

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 MTF 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 точности 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 (ТО) по принципам геометрической оптики. В качестве ТО 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 MTF 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 ЛМА 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 MTF 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 ТО равномерная и существенно не превышает размер измеряемого ФП;
- регистрация проекций на цифровой плоскопанельный детектор.

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

Наиболее доступным ТО, удовлетворяющим указанным условиям, 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.

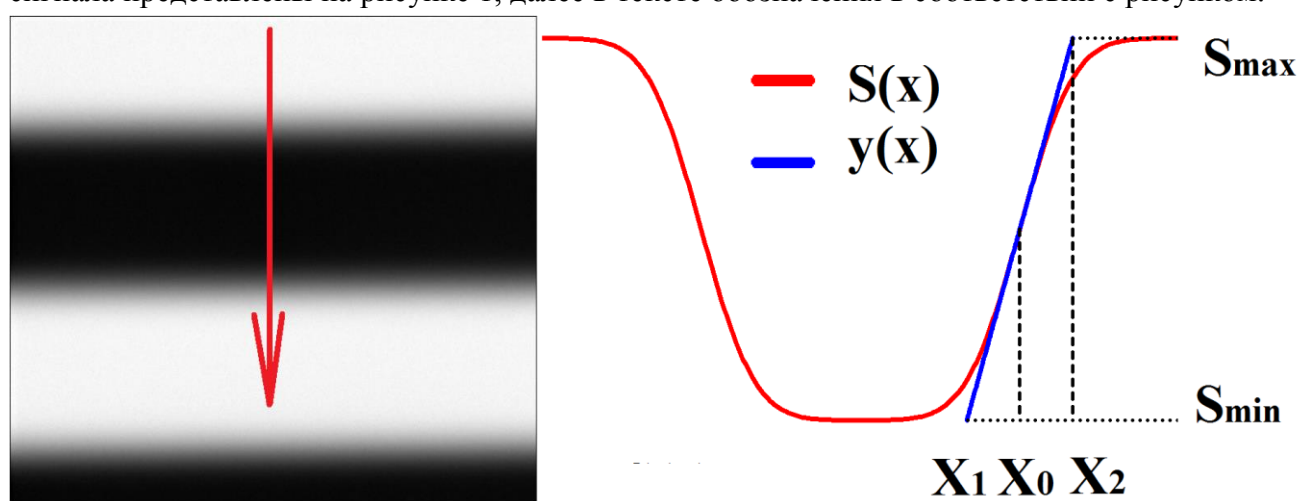


Рис. 1. Проекция ТПР и сигнал вдоль выделенного направления.

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

$$\Delta x = (E/A) \cdot (M-1), \quad (1)$$

где Δx – расстояние между координатами пересечения касательной к сигналу, проведенной в точке экстремума производной сигнала, с уровнями сигнала темного и светлого «плато»; E – суммарная энергия излучения ФП; A – максимальное значение интенсивности излучения ФП; M – 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:

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

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:

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

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

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

На проекции «острого края» (рисунок 1) выделяется темное «плато» с уровнем сигнала S_{min} и светлое «плато» с уровнем сигнала S_{max} , причем:

$$\begin{aligned} S_{min} &= S(-\infty) = 0 \\ S_{max} &= S(\infty) = \int_{-\infty}^{\infty} F_{pr}(x) dx = E \cdot (M-1) \end{aligned} \quad (5)$$

где E – 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:

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

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

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

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

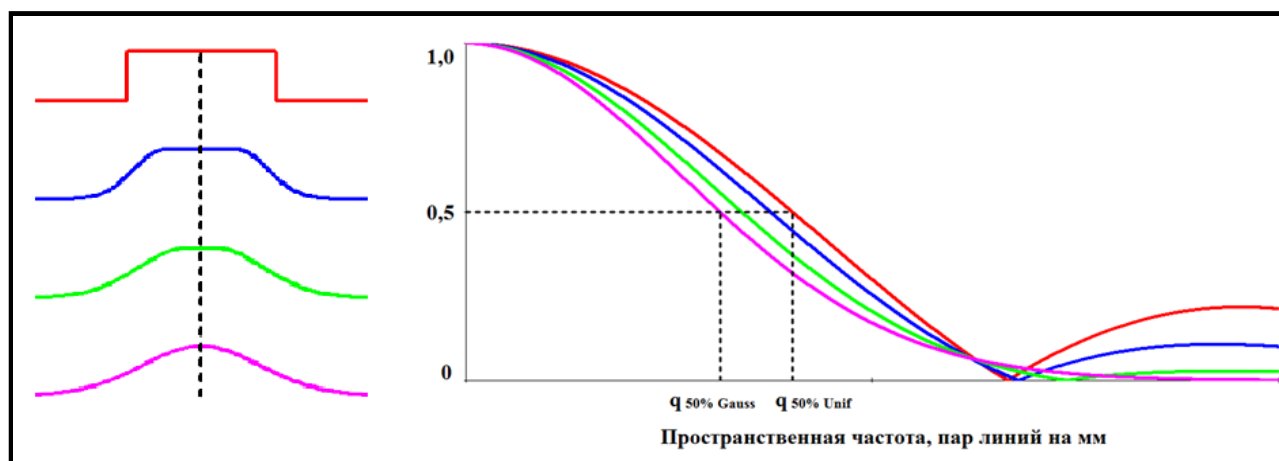


Рис. 2. Форма профиля интенсивности излучения ФП в диапазоне от равномерной до гауссовой при условии постоянства суммарной энергии и соответствующий диапазон МТФ.

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», Россия), XRB011 (Spellman, США), L9181-02 (Hamamatsu, Япония). Проекция регистрировалась 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 МТФ с высокой точностью совпала с измерениями в аналогичных условиях по фантому JIMA. 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. 2008. Vol. 591. № 1. 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.