии. В 1982 году Шепп представил статистический метод максимального правдоподобия для реконструкции в эмиссионной томографии, который вызвал значительный интерес к статистическим методам реконструкции. В этой работе мы будем использовать статистический метод максимального правдоподобия для трансмиссионной томографии. Рассмотренный ниже вариант его использования основан на работе Фесслера и Ланге [2]. Более конкретно укажем, что наибольший интерес для нас представляет вариант метода максимального правдоподобия на основе выпуклой оптимизации, также предложенный в вышеуказанной работе.

Поскольку статистические алгоритмы относятся к итерационным алгоритмам реконструкции задача реконструкции может быть записана:

$$Ax = p, \quad (1.1)$$

Обратим внимание, что часто используется натуральный логарифм функции правдоподобия, так называемая логарифмическая функция правдоподобия – log-likelihood. В ряде случаев

более удобно работать именно с ней. Так как логарифм является монотонно возрастающей функцией, то логарифмическая функция правдоподобия достигает максимума в тех же самых точках, что и функция правдоподобия (likelihood). Следовательно, логарифмическая функция правдоподобия может быть использована вместо вероятности в методе максимального правдоподобия.

В трансмиссионной томографии необходимо реконструировать значения коэффициентов линейного ослабления μ_j , заданные для каждого вокселя j . Так как μ_j является вероятностью захвата фотона вокселем j , то мы имеем очевидное физическое ограничение $\mu_j \geq 0$. Пуассоновский характер распределения сгенерированного рентгеновского излучения подразумевает, что распределения для различных проекций являются независимыми и что log-likelihood наблюдаемого количества фотонов может быть представлена как

$$L(\boldsymbol{\mu}) = \sum_i \{-d_i \exp(-\mathbf{a}_i, \boldsymbol{\mu}) - Y_i(\mathbf{a}_i, \boldsymbol{\mu})\} + c \quad (1.2)$$

$$\mu_j^{n+1} = \mu_j^n + \mu_j^n \sum_i a_{ij} (d_i \exp(-\mathbf{a}_i, \boldsymbol{\mu}^n) - Y_i) / \sum_i a_{ij} (\mathbf{a}_i, \boldsymbol{\mu}^n) d_i \exp(-\mathbf{a}_i, \boldsymbol{\mu}^n) \quad (1.3)$$

Формула (1.3) обеспечивает статистическое итерационное решение задачи реконструкции изображения, просвечиваемого объекта контроля.

Основными аргументами, которые показывают необходимость развития и дальнейшего исследования итерационных методов и алгоритмов, являются следующие: 1) все они без труда адаптируются для случаев с различными схемами сбора проекционных данных; 2) они являются пригодными для гораздо более широкого круга разнообразных технических задач по сравнению с методами, использующими интегральные преобразования. Существует достаточно широкий перечень томографических задач, где применение итерационных реконструктивных методов обеспечивает гораздо лучшие результаты: реконструкция объектов по ограниченному или неполному набору рентгеновских проекций; реконструкция объектов в ограниченном угловом диапазоне. Основным недостатком этих алгоритмов является относительно невысокая скорость их сходимости и значительное время, необходимое на их выполнение. Это обусловлено тем, что для получения достаточно точного решения часто приходится выполнять десятки, а иногда сотни итераций и обчислять очень большие двумерные и трехмерные массивы данных. В качестве второго недостатка, ограничивающего их использование, можно привести требование наличия большого количества оперативной памяти ПК или рабочей станции, необходимой для хранения реконструируемого изображения, набора рентгеновских проекций, а также коэффициентов проекционной матрицы. Одним из способов преодоления этих проблем является использование массивно-параллельных суперкомпьютеров. Можно сказать, что их появление на рынке во многом обусловлено потребностью разработки и использования новых параллельных итерационных

В уравнении (1.2) d_i – ожидаемое количество фотонов выходящих из источника рентгеновского излучения и попадающих в i – ый пиксель рассматриваемой проекции; c – несущественная константа; $\boldsymbol{\mu}$ – вектор коэффициентов ослабления μ_j ; \mathbf{a}_i – вектор длин пересечений луча, выходящего из источника и попадающего в i – ый пиксель рассматриваемой проекции с вокселями, принадлежащими просвечиваемому объекту; и $(\mathbf{a}_i, \boldsymbol{\mu})$ – скалярное произведение двух векторов, то есть

$$(\mathbf{a}_i, \boldsymbol{\mu}) = \sum_j a_{ij} \mu_j.$$

В вышеуказанной работе Ланге предложил модифицированный алгоритм для расчета логарифмической функции правдоподобия, который позволил записать в конечном виде алгоритм вычисления вектора $\boldsymbol{\mu}$, обеспечивающего минимизацию log-likelihood.

алгоритмов, необходимых для решения томографических задач большой размерности.

Итерационные методы применяются главным образом для задач очень большой размерности, которыми, как правило, являются задачи компьютерной томографии. В зависимости от геометрии сбора исходной информации, выбора способа дискретизации области восстановления и вида ортогональных рядов получаем различные виды СЛАУ, которые решаются либо прямыми методами, либо итерационными. Важно при этом отметить, что не существует общего правила выбора наилучшего метода решения. Выбор эффективного метода решения зависит от характерных свойств конкретно решаемой задачи и архитектуры компьютера. Таким образом, все эти методы сводят задачу восстановления к решению СЛАУ (1.1), то есть, казалось бы, к стандартной задаче вычислительной линейной алгебры. Однако применительно к проблеме реконструкции изображения данная задача имеет ряд характерных особенностей: размерность системы чрезвычайно велика: как правило, число уравнений и неизвестных порядка $10^7 - 10^{10}$; проекционная матрица $A = (a_{ij})$ является весьма разреженной, поскольку каждый луч пересекает очень незначительное число вокселей, поэтому более 90% ее элементов равно нулю. При этом отличные от нуля элементы матрицы A , как правило, не образуют никакой определенной упорядоченной структуры для того, чтобы можно было применить какой-нибудь из известных методов решения систем линейных алгебраических уравнений с разреженными матрицами; матрица A является прямоугольной размера $m \times n$, причем $m \neq n$, u , как правило, $m < n$. В последнем случае система является недоопределенной и, как следствие, система уравнений (1.1) является неустойчивой относительно задания начальных данных

1. Реконструкция изображения металлического прута, представленного польской стороной

Профессором Зеноном Тартаковским была привезен из Польши металлический прут с разме-

рами 10x10x50 миллиметров, изготовленный на 3D принтере с применением аддитивных технологий. Фотография прута представлена на рисунке 3.1.

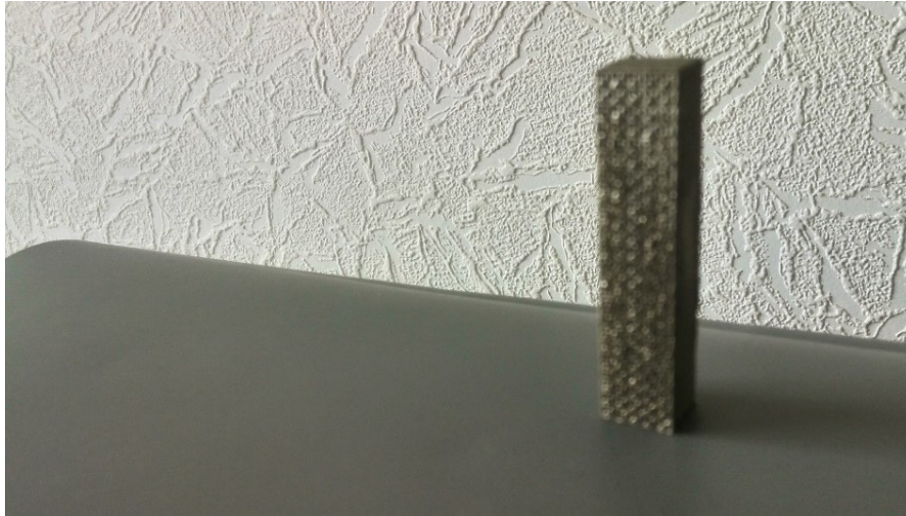


Рисунок 1.1. – Металлический образец, изготовленный польской стороной с использованием аддитивных технологий

Для осуществления рентгеновского сканирования вышеописанного экспериментального образца была использована рентгеноскопическая система X-Cube Compact. X-Cube выпускается в двух моделях: X-Cube Compact и X-Cube XL. Каждая из них может быть оборудована рентгеновскими

трубками с напряжением 160 кВ или 225 кВ, различными манипуляторами грузоподъемностью до 100 кг. На рисунке 1.2 показаны рентгеновские проекции тестируемого образца для углов сканирования: 0°, 45° и 90°.

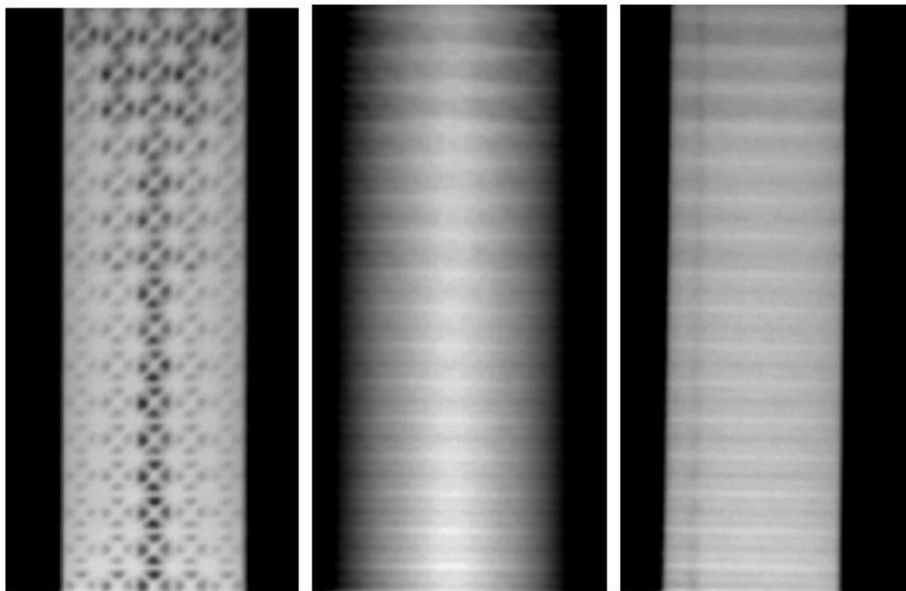


Рисунок 1.2. – рентгеновские проекции экспериментального образца для углов 0°, 45° и 90°

Всего на установке X-Cube Compact было снято 1600 проекций через угловой интервал 0,225°. Для проверочной томографической реконструкции было использовано 400 рентгеновских проекций с

угловым шагом 0,9°. На рисунке 1.3 показан перспективный вид реконструированного трехмерного изображения металлического прута.

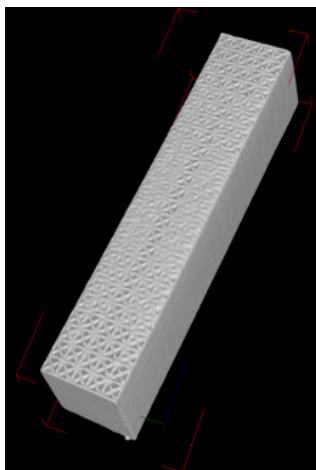


Рисунок 1.3. – перспективный вид реконструированного трехмерного изображения металлического прута

1. Создание зашумленных проекций металлического прута с разным уровнем шума

Для проверки робастности применяемых алгоритмов реконструкции все 1600 рентгеновских проекций были зашумлены гауссовым шумом с раз-

ными уровнями стандартных отклонений: 5, 10, 15 и 25 единиц.

На рисунке 2.1 показана первая проекция с разной степенью зашумления.

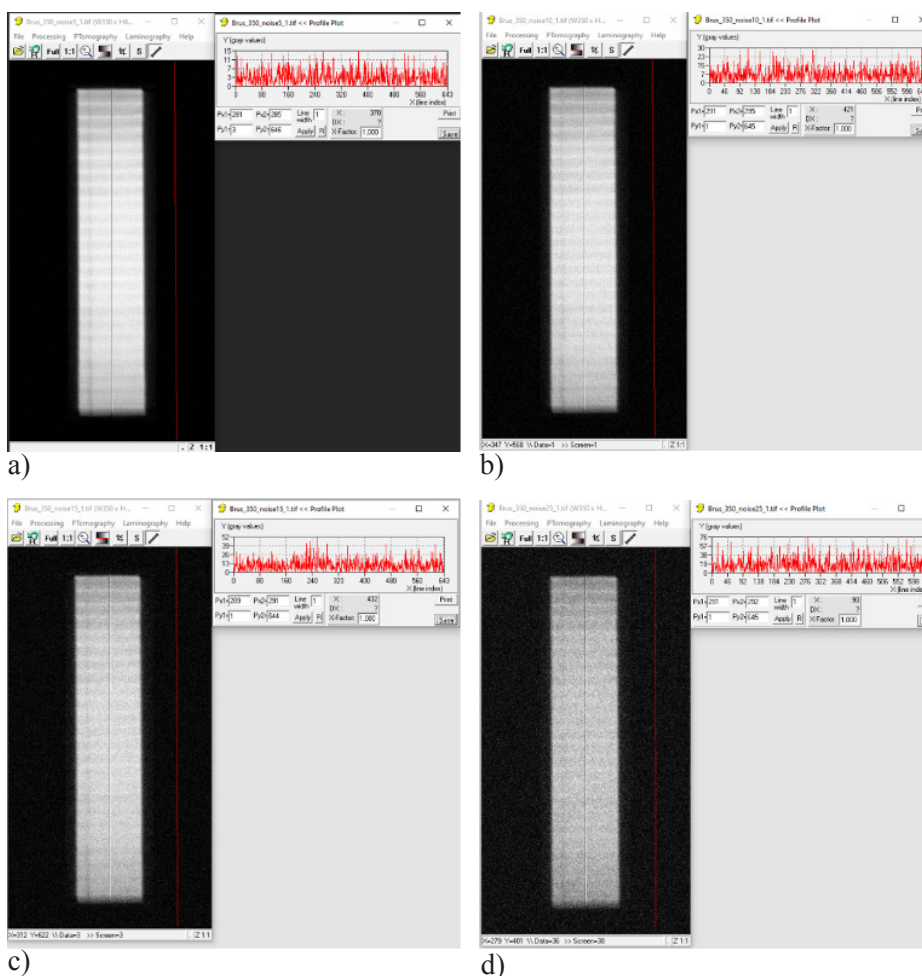


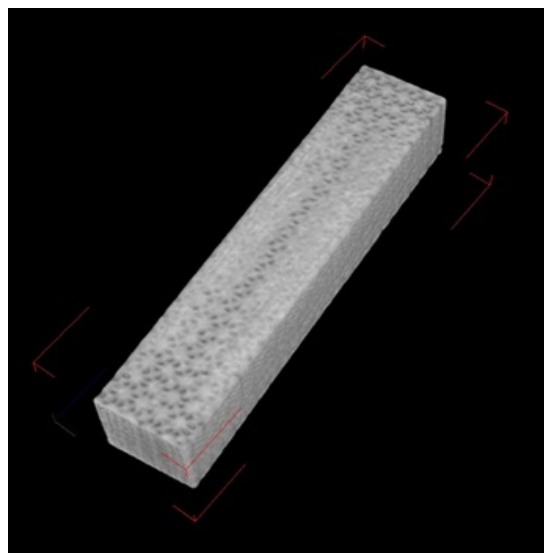
Рисунок 2.1. – Первая проекция зашумленная с разными уровнями Гауссова шума: а) – стандартное отклонение 5 единиц; б) – стандартное отклонение 10 единиц; в) – стандартное отклонение 15 единиц; г) – стандартное отклонение 25 единиц.

На профилях уровней шума хорошо видно, что максимальные уровни шумовой составляющей увеличиваются соответствующим образом.

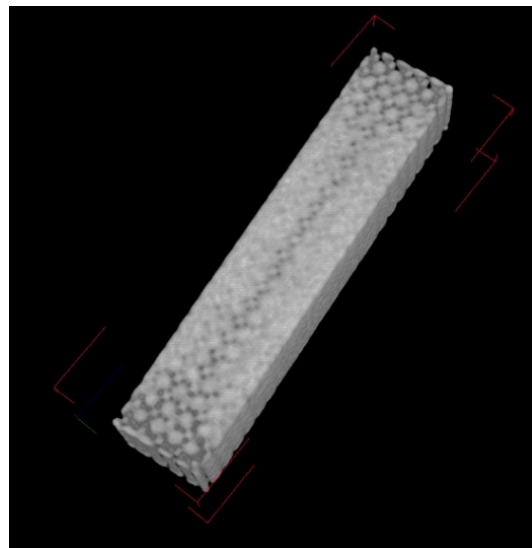
1. Реконструкция трехмерных изображений прута по зашумленным проекциям

Из 1600 рентгеновских проекций, полученных для кругового обзора 360 градусов автома-

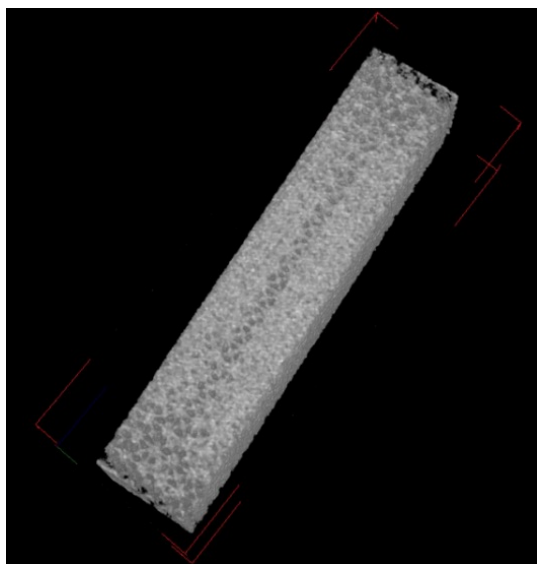
тически были выделены 400 проекций с равными угловыми интервалами. С помощью которых была осуществлена серия реконструкций итерационным методом Максимального правдоподобия (формула 1.3). Ниже на рисунке 3.1 показаны перспективные изображения прута, которые дополнительно были обработаны трехмерным медианным фильтром $7 \times 7 \times 7$ элементов для удаления шума.



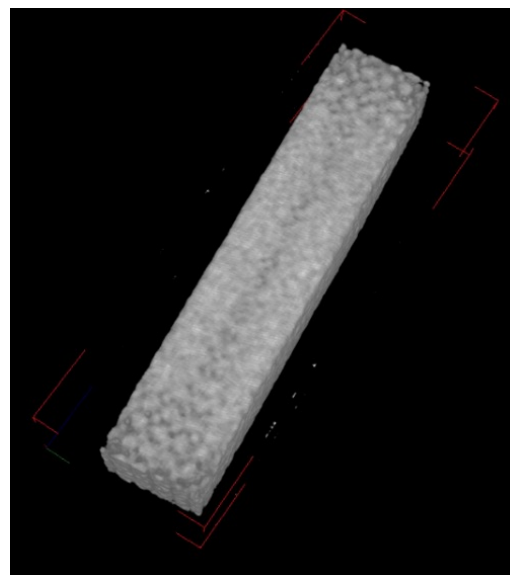
a)



b)



c)



d)

Рисунок 3.1. – перспективные изображения прута, которые дополнительно были обработаны трехмерным медианным фильтром $7 \times 7 \times 7$ элементов

- a) – стандартное отклонение 5 единиц; b) – стандартное отклонение 10 единиц;
c) – стандартное отклонение 15 единиц; d) – стандартное отклонение 25 единиц.

На рисунке 3.2. показана зависимость ошибки реконструкции от числа итераций для уровня шума со стандартным отклонением 5 единиц.

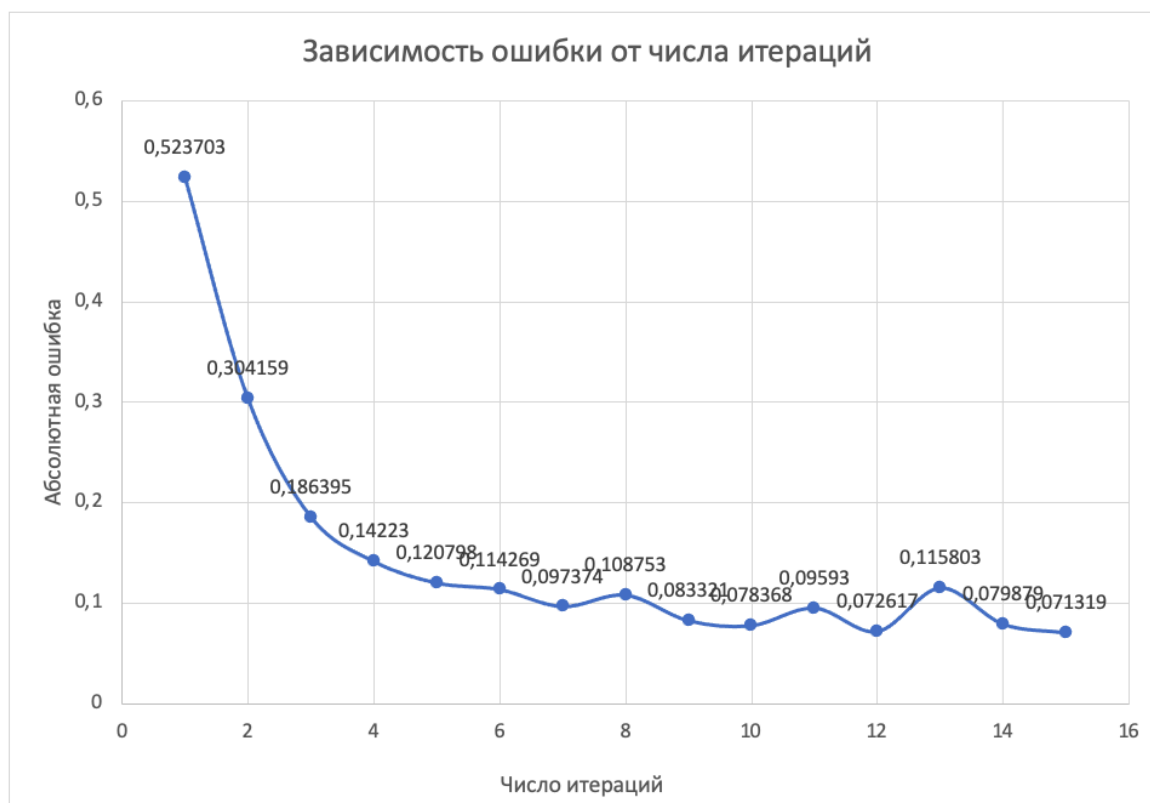


Рисунок 3.2. Зависимость ошибки реконструкции от числа итераций для уровня шума со стандартным отклонением 5 единиц

Зависимости для других величин стандартного отклонения имеют аналогичный характер.

3. Заключение

Результаты проведенных реконструкций свидетельствуют о том, что даже для больших уровней стандартных отклонений можно получить при-

емлемое качество реконструированного изображения при условии использования дополнительной пространственной медианной фильтрации. Сходимость алгоритма является хорошей и уже по 7 - 8 итерациям можно достигнуть необходимого качества реконструируемого изображения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Венгринович В.Л., Золотарев С.А. Итерационные методы томографии //– Минск: «Белорусская наука», – 2009. – 227 с.
2. Lange, K. Globally convergent algorithms for maximum a posteriori transmission tomography / K. Lange, J. A. Fessler // Image Processing, IEEE Transactions. –1995. – Vol. 4, No. 10. – P. 1430– 438.

REFERENCES

1. Vengrinovich V.L., Zolotarev S.A. Iterative methods of a tomography//–Minsk: «The Belarusian science», - 2009. - 227 pages.
2. Lange, K. Globally convergent algorithms for maximum a posteriori transmission tomography / K. Lange, J. A. Fessler // Image Processing, IEEE Transactions. –1995. – Vol. 4, No. 10. – P. 1430– 438.

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF NOISE LEVEL ON THE ACCURACY OF RECONSTRUCTION OF THE IMAGE OF THE INDUSTRIAL PRODUCT

¹State Scientific Institution “Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus”

²Belarusian National Technical University

³State Scientific Institution “Physico-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus”

The traditional tomography is an effective remedy for medical diagnostics, nondestructive control of industrial designs and for quality check of industrial products. Tomographic visualization of objects in case of an incomplete viewing angle, limited number of projections and/or the insufficient power of a source of x-ray radiation is strongly incorrect return task. Article is devoted to case research when noise in input data significantly affect convergence and quality of the reconstructed image.

Keywords: iterative methods; image reconstruction; tomography.



Золотарев Сергей Алексеевич

Образование и квалификация:

1978 – инженер по автоматизации химико-технологических процессов, Воронежский технологический институт.

1992 - кандидат физико-математических наук диссертация (Ph.D. эквивалент) дифференциальные уравнения и математическая физика,

Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси. Название диссертации: «Исследование сложных центров и фокусов 2D автономных голоморфных дифференциальных систем».

2010 - доктор технических наук в области приборов и методов контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси.

Название диссертации: «Реконструктивные оболочечные методы и новые вычислительные алгоритмы промышленной томографии».

Область исследований: Специалист в области: решение обратных задач из неполных данных и качественной теории обыкновенных дифференциальных уравнений. Разработчик алгоритмов и программного обеспечения для КТ объектов с ограниченным углом обзора и небольшим числом проекций. Разработчик оболочечных методов реконструкции изображений кусочно-однородных объектов, имеющих конечное число различных однородных частей. Разработчик новых параллельных алгоритмов с использованием графических процессоров и использованием системы MPI для реконструкции изображений.

Краткая научная биография: 1973 по 1978 год - студент Воронежского технологического института. Факультет автоматизации и комплексной механизации производственных процессов. 1978 по 1985 год - работал инженером на различных фирмах России и Беларуси. 1985 по 1988 г. - Научная деятельность в качестве аспиранта в Институте математики Национальной академии наук Беларуси. 1988 по 2011 год - работал научным сотрудником в Институте прикладной физики Национальной академии наук Беларуси.

С 2011 по настоящее время - главный научный сотрудник в Институте прикладной физики Национальной академии наук Беларуси

Главные научные результаты:

Разработал новые методы реконструкции изображений внутренней структуры свойств объектов и соответствующие параллельные алгоритмы реконструкции, которые могут быть использованы при ограниченном доступе к объекту контроля недостаточной мощности рентгеновского источника излучения.

Zolotarev Sergei Alekseevich

Education and qualifications:

1978 – engineer for the automation of chemical and technological processes, Voronezh Technological Institute.

1992 - Candidate of Physical and Mathematical Sciences thesis (Ph . D . equivalent) differential equations and mathematical physics,

Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus. Thesis title: “Investigation of complex centers and foci of 2 D autonomous holomorphic differential systems”.

2010 - Doctor of Technical Sciences in the field of instruments and methods for monitoring the natural environment, substances, materials and products, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus.

Thesis title: “Reconstructive shell methods and new computational algorithms for industrial tomography”.

Area of research: Specialist in the field: solving inverse problems from incomplete data and the qualitative theory of ordinary differential equations. Developer of algorithms and software for CT objects with a limited viewing angle and a small number of projections. Developer of shell methods for reconstructing images of piecewise homogeneous objects with a finite number of different homogeneous parts. Developer of new parallel algorithms using GPUs and using the MPI system for image reconstruction.

Brief scientific biography: 1973 to 1978 - student at the Voronezh Technological Institute. Faculty of automation and complex mechanization of production processes. 1978 to 1985 - worked as an engineer at various companies in Russia and Belarus. 1985 to 1988 - Scientific activity as a post-graduate student at the Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus. 1988 to 2011 - worked as a researcher at the Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus. From 2011 to the present - Chief Researcher at the Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus

Main scientific results :

Developed new methods for reconstructing images of the internal structure of the properties of objects and the corresponding parallel reconstruction algorithms that can be used with limited access to the object of control of insufficient power of the X-ray source.

E-mail: sergei.zolotarev@gmail.com



Таруат Ахмед Талат Тауфик

Образование: Высшее, в 2018 закончил полный курс Университета Аль-Китаба по специальности “Компьютерные системы коммуникаций”.

Краткая научная биография:

2014-2018 студент Университета Аль-Китаба по специальности “Компьютерные системы коммуникаций”.

2019-2021: Магистратура УО “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники” по специальности: информационные коммуникационные системы и сети. Магистр наук в области инженерного дела. В настоящее время аспирант Белорусского национального технического университета, по специальности 05.13.01 “ Системный анализ, управление и обработка информации “

Автор одной научной публикации в журнале «Modern Science: actual problems of theory and practice».

Исследовательские интересы: компьютерная томография, системный анализ, обработка информации.

Taruat Ahmed Talat Taufik

Education: Higher, in 2018 he completed the full course of Al- Kitab University with a degree in Computer Communication Systems.

Brief scientific biography:

2014-2018 student of Al- Kitab University with a degree in Computer Communication Systems.

2019-2021: Master’s program of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, specialty: information communication systems and networks. Master of Science in Engineering. Currently, Postgraduate student of the Belarusian National Technical University, specialty 05.13.01 “ System Analysis, Management and Information Processing “

Author one scientific publications in the journal “Modern Science: actual problems of theory and practice”.

Research interests: computed tomography, system analysis, information processing.

E-mail: mido@bntu.by



Биленко Эдуард Григорьевич

Образование:

Высшее, бакалавр технических наук.

Краткая научная биография:

В 1999 году окончил полный курс Белорусской государственной политехнической академии (БГПА) по специальности «Технология, оборудование и автоматизация производства».

В 2000 году поступил в аспирантуру при ФТИ НАН Беларуси. В 2004 году окончил аспирантуру по специальности «Материаловедение в машиностроении». В настоящее время работает в ГНУ «ФТИ НАН Беларуси», на должности заместителя заведующего лабораторией.

Основные научные результаты:

Автор пяти статей в научно-технических журналах, десяти научных публикаций с докладами в материалах международных конференций, четырех патентов. Область научных интересов: упрочнение поверхностных слоев материалов, разработка новых композиционных материалов, компьютерное моделирование процессов.

Bilenko Eduard Grigorievich

Education:

Higher, bachelor of technical sciences.

Brief scientific biography:

In 1999 he graduated from the full course of the Belarusian State Polytechnic Academy (BSPA) with a degree in Technology, Equipment and Automation of Production. In 2000, he entered graduate school at the Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus. In 2004, he completed his postgraduate studies with a degree in Materials Science in Mechanical Engineering. Currently he works at the State Scientific Institution “Physical Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus”, as a deputy head of the laboratory.

Main scientific results:

Author of five articles in scientific and technical journals, ten scientific publications with reports in international conference proceedings, four patents. Research interests: hardening of surface layers of materials, development of new composite materials, computer modeling of processes.

E-mail: vmo_bilenko@gmail.com