

УДК 33

DOI: 10.34670/AR.2021.83.37.040

Об использовании рентгеновских цифровых микротомографов**Кича Екатерина Игоревна**

Специалист,

ООО НПО «Гидротехпроект»,

175400, Российская Федерация, Валдай, ул. Октябрьская, 55-а;

e-mail: vereshaginakate@gmail.com

Кича Максим Александрович

Младший научный сотрудник,

НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ,

Военно-морская академия,

197045, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Ушаковская наб., 17/1;

e-mail: rulmaks@bk.ru

Маловик Дмитрий Сергеевич

Младший научный сотрудник,

НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ,

Военно-морская академия,

197045, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Ушаковская наб., 17/1;

e-mail: dimamalovik@gmail.com

Аннотация

Основной задачей томографии как метода исследования является формирование трехмерного изображения исследуемого объекта на базе полученных теневых проекций. По мнению ряда исследований наиболее перспективной сегодня является компьютерная рентгеновская микротомография. Данный метод относится к методам визуализации с применением рентгеновского излучения без разрушения объекта, при этом формируется трехмерная внутренняя микроструктура изучаемого объекта. Микротомография позволяет получать морфометрию и пространственную микроструктуру материалов, тканей или живых объектов, при этом не изготавливаются тонкие срезы с дальнейшим совмещением и нет необходимости в подготовке образцов. Целью данной работы является изучение использования рентгеновских цифровых микротомографов. Для реализации поставленной задачи использовались следующие методы: контент-анализ, литературный обзор, структурно-функциональный метод, системный подход, формализация. В работе рассматриваются вопросы строения рентгеновских цифровых микротомографов, их основные сферы применения, устройство и принцип действия. Также в работе описываются проблемы, которые встречаются при использовании рентгеновских цифровых микротомографов. Главными из них являются потеря фокуса луча рентгена, низкая точность позиционирования изучаемого материала/объекта, маленький размер

фокального пятна. Если не устранять данные проблемы, на получаемых теневых проекциях в конечном результате могут быть искажения, что является неблагоприятным явлением. Получаемым изображениям свойственны такие искажения как обусловленные работой рентгеновской трубки, магнитной оптической системы, рентгеновским детектором, и случайные шумы, которые являются следствием возмущений наружной среды, дискретизации, передачи или процесса квантования.

Для цитирования в научных исследованиях

Кича Е.И., Кича М.А., Маловик Д.С. Об использовании рентгеновских цифровых микротомографов // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2021. Том 11. № 9А. С. 326-334. DOI: 10.34670/AR.2021.83.37.040

Ключевые слова

Рентгеновские цифровые микротомографы, томография, изображения, теневые проекции, искажения.

Введение

В стандартном понимании томография представляет собой метод исследования, позволяющий получать визуализацию нужного слоя изучаемого объекта. Суть способа заключается в последовательном перемещении рентгеновской кассеты и трубки со специализированной пленкой относительно изучаемого объекта в противоположных направлениях. Кассета и труба двигаются синхронно, что позволяет получить четкую визуализацию нужного слоя. Это линейная томография, которая сегодня применяется не так часто, как остальные, более современные и технологичные методы.

Основной задачей томографии как метода исследования является формирование трехмерного изображения исследуемого объекта на базе полученных теневых проекций. Обратная задача томографии заключается в формировании произвольного проекционного вида на базе уже сформированного ранее трехмерного изображения.

На сегодняшний день используются следующие виды томографии:

Сейсмическая.

С применением электромагнитного излучения: рентгеновская (компьютерная томография, рентгеновская компьютерная томография), лазерная, эмиссионная радионуклидная (основана на гамма- излучении), томография в рамках радиодиапазона.

С применением электромагнитных полей: электроимпедансная и магнитно-резонансная.

С применением элементарных частиц: электронная, нейтринная, нейронная, электронная, позитронная.

По мнению ряда исследований наиболее перспективной сегодня является компьютерная рентгеновская микротомография. Данный метод относится к методам визуализации с применением рентгеновского излучения без разрушения объекта, при этом формируется трехмерная внутренняя микроструктура изучаемого объекта. Микротомография позволяет получать морфометрию и пространственную микроструктуру материалов, тканей или живых объектов, при этом не изготавливаются тонкие срезы с дальнейшим совмещением и нет необходимости в подготовке образцов. В результате исследователь получает полную информацию о внутренней пространственной микроструктуре, при этом полностью

сохраняется структура образца изучаемого объекта или жизнь исследуемого подопытного животного [Сырямкин и др., 2012]. Из этого следует, что использование микротомографии открывает дополнительные возможности для исследований. При этом на данный момент в литературных источниках представлено мало сведений о рентгеновских цифровых микротомографах.

Целью данной работы является изучение использования рентгеновских цифровых микротомографов.

Основная часть

Для реализации поставленной задачи использовались следующие методы: контент-анализ, литературный обзор, структурно-функциональный метод, системный подход, формализация.

Рентгеновский цифровой микротомограф (РЦМ) представляет собой специализированное оборудование для построения внутренней структуры изучаемого объекта, как органического, так и неорганического, в основе которой лежат теневые проекции. На данный момент оборудование этого типа характеризуется широкой сферой применения, которые можно разделить на два основных вектора:

Медицина, где микротомографы являются диагностическим оборудованием. Рентгеновская микрокомпьютерная томография широко используется для получения изображений твердых и мягких тканей [Mickiewicz et al., 2015]. Ряд исследователей отмечают, что на данный момент это наиболее эффективный неинвазивный метод диагностики [Davis, 2018].

Промышленность, где микротомографы используются в качестве типа дефектоскопии [Сырямкин и др., 2014].

Современный рентгеновский цифровой микротомограф включает в себя следующие основные блоки:

- Корпус, в который входит источник питания.
- Специализированное программное обеспечение, основной функцией которого является восстановление изображений в 2D и 3D, а также программное обеспечение для диагностики исследуемых материалов.
- Блоки управления.
- Устройство управления. Это может быть персональный компьютер или микроконтроллер.
- Рабочая зона.
- Источник излучения.
- Мехатронная система. Осуществляет позиционирование по трем осям: x , y , z .
- Приемник излучения [Lussani et al., 2015].

Принцип работы рентгеновского цифрового микротомографа заключается в следующем: источник и приемник рентгеновских лучей перемещаются с помощью специализированных исполнительных устройств смещения и шаговых двигателей относительно изучаемого объекта. Движение осуществляется по трем основным осям: x , y , z . Управление мехатронной схемы при этом выполняется через управляющее устройство. В результате исследователь получает теневые проекции требуемого слоя [Бубенчиков и др., 2010].

Шаговые двигатели используются как исполнительные элементы так как обладают рядом преимуществ относительно других типов двигателей:

Не имеют обратной связи, которая нужна для надлежащего управления частотой или положением.

Совместимы со всеми моделями современного оборудования.

Не накапливают ошибки положения.

Шаговые двигатели применяются, чтобы преобразовывать сигналы управляющего типа в дискретное угловое перемещение выходного вала. Угловой шаг при этом строго соответствует порядку и числу следования импульсов управления, которые поступают непосредственно на обмотки статора. Шаговые двигатели являются синхронными, так как в создании электромагнитного момента участвует ротор и статор. Сегодня шаговые двигатели преимущественно используются в системах, где применяется программный электрический привод автоматизированного типа.

Говоря о шаговых двигателях, которые используются в рентгеновских цифровых микротомографах, необходимо учитывать, что их роторы характеризуются выраженным полюсным исполнением. Это проявляется в том, что роторы делятся на реактивные или пассивные и активные, которые обладают постоянными магнитами или обмотку возбуждения.

Рентгеновское излучение, которое вырабатывают РЦМ является электромагнитными волнами, которые имеют длину от 10^{-4} ангстрем до 10^2 ангстрем, что соответствует от 10^{-14} метра до 10^{-8} метра.

Как и в другом рентгеновском оборудовании, в РЦМ излучение получают с помощью рентгеновских трубок, которые представляют собой вакуумные приборы.

Рентгеновское излучение является результатом переходов молекул или атомов в электронных оболочках высокоэнергетического типа или в результате ускорения заряженных частиц. Эти два эффекта можно наблюдать в рентгеновских трубках:

Раскаленные катоды испускают электроны.

Электроны ускоряются, но их скорости недостаточно для испускания рентгеновских лучей.

Электроны ударяются об анод.

Происходит резкое торможение, что ведет к испусканию тормозного рентгеновского излучения. Параллельно с этим электроны выбиваются из внутренних оболочек металлических атомов, которые образуют анод.

Электроны атома заполняют собой образовавшиеся пустые области оболочек.

Происходит испускание рентгеновского излучения.

На сегодняшний день основным материалом для производства анодов является керамика, а участок, где происходит столкновение с электронами, изготавливается из молибдена.

Ускорителя заряженных частиц также могут применяться для получения рентгеновского излучения. Когда пучок частиц отклоняется в магнитном поле, образуется излучение синхронного типа, которое характеризуется сплошным спектром. Рентгеновские лучи можно получить в спектре излучения синхронного типа при условии, что правильном выборе энергии частиц и величины магнитного поля, чтобы они соответствовали друг другу.

Рентгеновские трубки сегодня имеют следующую классификацию по назначению:

Для структурного анализа.

Диагностические.

Для просвечивания различного рода материалов.

Терапевтические.

Перечисленная классификация является условной, так как, к примеру, рентгеновские трубки для просвечивания различного рода материалов могут использоваться с целью терапии рентгеновским излучением. Таким образом, независимо от того, к какому типу трубки относятся по классификации, они могут использоваться и для выполнения других задач.

Каждый из перечисленных видов рентгеновских трубок изготавливается в 3 вариантах:

Без защиты. Это устаревший тип, который сегодня практически не используется.

С защитой. Обладают защитой от неиспользованного излучения.

Безопасные. Их основным предназначением является работа в безопасном кожухе с металлическим заземлением при наличии масляной или воздушной изоляции. Это обеспечивает защиту сразу от поражения высоким напряжением и от неиспользованного излучения.

Рентгеновские трубки, которые применяются в РЦМ, состоят из двух электродов, катода и анода, которые размещаются в баллоне из стекла по оси друг напротив друга. Рентгеновское излучение при этом испускается из средней части трубки в перпендикулярном направлении относительно ее оси.

Однако на сегодняшний день в практике можно встретить и специализированные рентгеновские трубки, которые характеризуются нестандартной конструкцией. В них рентгенооптическая система выстраивается на базе многократного внешнего отражения от поверхностей трубки, при этом поверхности ориентированы к источнику, чтобы достичь наибольший угол захвата. При производстве поверхностей обеспечивается максимальное количество отражений нейтронных и рентгеновских лучей, чтобы угол падения не превышал критического значения.

Многократные отражения дают возможность поворачивать на существенный совокупный угол, который составляет несколько градусов. Из этого вытекает, что рентгеновский луч проникает внутрь ровной пустой рентгеновской трубки (к примеру, трубка может быть выполнена из стекла), и если угол меньше критического угла, рентгеновский луч будет отражаться от поверхностей внутри трубки, при этом на трубочном конце образуется «виртуальный» источник рентгеновского излучения. Таким образом, если рентгеновское излучение направляется через специализированную капиллярную систему, появляется возможность фокусировки рентгеновского пучка в пятно фокуса разного размера.

Применение капиллярной оптической системы дает возможность выполнять «виртуальные» источники излучения с внушительным потоком (их можно охарактеризовать как ультра-яркие), используя при этом классические рентгеновские трубки и оптику. Также это дает возможность создавать сфокусированные или параллельные пучки излучения, которые характеризуются коэффициентом усиления равным сотням единиц при условии низкой энергии около 1.5 кэВ, если длина волны составляет 8 ангстрем и равным тысячам единиц в других ситуациях.

Рассматривая использование рентгеновских цифровых микрофотографов, необходимо учитывать, что в системах спиральных компьютерных томографов операции сканирования и формирования изображения производятся в несколько этапов. Сначала рентгеновская трубка огибает на 360° участок исследуемого объекта, при этом остановка делается через каждые 3°, выполняется перемещение продольного типа. Далее кристаллы йодистого натрия установлена на той же оси, что и излучатель. Их основной задачей является преобразование излучения ионизирующего типа в световое. Преобразованное световое излучение передается на умножители фотоэлектронного типа. После этого видимая часть светового излучения превращается в электросигналы. Электрические сигналы усиливаются и преобразуются в цифры, вводимые в устройство управления. Рентгеновский луч проходит поглощающую среду и становится слабее соответственно плотности тканей, которые расположены на его пути. Рентгеновский луч содержит сведения о степени ослабления в каждой точке сканирования.

В процессе разработки и применения РЦМ имеет ряд проблем. Главными из них являются потеря фокуса луча рентгена, низкая точность позиционирования изучаемого

материала/объекта, маленький размер фокального пятна. Если не устранять данные проблемы, на получаемых теневых проекциях в конечном результате могут быть искажения, что является неблагоприятным явлением.

Изображениям РЦМ свойственны такие искажения как:

Обусловленные работой рентгеновской трубки, магнитной оптической системы, рентгеновским детектором.

Случайные шумы. Являются следствием возмущений наружной среды, дискретизации, передачи или процесса квантования.

Относительно случайных шумов, есть возможность представить модель искажения. Это действие определенного оператора искажения N на первоначальное изображение $a(x,y)$, которое после воздействия шума аддитивного типа образует изображение с искажением $b(x,y)$. В этом случае компенсация должна быть направлена на разработку приближения первоначального изображения на базе полученного изображения с искажением, также должна учитываться информация о рассматриваемом операторе N и аддитивном шуме $c(x,y)$.

Если N относится к трансляционно-инвариантным операторам линейного типа, искажение первоначального изображения может иметь следующий вид:

$$b(x,y)=n(x,y)*a(x,y)+c(x,y)$$

В данном случае $n(x,y)$ выражает искажающий оператор, а « $*$ » применяется для свертки. .

Если происходит потеря фокуса первоначального изображения, наиболее целесообразным решением будет применение фильтров, которые устанавливаются дискретными аппроксимациями дифференциальных операторов с целью определения границ и установления границ на конечном изображении. Это такие фильтры как дискретный лапласион, фильтр Собеля и фильтр Прбита с последующей обработкой полученного изображения, в процессе которой используются операторы морфологического типа.

Остальные искажения, которые обусловлены действия оптической системы, можно компенсировать посредством применения нелинейного оператора Q к элементам искаженного изображения (всего или его определенной части). В итоге может быть сгенерировано приближение первоначального изображения, максимально схожее с первоначальным изображением без искажений. Необходимо отметить, что искажения таких параметров как контрастность и яркость не ведут к утрате информации на полученном изображении с искажением относительно изображения без искажения.

Сегодня совместно с РЦМ зачастую используются алгоритмы коррекции изображений, большая часть которых подразумевает настройку алгоритмических параметров опытным путем или наличие сведений об искажениях. При этом требования коррекции в автоматическом режиме подразумевает получение информации о произошедших искажениях посредством специализированных алгоритмов.

На данный момент ряд разработок по неразрушающему контролю исследуемого материала и аттестации могут быть приспособлены для потребностей выявления и определения искажений изображения. К таким разработкам относятся wavelet-анализ, корреляционные и фрактальные алгоритмы [Сырямкин, Бородин и др., 2012].

Использование фрактальной геометрии позволяет получить эффективный инструмент для более точного и глубокого исследования изображений с сильными искажениями. Необходимо учитывать, что каждое изображение имеет однозначное отражение в коррекции яркости отдельно взятых точек. Из этого следует, что оценка отдельных характеристик искажений изображений может быть выполнена на базе анализа яркостей этих точек. В связи с этим

исследование взаимодействия компонентов изображения с искажением предоставляет возможность получить сведения о искажениях и их характеристиках, которые в целом имели место.

Применение методов фрактальной размерности обусловлено необходимостью получения точных количественных сведений о случившихся искажениях изображения. Такой подход дает возможность выявить степень зашумленности посредством характеристик числового типа, которые можно получить в процессе анализа яркостей частей изображений.

Применение корреляционного анализа при этом открывает дополнительные возможности, с его помощью можно:

Определить признаки искажений изображений посредством сопоставления серий изображений, полученных при шумах разных степеней.

Получить динамику развития искажений изображения в высоком качестве, что в свою очередь открывает возможность изучить процессы искажения на различных изображениях при разных условиях.

Если говорить об алгоритмах сравнения изображения, то среди них необходимо выделить разностный быстрый, разностный стандартный и корреляционный.

Выбор того или иного алгоритма зависит от требований, которые предъявляются к системе в текущих условиях. К примеру, использование корреляционного алгоритма создает условия для получения точных характеристик посредством совершенствования параметров корреляционной функции.

Применение разностного быстрого и разностного стандартного алгоритмов существенно увеличивает быстродействие посредством существенного сокращения вычислительных операций. Если сравнивать участки полученного изображения и эталонного изображения, появляется возможность определения смещения элементарных частей полученного изображения относительно эталона и сформировать карту векторов искажений или смещений. На участках искажений изображений в рамках поля векторов можно выявить «вихри», под которыми понимаются группы векторов различной направленности и длины [Сыряжкин, Титов, 1992].

Если же использовать wavelet-преобразования, то полученные результаты имеют высокую информативность, а также большой объем вычислений, что ведет к избыточности представления результатов относительно других методов преобразований. Это связано с тем, что wavelet-преобразования дают возможность определить относительный вклад для каждой частоты в момент времени посредством определения свертки с версиями wavelet, которые имеют различные масштабы. Из этого вытекает, что осуществляется наблюдение световой эволюции как при преобразованиях Фурье, но не за исследуемый период времени, а по всему интервалу времени. Из этого вытекает, что для информативного разложения исходного сигнала нужно знать его wavelet-преобразование на решетке плоскости времени и частоты [Сыряжкин, Бородин и др., 2012].

Заключение

Таким образом, РЦМ сегодня имеют широкую сферу применения и являются перспективным вектором рентгеновской томографии. Однако использование РЦМ сопряжено с рядом проблем, основной из которых является искажение изображений. Преодолеть данные проблемы возможно посредством детерминации искажений и их характеристик. Сделать это возможно посредством способов, описанных в работе.

Библиография

1. Бубенчиков М.А. и др. Современные методы исследования материалов и нанотехнологий. Томск, 2010. 366 с.
2. ГОСТ 866-41. Трубки рентгеновские электронные.
3. Сырямкин В.И., Бородин В.А. и др. Рентгеновские цифровые микротомографы // Векторы благополучия: экономика и социум. 2012. № 1 (2). С. 86-92.
4. Сырямкин В.И. и др. Анализ изображений, формируемых рентгеновскими микротомографами // Приборостроение. 2012. № 2. С. 7-10.
5. Сырямкин В.И. и др. Цифровой рентгеновский микротомограф для диагностики материалов и элементов бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Решетневские чтения. 2014. № 18. С. 244-246.
6. Сырямкин В.И., Титов В.С. (ред.) Системы технического зрения. Томск, 1992. 367 с.
7. Davis G., Mills D., Anderson P. Real-time observations of tooth demineralization in 3 dimensions using X-ray microtomography // J Dent. 2018. 69. P. 88-92.
8. Lussani F.C. et al. A versatile x-ray microtomography station for biomedical imaging and materials research // Rev Sci Instrum. 2015. 86 (6). 063705.
9. Mickiewicz P. et al. X-ray microtomography-based measurements of meniscal allografts // Orthop Traumatol Surg Res. 2015. 101 (3). P. 319-24.

On the use of X-ray digital microtomographs

Ekaterina I. Kicha

Specialist,
LLC "Gidrotekhproekt",
175400, 55-a, Oktyabrskaya str., Valdai, Russian Federation;
e-mail: vereshaginakate@gmail.com

Maksim A. Kicha

Junior Researcher,
Research Institute of Shipbuilding and Weapons of the Navy,
Naval Academy,
197045, 17/1, Ushakovskaya emb., Saint Petersburg, Russian Federation;
e-mail: rulmaks@bk.ru

Dmitrii S. Malovik

Junior Researcher,
Research Institute of Shipbuilding and Weapons of the Navy,
Naval Academy,
197045, 17/1, Ushakovskaya emb., Saint Petersburg, Russian Federation;
e-mail: dimamalovik@gmail.com

Abstract

The main task of tomography as a method is the formation of a three-dimensional image of the object under study on the basis of the obtained shadow projections. According to a number of studies, the most promising today is computerized X-ray microtomography. This method refers to visualization methods using X-ray radiation without destroying the object, while forming a three-

dimensional internal microstructure of the object under study. Microtomography allows one to obtain morphometry and spatial microstructure of materials, tissues or living objects, while thin sections are not made with further alignment and there is no need for sample preparation. The aim of this work is to study the use of X-ray digital microtomographs. To accomplish this task, the following methods were used: content analysis, literature review, structural-functional method, systems approach, formalization. The paper deals with the structure of X-ray digital microtomographs, their main areas of application, design and principle of operation. The paper also describes the problems that occur when using X-ray digital microtomographs. The main ones are the loss of focus of the X-ray beam, low positioning accuracy of the studied object, and a small size of the focal spot. If these problems are not eliminated, the resulting shadow projections may end up with distortion, which is an unfavorable phenomenon. The resulting images are characterized by such distortions as caused by the operation of the X-ray tube, magnetic optical system, X-ray detector, and random noise, which are the result of disturbances in the external environment, sampling, transmission or quantization process.

For citation

Kicha E.I., Kicha M.A., Malovik D.S. (2021) Ob ispol'zovanii rentgenovskikh tsifrovyykh mikrotomografov [On the use of X-ray digital microtomographs]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economics: Yesterday, Today and Tomorrow], 11 (9A), pp. 326-334. DOI: 10.34670/AR.2021.83.37.040

Keywords

X-ray digital microtomographs, tomography, images, shadow projections, distortions.

References

1. Bubenchikov M.A. et al. (2010) *Sovremennyye metody issledovaniya materialov i nanotekhnologii* [Modern methods of research of materials and nanotechnologies]. Tomsk.
2. Davis G., Mills D., Anderson P. (2018) Real-time observations of tooth demineralization in 3 dimensions using X-ray microtomography. *J Dent.*, 69, pp. 88-92.
3. GOST 866-41. *Trubki rentgenovskie elektronnye* [GOST 866-41. X-ray electronic tubes].
4. Lussani F.C. et al. (2015) A versatile x-ray microtomography station for biomedical imaging and materials research. *Rev Sci Instrum.*, 86 (6), 063705.
5. Mickiewicz P. et al. (2015) X-ray microtomography-based measurements of meniscal allografts. *Orthop Traumatol Surg Res.*, 101(3), p. 319-24.
6. Syryamkin V.I., Borodin V.A. et al. (2012) Rentgenovskie tsifrovyye mikrotomografy [X-ray digital microtomographs]. *Vektory blagopoluchiya: ekonomika i sotsium* [Vectors of well-being: economy and society], 1 (2), pp. 86-92.
7. Syryamkin V.I. et al. (2012) Analiz izobrazhenii, formiruemykh rentgenovskimi mikrotomografami [Analysis of images formed by X-ray microtomographs]. *Priborostroenie* [Instrumentation], 2, pp. 7-10.
8. Syryamkin V.I. et al. (2014) Tsifrovoy rentgenovskiy mikrotomograf dlya diagnostiki materialov i elementov bortovoi radioelektronnoi apparatury [Digital X-ray microtomograph for diagnostics of materials and elements of onboard radio-electronic equipment]. *Reshetnevskie chteniya* [Reshetnev readings], 18, pp. 244-246.
9. Syryamkin V.I., Titov V.S. (ed.) (1992) *Sistemy tekhnicheskogo zreniya* [Systems of technical vision]. Tomsk.