### НОВЫЕ ИСПОЛНЕНИЯ ПЛОСКОПАНЕЛЬНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ДЕТЕКТОРОВ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА <u>Устинов А.О.</u> (ПРОДИС.НДТ)

Разработка рентгеновских плоскопанельных детекторов является актуальной задачей современной науки и техники. Данное оборудование широко используется для неразрушающего контроля различных типов промышленных объектов: сварные швы, отливки металлов, электронные компоненты, печатные платы, произведения искусства, композитные материалы, руды, керны горных пород, объекты полученные способом аддитивного производства как из полимеров, так и из металлов.

Рентгеновские детекторы подразделяются на различные категории по: типу преобразования, типу сенсорной матрицы, размеру пикселя и размеру активной области. Среди детекторов непрямого преобразования (с использование тракта сцинтиллятор-фото сенсор) следует выделить следующие типы фотосенсоров: ПЗС, КМОП и ТПТ. Указанные сенсоры производятся с использованием различных технологий кремниевого производства и характеризуются различными размерами пикселя, активной зоны и стойкости к ионизирующему излучению.

ООО «ПРОДИС.НДТ» производит отечественные рентгеновские детекторы на КМОП фотосенсорах для промышленного рентгеновского контроля с 2018 года. В 2020 году компания вывела на рынок несколько новых исполнения на ТПТ фотоматрице. На рисунке 1 изображен внешний вид новых исполнений детекторов, в таблице 1 – характеристики.



Рис. 1. Внешний вид новых исполнений ТПТ детекторов: a – Марк 1316Т; б – Марк 2430Т; в – Марк 4343Т; г – Марк 4343Т(НЕ).

Табл. 1. Характеристик новых исполнений ТПТ детекторов.

Параметр	1316T	2430T	4343T	4343T (HE)	
Размер пикселя, мкм	125	85	140	140	
Пространственное					
разрешение на	130	100	160	160	
дуплексном эталоне, мкм					
Матрица изображения,	$1024 \times 1280$	2816x3584	3072x3072	3072x3072	
пикселей	102481200			5072X5072	
Рабочая область, мм	128x160	239x304	430x430	430x430	
Скорость преобразования	ло 20	до 2,5	до 2	до 2	
(биннинг 1x1), кадров/с	до 20				
(биннинг 4х4), кадров/с	до 30	до 25	до 20	до 20	
Анодное напряжение, кВ	от 20 до 450	от 20 до 450	от 20 до 450	до 6 000	
Габаритные размеры	187x155x552	370x280x45	163x161x32 5	163x161x32 5	
(ДхШхВ), мм	10/X133X332	5/02200243	4037401732,5	4057401752,5	
Масса, кг	2	4	7,5	17,5	
Архитектура	ТFT; (aSi, аморфный кремний)				
Режимы биннинга	1x1; 2x2; 3x3; 4x4				
АЦП, бит	14				
Сцинтиллятор	Gd2O2S:Tb (GOS) или CsI				
Интерфейс	1000BASE-T; GigE Vision				
Радиационная стойкость,	1 000				
кРад					
Электропитание, В	24				
Температура	0T + 10 TO + 35				
эксплуатации, °С	01 + 10 д0 + 55				
Температура хранения, °С	от -20°С до +50°С				

Для повышения радиационной стойкости было разработано специальное исполнение детектора Марк 4343Т (НЕ) с вынесенной за пределы сенсора считывающей электроникой. Это позволяет использовать дополнительный внешний экран из материала с высоким атомным номером (свинец, вольфрам) большой толщины (9 мм и более), что позволяет применять указанное исполнение детектора в том числе на ускорителях электронов с энергией до 6 МэВ. В качестве источника вторичного излучения использован медный лист, располагаемый перед сцинтиллятором.

Детекторы на ТПТ фотосенсорах обладают увеличенной, по сравнению с КМОП детекторами, радиационной стойкостью, однако не позволяют достичь высокого разрешения в силу особенностей технологии «аморфного кремния». Стандарт ГОСТ ISO 17636-2 определяет понятие класса качества применительно к рентгеновскому неразрушающему контролю. Для достижения улучшенного класса качества (класса В) для большинства объектов из стали с радиационной толщиной менее 12 мм необходимо использовать детекторы на КМОП фотосенсорах с размером пикселя 50-65 мкм [1].

Для решения указанной проблемы нашей компанией была разработана продуктовая линейка детекторов на основе КМОП фотосенсора форматов 12\*15, 15\*24 и 24\*30 см. Указанные детекторы прошли апробацию во время международного чемпионата Wordskills Kazan 2019 в рамках компетенции «Сварочные технологии». На них был выполнен рентгеновский контроль по ГОСТ 17636-2 всех образцов сварных соединений, выполненных из листовой стали 10 и 16 мм толщиной [2]. Также ведется работа над созданием детектора формата 12\*30 см, максимально оптимизированного под задачу контроля сварных соединений.

В таблице 2 представлены характеристики используемого КМОП сенсора. Среди основных особенностей топологии сенсора следует выделить повышенную стойкость к ионизирующему излучению и минимальный в своем классе размер пикселя.

Параметр	Значение
Размер пикселя, мкм	49,5
Пространственное разрешение на дуплексном эталоне, мкм	63
Матрица изображения, пикселей	2344x2904
Рабочая область, мм	114x145,5
Скорость преобразования (биннинг 1х1), кадров/с	9
(биннинг 2х2), кадров/с	15
Анодное напряжение, кВ	от 20 до 300
Режимы биннинга (на сенсоре)	2x1
Тип затвора	Скользящий
АЦП	14 бит, 8 бит
Канал передачи данных	Последовательный LVDS
Потребляемая мощность	2 Вт
Температурные сенсоры	отсутствуют

Табл. 2. Характеристики КМОП фотосенсора.

Появление на рынке рентгеновской техники российских производителей плоскопанельных детекторов позволяет создавать различные системы промышленного рентгеновского контроля полностью на отечественных комплектующих. Производимые варианты исполнений детекторов на КМОП и ТПТ фотосенсорах закрывают основные задачи и потребности цифрового РК в широком диапазоне анодных напряжений, вплоть до МэВ ускорителей. Важной задачей импортозамещения и технологической независимости страны является переход разработчиков рентгеновской техники на отечественную компонентную базу.

Литература.

1. Стандарт ГОСТ ISO 17636-2-2017.

2. Багаев К.А., Галкин Д.И., Пузанов А.В., Устинов А.О. Опыт применения цифровой радиографии при контроле в рамках чемпионата WORLDSKILLS KAZAN 2019 / Контроль. Диагностика, № 12, 2019, с. 36-43.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССОРОВ ЭЛЬБРУС 8С ПРИ ОБРАБОТКЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ РЕНТГЕНОВСКОЙ ИНСПЕКЦИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ <u>Устинов А.О.</u> (ПРОДИС.НДТ)

Рентгеновский контроль (РК) является одним из основных методов диагностики качества паяных соединений электронных изделий на участках монтажа, широко используется для поиска неисправностей и причин отказов радиоэлектронного оборудования, используется для паспортизации компонентной базы.

Работа технолога-оператора на участке РК подразумевает два основных режима: обзорный поиск дефектов в режиме реального времени (частота кадров от 10 до 30 к/с) и статический анализ изображения высокого качества. В обоих случаях используется различные алгоритмы математической обработки. Для статического режима время обработки изображения не является ключевым фактором, однако для режима реального времени этот фактор является основным, что накладывает ряд ограничений на вычислительную мощность персонального компьютера. В рамках исследования было проведено сравнение производительности наиболее часто используемых алгоритмов обработки изображений на ряде процессорных систем, в том числе на отечественных процессорах серии Эльбрус 8С производства компании МЦСТ.

На рисунке 1 приведены примеры рентгеновских изображений печатной платы. Для получения рентгеновских изображений использовался модельный ряд детекторов собственного производства, отличающихся высоким разрешением, от 6 до 26 мегапиксел, скорость передачи данных по сети Ethernet составляла 1 GBE.



Рис.1. Примеры изображений РК печатных плат: а – массив выводов BGA под углом; б – микросхема с распайкой; в – участок печатной платы; г – транзистор.

Стандартными задачами инспекции печатных плат для которых применяются методы обработки изображений являются: поиск зон контакта вывода BGA с поверхностью печатной платы и микросхемы, сегментация вывода BGA от проекции переходного отверстия, сегментация контактных площадок SMD и DIP компонент, сегментация распайки кристалла, поиск пустот внутри контактной площадки, поиск явных дефектов и повреждений печатной платы (K3, механическое повреждение).

В зависимости от решаемой задачи применяются такие методы цифровой обработки рентгеновских изображений как: линейное контрастирование, эквализация гистограммы, градационные преобразования, евклидовы преобразования, усиление контраста, шумоподавляющая фильтрация, выделение границ [2].

Линейное контрастирование, работа с гистограммой и градационные преобразования позволяют улучшить зрительное восприятие изображения, не внося изменений в исходные данные. Евклидовы преобразования (поворот, отражение) как правило имеют низкоуровневую оптимизацию на базе тракта обработки изображения и не требуют дополнительных процессорных мощностей для вычисления.

Методы усиления контраста, подавления шума и выделения границ вносят изменения в исходное изображение и как правило являются ресурсоемкими операциями, выполняемыми на видеокарте или процессоре системы обработки изображений. Большая часть таких методов основана на свертке матриц, то есть операциях вида:

$$s(x, y) = \sum_{s=-a}^{a} \sum_{t=-b}^{b} w(s, t) \cdot f(x + s, y + f)$$
(1)

Фильтр в виде матрицы размерностью MxN, a=(M-1)/2, b=(N-1)/2, w(s,t) – весовые коэффициенты матрицы, называемой также маской. Маска\ядро матрицы – матрица некоторой размерности (обычно 3-5-7), которая используется как аргумент для локального преобразования яркости изображения.

Наиболее перспективными оказались следующие методы цифровой обработки – для повышения контраста: фильтр Лапласа, локальный контраст CLAHE [3]; для выделения Кирша. границ И сегментации: фильтр Гауссово размытие является крайне распространенным методом подавление шумов в рентгеновских изображениях и вынесена в отдельную функцию. Математически это также операция свёртки с весовыми коэффициентами, полученными по закону гауссова распределения. Однако в силу частоты использования этого метода он оптимизирован сильнее, чем обычная операция свертки.

Применение процессорной архитектуры с широким командным словом (VLIW) должно дать прирост производительности в матричных операциях, что может быть использовано при реализации различных систем обработки рентгеновских изображений, рентгеноскопии, автоматического рентгеновского неразрушающего контроля на конвейерных линиях и т.п. Задача данного исследования – количественная оценка изменения производительности систем обработки рентгеновского изображения на базе современных отечественных процессоров Эльбрус 8С (1300 МГц) [4]. По состоянию на 2020 год Эльбрус 8С является наиболее производительным отечественным процессором, поддерживающим VLIW технологию и доступном на коммерческом рынке.

Анализ быстродействия проводился в среде операционных систем (ОС) Астра Линукс: версия Ленинград 8.1 (Эльбрус), версия Смоленск 1.6 (Intel Core i7) и ОС

Windows 10 (Intel Core i7). Следует отметить, что версия ОС Астра Линукс Ленинград 8.1 не включает в себя оптимизированные библиотеки EML, позволяющие значительно ускорить обработку изображений за счет низкоуровневой оптимизации с использованием VLIW архитектуры процессора Эльбрус. В связи с этим также приведены данные по анализу быстродействия на поддерживающей оптимизацию ОС Эльбрус 5.0. Также стоит отметить различие в скорости выполнения операция обработки изображения в зависимости от типа данных: 16U, 16S или 32F. В таблице 1 представлены результаты измерения времени выполнения операций обработки изображений на различных процессорных системах. Для обработки использовались библиотеки OpenCV версии 3.2 и 4.4 [5], ядро свертки 5x5, размер изображения 3000x3000 пикселей.

Версия ОС	Эльбрус 5.0rc2	Астра Ленинград 8.1	Астра Смоленск 1.6	Window s 10	Windows 10
Модель процессора	Эльбрус- 8С	Эльбрус- 8С	Intel Core i7 7700	Intel Core i7 9750H	Intel Core i7 9750H
Версия OpenCV	3.2	3.2	3.2	3.2	4.4
Свертка, 16S	35	334	99,7	94	105,9
Свертка, 16U	244	280	-	98	106,5
Свертка, 32F	32	271	23,9	24	11,4
Гауссово размытие, 16S	15,3	257	36,3	35	5,7
Гауссово размытие, 16U	184	251	-	12,5	40
Гауссово размытие, 32F	14,5	222	8,1	7,7	6,2

Табл. 1. Время выполнения операций обработки изображений на разных процессорных системах в мс.

Повышение качества рентгеновской инспекции печатных плат и электронных блоков требует совершенствования как аппаратных, так и программных средств. Существующие алгоритмы обработки рентгеновских изображений позволяют решить стандартные задачи контроля, однако автоматизация этих задач требует высокого быстродействия при обработке изображений. Параллельно с этим актуальными задачами являются защита информации и импортозамещение критических компонентов в вычислительных системах, поэтому

25

применение отечественных процессоров становится востребованным в большом количестве отраслей производства.

В ряде операций архитектура широкого командного слова процессора Эльбрус 8С может как дать прирост производительности в два раза при обработке изображений, так и ухудшить этот показатель. На неоптимизированных версиях программного пакета OpenCV и ряде ОС наблюдается падение производительности до 20 раз. Подобная оптимизация доступна не на всех коммерческих ОС, что мешает использовать все преимущества архитектуры с широким командным словом.

Литература.

1. Устинов А.О. Системы рентгеновской инспекции электронных узлов отечественного производства / Сборник тезисов Международный форум «Микроэлектроника-2019», Ялта, 2019.

2. Р. Гонсалес, Р. Вудс. Цифровая обработка изображений / Москва, 2005.

3. S. Saalfeld. Enhance Local Contrast (CLAHE) plugin for ImageJ / URL: https://imagej.net/Enhance\_Local\_Contrast\_(CLAHE).

4. Рабочая станция «Эльбрус 801-РС». Сайт ИНЭУМ. / URL: http://www.ineum.ru/elbrus 801-рс gen4.

5. Официальный сайт библиотек компьютерного зрения OpenCV / URL: https://opencv.org/

# МЕТОДЫ ПРИКЛАДНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФОКУСНОГО ПЯТНА МИКРОФОКУСНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ АППАРАТОВ

### Авакян А.К. (ПРОДИС.НДТ)

Важнейшим критерием качества как томографических, так и проекционных рентгеновских систем является детализация визуализируемых объектов интереса на итоговых изображениях. Детализация определяется функцией передачи модуляции (MTF) системы, которая зависит от ряда технических параметров, в том числе характеристик действительного фокусного пятна (ФП) рентгеновского аппарата, то есть пространственного распределения интенсивности рентгеновского излучения по поверхности мишени трубки.

Производители рентгеновских аппаратов в паспорте изделия указывают линейный размер ФП (со ссылкой на использованный стандарт измерения), реже – проекционное изображение ФП через пинхол (точечное отверстие). Для достижения уровня детализации, актуального современным проблемам неразрушающего контроля, как правило, используется источник с номинальным размером ФП от 1 до 50 мкм в сочетании с цифровым приёмником излучения. В процессе разработки систем инспекции печатных плат и микротомографии для достижения запланированной в проекте итоговой детализации возникли следующие задачи:

- выбор микрофокусного рентгеновского аппарата среди доступных на рынке;

- прогнозирование MTF системы визуализации в зависимости от используемого коэффициента геометрического увеличения при известных характеристиках ФП и детектора.

На практике при решении перечисленных задач существует проблема пересчета заявленного производителем линейного размера ФП в функцию МТF в связи с отсутствием

документированной информации о форме профиля интенсивности излучения ФП. Возникают неопределенности в интерпретации заявленного размера, если измерение выполнено только в одном режиме работы источника, отсутствует документированная информация об использованной системе фокусировки и возможном дрейфе ФП, измерение выполнено на рентгеновскую плёнку. Корректность проведенного производителем измерения ставится под сомнение в случае, если диаметр использованного при измерении пинхола сопоставим с размером измеряемого ФП.

Таким образом, при разработке систем визуализации необходим контроль, в том числе динамический, реальных эксплуатационных характеристик ФП в широком рабочем диапазоне параметров источника. Данный контроль не является профильной задачей для лаборатории разработчика систем визуализации, следовательно, для используемой методики исследования ФП допустимо смещение приоритета с абсолютной точности на удобство и высокую скорость измерения без применения специализированного и дорогостоящего измерительного оборудования. Также, в соответствии с актуальным уровнем развития техники, измерения должны выполняться на цифровой плоскопанельный детектор.

Существует ряд стандартов измерения микрофокусного (менее 100 мкм) линейного размера ФП [1, 2]. Исходя из физико-математического принципа получения информации о ФП, стандартизированные подходы к измерению можно условно разделить на три группы.

К первой группе относится метод исследования по проекционному изображению пинхола в пластине из высококонтрастного материала, очевидным преимуществом которого является получение визуальной информации о двумерном пространственном распределении интенсивности действительного ФП. На практике при реализации метода возникает ряд сложностей. Пинхольный фантом имеет конечный диаметр просвета, и допущение о точечности отверстия справедливо, только если его диаметр на порядок меньше размера измеряемого ФП. При этом с целью достижения достаточного рентгеновского контраста толщина металлической пластины должна быть не менее 100 мкм в эквиваленте вольфрама. Технологическая сложность производства делает дорогостоящим пинхольный фантом, необходимый для исследования ФП с размером менее 50 мкм. Без использования дополнительных инструментов невозможно точно измерить коэффициент геометрического увеличения по проекционному изображению. Возникает сложность позиционирования фантома при превышающем десятикратное увеличении. Также, из-за низкого уровня полезного сигнала на проекции отверстия фантома, достаточное для точного измерения отношение сигнал/шум достигается накоплением и усреднением проекций, что делает невозможным исследование в динамическом режиме из-за возможного дрейфа ФП.

Вторая группа методов основана на измерении ширины размытия границы (градиента) проекции высококонтрастного тест-объекта (TO) по принципам геометрической оптики. В качестве TO используются фантомы с окружностью в сечении (шарик, проволока), щелевые фантомы, фантомы типа «острый край», изготовленные из вольфрама, платины и других металлов. Общим достоинством методов (за исключением «острого края») является относительно точное измерение коэффициента увеличения как отношения ширины проекции к физическому размеру фантома, то есть по результатам одного измерения возможно рассчитать эффективный размер ФП необходимом диапазоне увеличений.

Для методов второй группы свойственен ряд существенных недостатков. Во-первых, по одной проекции ТО размер ФП измеряется только в одном направлении. Во-вторых, ни в одном из стандартов нет однозначной интерпретации измеренного размера с точки зрения формы профиля интенсивности излучения ФП, вследствие этого возникает сложность с расчетом МТF по измеренному линейному размеру. В-третьих, фантомы имеют толщину в направлении оси источник-детектор, значительно превышающую размер измеряемого ФП. За счет этого, форма проекции границы объекта, теоретически обусловленная исключительно конечным размером ФП, искажается под влиянием неравномерного ослабления в материале фантома и возникающего рассеянного излучения.

К третьей группе относится метод исследования с использованием прецизионного штрихового фантома пространственного разрешения типа JIMA с размером штрихов в диапазоне 0,4 – 15 мкм [3]. Фантом позволяет однозначно определять минимальный размер визуализируемого объекта (дефекта), при этом полученная по результатам исследования информация характеризует систему визуализации в целом, но не непосредственно характеристики ФП, а результаты измерения невозможно аналитически интерпретировать для произвольного коэффициента геометрического увеличения.

С учетом достоинств и недостатков проанализированных стандартов для решения заявленных ранее прикладных задач было принято решение о разработке собственной методики измерения характеристик ФП, соответствующей следующим требованиям:

- интерпретация измеренного размера как формы профиля интенсивности излучения;

- аналитический расчет МТF для любого коэффициента геометрического увеличения;
- применимость в диапазоне напряжений трубки от 40 до 150 кВ;

– доступность и невысокая стоимость ТО;

- точное измерение коэффициента геометрического увеличения по проекции ТО;

- толщина TO равномерная и существенно не превышает размер измеряемого ФП;

– регистрация проекций на цифровой плоскопанельный детектор.

За основу разработанной методики взято измерение ширины градиента на проекции высоконтрасного ТО. В отличие от существующих стандартов, представлено теоретическое доказательство взаимосвязи измеренной ширины градиента с формой профиля интенсивности излучения ФП и функцией МТF источника.

Наиболее доступным ТО, удовлетворяющим указанным условиями, является стандартизированная рентгеновская мира с параллельным направлением штрихов (тест-объект пространственного разрешения, ТПР). ТПР изготавливается из свинцовой или вольфрамовой фольги толщиной 20-50 мкм и выпускается в размерных рядах до 5, до 10 и до 20 пар линий на мм [4]. Так как толщина фольги ТПР не превышает размер измеряемого ФП уместно предположение об отсутствии нежелательных искажений на сигнале градиента. В ходе проекционной съемки возможно подобрать такое сочетание коэффициента геометрического увеличения и частоты штрихов ТПР, при котором градиенты от соседних штрихов с запасом не накладываются друг на друга, что позволяет считать границу каждого штриха имитацией идеального «острого края». Кроме того, возможно точное измерение коэффициента увеличения как отношение ширины проекции к известному физическому размеру штриха. Проекция ТПР на высоком увеличении и выделенный на проекции профиль сигнала представлены на рисунке 1, далее в тексте обозначения в соответствии с рисунком.



Рис. 1. Проекция ТПР и сигнал вдоль выделенного направления.

Измерение характеристик  $\Phi\Pi$  выполняется по профилю сигнала в направлении, перпендикулярном ориентации штрихов на основании следующего утверждения: если профиль F(x) интенсивности излучения  $\Phi\Pi$  имеет один максимум, то при проекционной съемке «острого края» независимо от формы F(x) имеет место равенство:

$$\Delta x = (E/A) \cdot (M-1), \tag{1}$$

где  $\Delta x$  — расстояние между координатами пересечения касательной к сигналу, проведенной в точке экстремума производной сигнала, с уровнями сигнала темного и светлого «плато»; Е — суммарная энергия излучения  $\Phi\Pi$ ; А — максимальное значение интенсивности излучения  $\Phi\Pi$ ; М — коэффициент геометрического увеличения при съемке.

Доказательство утверждения (1) основано на следующей математической модели формирования рентгеновского изображения. Профиль F(x) есть зависимость интенсивности излучения от координаты в плоскости ФП. Тонкий объект G(x) есть зависимость относительного пропускания от координаты в плоскости объекта, где пропускание определяется отношением интенсивности излучения на выходе из объекта к интенсивности на входе. В результате взаимодействия излучения с объектом в плоскости детектора формируется сигнал S(x), являющийся свёрткой функций F(x) и G(x) с учётом масштабирования, определяемого взаимным положением ФП, объекта и детектора:

$$S(x) = F_{pr}(x) \otimes G_{pr}(x) = F(-\frac{ADD}{FAD} \cdot x) \otimes G(\frac{ADD + FAD}{FAD} \cdot x),$$
(2)

где *ADD* – расстояние от ТО до детектора, *FAD* – расстояние от фокуса до ТО.

Для идеального ТО «острый край» G(*x*) является единичной ступенчатой функцией Хевисайда. По свойствам функции Хевисайда, выражение (2) преобразуется к виду:

$$S(x) = \int_{-\infty}^{x} F_{pr}(t) dt$$
(3)

Уравнение касательной прямой y(x), проведенной к сигналу S(x) в точке с произвольной координатой  $x_0$  с учётом выражения (3) имеет вид:

$$y(x) = F_{pr}(x_0) \cdot (x - x_0) + S(x_0)$$
(4)

На проекции «острого края» (рис. 1) выделяется темное «плато» с уровнем сигнала S<sub>min</sub> и светлое «плато» с уровнем сигнала S<sub>max</sub>, причем:

$$S_{\min} = S(-\infty) = 0$$
  

$$S_{\max} = S(\infty) = \int_{-\infty}^{\infty} F_{pr}(x) dx = E \cdot (M-1)$$
(5)

где Е – суммарная энергия излучения ФП.

Касательная прямая y(x) достигает значения  $S_{min}$  и  $S_{max}$  в точках с координатами  $x_1$  и  $x_2$ , причем разность координат определяется выражением:

$$\Delta x = |x_2 - x_1| = \frac{E \cdot (M - 1)}{F_{pr}(x_0)}$$
(6)

В частном случае, если  $x_0$  является координатой единственного максимума  $F_{pr}(x)$ , то есть  $F_{pr}(x_0) = max(F_{pr}) = A$ , то выражение (6) сводится к утверждению (1). В соответствии с выражением (3) производная сигнала S'(x) совпадает с проекцией профиля интенсивности излучения ФП  $F_{pr}(x)$ , а  $x_0$  является координатой экстремума S'(x).

На основании заявленного в утверждении (2) критерия о постоянстве суммарной энергии ФП по измеренным значениям  $\Delta x$  и М профиль интенсивности излучения ФП F(x) с точностью до амплитуды считается лежащим в диапазоне от равномерного (7) до гауссова (8). Функция МТF по определению рассчитывается аналитически для произвольного коэффициента увеличения как прямое преобразование Фурье от F(x). Графическая интерпретация показана на рисунке 2.

$$\mathbf{F}(x) = \begin{cases} \mathbf{A}, & |x| \le \Delta x/2\\ \mathbf{0}, & |x| > \Delta x/2 \end{cases}$$
(7)

$$\mathbf{F}(x) = \mathbf{A} \cdot exp\left(-\frac{x^2 \cdot \pi}{\Delta x^2}\right) \tag{8}$$



Рис. 2. Форма профиля интенсивности излучения ФП в диапазоне от равномерной до гауссовой при условии постоянства суммарной энергии и соответствующий диапазон MTF.

Применение ТПР как ТО позволяет по одной проекции измерить характеристики ФП только в одном направлении. Перед проведением исследования, с учетом известных характеристик детектора, необходимо подобрать сочетание частоты штрихов ТПР и коэффициента геометрического увеличения, при котором градиенты от соседних штрихов не накладываются друг на друга, полная проекция хотя бы одной пары штрихов полностью укладывается в границы детектора, ширина градиента покрывает как можно большее количество каналов. При расчете численной производной сигнала необходимо контролировать влияние шумов.

Апробация методики проведена на следующих рентгеновских источниках с номинальным размером ФП менее 100 мкм: РАП-100 и РАП-150 (ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед», XRB011 (Spellman, CША), L9181-02 (Hamamatsu, Россия), Япония). Проекции регистрировались на проскопанельный детектор ПРОДИС.Марк 1215СС с размером пикселя 49,5 мкм. В зависимости от размера ФП использовалась частота ТПР от 0,5 до 2,0 пар линий на мм, коэффициент увеличения выбирался таким, чтобы ширина градиент была не менее 40 пикселей. Рассчитанная по предложенной методике MTF с высокой точностью совпала с измерениями в аналогичных условиях по фантому ЈІМА. Производная сигнала, в соответствии с выражением (3) позволяет качественно оценить форму профиля интенсивности излучения ФП. Кроме озвученного ранее, по проекции ТПР возможно измерить относительный дрейф ФП во времени или в зависимости от параметров источника.

#### Литература.

1. Salamon M. et al. Comparison of different methods for determining the size of a focal spot of microfocus X-ray tubes / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 591, № 1, 2008, pp. 54-58.

2. Standard ASTM E2903-13. Standard test method for measurement of the effective focal spot size of mini and micro focus X-ray tubes.

3. Сайт производителя фантома. URL: https://www.jima.jp/english/assen-e.html. Дата обращения: 01.11.2020.

4. Сайт дистрибьютера в РФ. URL: http://www.doza.ru/catalog/common\_phantom/260. Дата обращения: 01.11.2020.

## УЧЁТ СКРЫТЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ МИКРОФОКУСНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ АППАРАТОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМ ВИЗУАЛИЗАЦИИ <u>Авакян А.К.</u> (ПРОДИС.НДТ)

Цель данной работы – продемонстрировать особенности российских и импортных микрофокусных рентгеновских аппаратов, не прописанные явно в документации производителя, но оказывающие существенное влияние на характеристики системы визуализации. В работе представлены следующие экспериментальные наблюдения:

- зависимость размера фокусного пятна (ФП) от напряжения и тока трубки;

- нестандартная форма профиля интенсивности излучения ФП;

 – различие эффективного размера ФП в поле визуализации для трубок с массивным анодом с известным углом наклона;

- дрейф (перемещение) действительного ФП по поверхности мишени в зависимости от параметров напряжения и тока трубки, а также в течение непрерывной экспозиции.

Перечисленные особенности прямо или косвенно оказывают влияние на пространственное и контрастное разрешение системы визуализации. Следовательно, их учёт и контроль позволят разработчику подтвердить применимость конкретной модели источника для решения поставленных технических задач, а также определить диапазон параметров работы источника в составе системы, в котором гарантированно достигаются необходимые характеристики визуализации.

Исследования выполнены в рамках проектов разработки систем инспекции печатных плат и микротомографии. Проекции регистрировались на проскопанельный детектор ПРОДИС.Марк 1215СС с размером пикселя 49,5 мкм. В таблице 1 представлены исследованные рентгеновские аппараты [1-3].

	• •				
	РАП-100 (ЗАО	РАП-150 (ЗАО	XRB011	L9181-02	
	«ЭЛТЕХ-Мед»,	«ЭЛТЕХ-Мед»,	(Spellman,	(Hamamatsu,	
	Россия)	Россия)	США)	Япония)	
Рентгеновская трубка			Oxford		
	БС-6	БС-16	Instruments 1000	Не указана	
			Glass		
Тип анода	Прострельный	Прострельный вынесенный	Массивный		
			статический,	Не указан	
	вынесенный		угол наклона 20°		
Размер ФП, мкм	$40^{*}$	50**	до 31,5	от 5 до 40***	
Напряжение	om <b>5</b> 0 no 100	от 50 на на 150	25 = 20	am 40 ma 120	
трубки, кВ	от 50 до 100	от 50 до до 150	ог 55 до 80	от 40 до 150	
Мощность, Вт	до 10	до 10	до 50	до 39	
Фокусировка	Постоянное	Постоянное	Цо укарана	Не указана	
	магнитное поле	магнитное поле	пе указана		

Табл. 1. Исследованные рентгеновские аппараты с перечнем заявлен	ных	K
в документации производителя основных технических характеристик	[13]	

<sup>\*</sup> – в режиме 100 кВ, 20 мкА.

\*\* – в режиме 125 кВ, 100 мкА.

\*\*\* - в зависимости от мощности.

Размер эффективного ФП измерялся по ширине градиента проекции штрихового свинцового тест-объекта пространственного разрешения (ТПР). В соответствии с ограничением методики, по одной проекции возможно измерить размер ФП только в одном направлении. На рисунке 1 показаны результаты измерения для аппаратов РАП-100, РАП-150 и Spellman XRB011 в зависимости от установленных параметров излучения.

В существующих стандартах измерения ФП либо не предусмотрена интерпретация измеренного размера в виде пространственного распределения интенсивности по поверхности мишени трубки, либо это распределение считается двумерным гауссовым. На практике информация о форме профиля необходима для аналитического расчета MTF (Modulation transfer function) системы, а предположение о гауссовом распределении не является универсально верным для любого рентгеновского источника.



Рис. 1. Размер ФП аппаратов: *a* – РАП-100, *б* – РАП-150 и *в* – Spellman XRB011 в зависимости от параметров напряжения и тока трубки.

Доступным методом приблизительной оценки формы профиля ФП является математический расчет производной сигнала проекции от границы высоконтрастного объекта. На рисунке 2 показана оценка профиля интенсивности излучения ФП на аппарате Spellman XRB011 в режиме 80 кВ, 500 мкА, геометрическое увеличение – 16,8 раз, частота штрихов ТПР – 0,6 пар линий на мм. В горизонтальном направлении профиль имеет необычную форму с ярко выраженным пиком шириной порядка 50 мкм в центральной части и отходящими от него в обе стороны «плато» с амплитудой 15 % от пиковой интенсивности. Общая ширина с учетом плато достигает 300 мкм. В вертикальном направлении профиль близок к гауссиану. Закономерность сохраняется во всем диапазоне параметров трубки. Наличие «плато» существенно ухудшает пространственное разрешение вдоль одного из направления, при этом об этом отсутствует информация в документации, а заявленный номинальный размер не превышает 32 мкм.



Рис. 2. Аппарат Spellman XRB011. Проекции ТПР и их производные в двух направлениях (сверху) и оценка профиля интенсивности излучения ФП по анализу производных (снизу).

Для рентгеновских трубок с массивным анодом, имеющим угол наклона, по законам геометрической оптики размер эффективного фокусного пятна зависит от направления визуализации [4]. Вследствие этого, пространственное разрешение системы неравномерно в зависимости от положения и угловой ориентации объекта в пучке излучения. С точки зрения автора, отсутствие в документации информации о типе анода, а также об угле съемки при измерении номинального размера ФП, может приводить к некорректной интерпретации реальных эксплуатационных характеристик источника.

На рисунке 3 показаны проекции  $\Phi\Pi$  аппарата Spellman XRB011 в режиме 80 кВ, 400 мкА через отверстие диаметром 50 мкм в вольфрамовой пластине толщиной 100 мкм. Данный фантом не является точечным при номинальном размере действительного  $\Phi\Pi$  32 мкм, однако проекции качественно характеризуют изменение размера и угловой ориентации эффективного  $\Phi\Pi$ . Коэффициент увеличения – 17 ± 0,5 раз. Изображение в центре соответствует позиции фантома на перпендикуляре к плоскости детектора через номинальное положение  $\Phi\Pi$  источника.



Рис. 3. Проекции ФП аппарата Spellman XRB011 через отверстие диаметром 50 мкм в зависимости от положения в поле визуализации. Изображения сверху вниз соответствуют направлению от катодной стороны к анодной стороне.

На рисунке 4 показана проекция ТПР (частота штрихов – 0,8 и 0,9 пар линий на мм, коэффициент увеличения – 45 ± 0,5 раз) на аппарате Hamamatsu L9181-02 в режиме 130 кВ, 100 мкА и зависимость размера эффективного ФП от положения проекции. На основании эксперимента сделан вывод о наличии угла наклона анода трубки данного аппарата.

Общим для четырёх рассматриваемых рентгеновских аппаратов является эффект дрейфа действительного ФП, проявляющийся визуально в виде смещения на изображении проекции зафиксированного в пространстве объекта при переключении режимов тока и напряжения источника, либо с течением времени в ходе непрерывной экспозиции. Дрейф от режима аппарата предположительно объясняется свойствами системы фокусировки пучка, временной дрейф – эффектом нагрева и последующей деформации катодного узла. Доступное оборудование позволило экспериментально измерить значения относительного дрейфа, то есть смещения относительно положения, условно принятого за нулевое.



Рис. 4. Зависимость размера эффективного ФП аппарата Hamamatsu L9181-02 от направления визуализации (без пересчета с учетом коэффициента увеличения).

На рисунке 5 слева показаны траектории дрейфа во времени (возле точек данных отмечено время в секундах с момента начала экспозиции) на трех режимах аппарата Spellman XRB011, измерения представлены в плоскости детектора, коэффициент геометрического увеличения при съемке  $-17 \pm 0.5$  раз. На рисунке 5 справа показан дрейфа ФП аппарата РАП-150 по двум направлениям в зависимости от напряжения трубки (при фиксированном токе 50 мкА), измерения относительно положения ФП при напряжении 80 кВ.



Рис. 5. Дрейф ФП: а – Spellman XRB011 на трех режимах напряжения и тока трубки, возле точек данных указано время в секундах с момента начала экспозиции; б – РАП-150 в двух направлениях в зависимости от напряжения трубки при токе 50 мкА.

Представленные в работе особенности микрофокусных рентгеновских источников оказывают существенное влияние на пространственное разрешение системы визуализации. Их учёт и контроль позволят разработчику определить диапазон параметров работы источника в составе системы, в котором гарантированно достигаются необходимые для конечного пользователя характеристики визуализации.

#### Литература.

1. Подымский А.А. Мощные рентгеновские трубки для проекционной рентгенографии / СПб.: Изд-во ЛЭТИ, 2016.

2. Сайт производителя. URL: https://www.spellmanhv.com/ru/high-voltage-power-supplies/XRB011 Дата обращения: 09.11.2020.

3. Сайт производителя. URL: https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/type/L9181-02/index.html. Дата обращения: 09.11.2020.

4. Buzug T.M. Computed tomography / Springer Handbook of Medical Technology. Springer. Berlin, Heidelberg. 2011.

### СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ РЕНТЕНОВСКИХ ИСТОЧНИКОВ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРЕРЫВАТЕЛЯ ТОКА (SOS)

#### <u>Комарский А.А.</u>, Корженевский С.Р., Комаров Н.А. (ИЭФ УрО РАН)

Спектральный состав излучения является одним из основных параметров рентгеновских источников, от спектра излучения зависит плотность и соответственно толщина объектов исследования, контрастность на рентгеновских снимках тех или иных объектов. Для задач спектроскопии, кристаллографии важно получить моноэнергетические пучки излучения, но для подавляющего большинства промышленных применений используются рентгеновские источники с непрерывным тормозным спектром. Широкий динамический диапазон современных цифровых детекторов излучения позволяет различать малоконтрастные или близкие по контрасту объекты на рентгеновских снимках. Также благодаря развитию цифровых детекторов рентгеновского излучения стали все больше внедряться системы преобразования изображений, связанные с двухэнергетическими методами обработки, с целью выделения близких по плотности объектов либо объектов с разными атомными номерами.

Исследование спектров рентгеновских источников не является тривиальной задачей, особенно если речь идет об импульсном рентгеновском источнике, где излучение имеет огромную мощность в наносекундном временном интервале. В нашей лаборатории разрабатываются рентгеновские источники импульсного излучения [1, 2], в которых формирование импульсов высокого напряжения происходит за счет полупроводникового прерывателя тока (SOS) [3]. Исследование спектрального состава излучения данных источников и определение отличительных особенностей их спектров от спектров источников непрерывного действия является основной целью данной работы.

Расчет спектра для рентгеновского источника непрерывного действия можно произвести из выражения, рассчитанного теоретически Крамерсом и полученного