

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

УДК 620.179.15 + 535.317.25

В. А. Удод, А. К. Темник, В. И. Солодушкин

(Томск)

ОЦЕНКА РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
СИСТЕМ ЦИФРОВОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ

В рамках принятых предположений получено выражение для максимального значения пространственной разрешающей способности систем цифровой рентгенографии со следующей структурой: источник излучения – коллиматор источника – объект контроля – кассета с рентгеновской пленкой – денситометр – компьютер – полутоновый дисплей.

Сочетание высокой пространственной разрешающей способности (РС) рентгеновской пленки с широкими возможностями цифровой обработки информации обуславливает перспективность создания радиографических систем неразрушающего контроля, содержащих в своей структуре компьютер и полутоновый дисплей. Системы такого и подобного типа, получившие название систем цифровой рентгенографии (СЦР), являются вплоть до настоящего времени предметом повышенного внимания для отечественных и зарубежных разработчиков [1–5].

При проектировании СЦР естественным образом возникает задача выбора ее основных параметров и характеристик, которые были бы оптимальны в том или ином смысле. Решение этой задачи в общем случае сопряжено со значительными трудностями, которые вызваны как различием самих СЦР по структуре, так и большим разнообразием объектов контроля (ОК) и задач контроля. В работах [4, 5] данная задача решена применительно к СЦР, содержащей линейку детекторов и предназначенной для обнаружения локальных неоднородностей в ОК цилиндрической формы.

В настоящей работе рассматривается задача оптимальной фильтрации изображений (по критерию максимума РС) в СЦР, структура которой представлена на рис. 1.

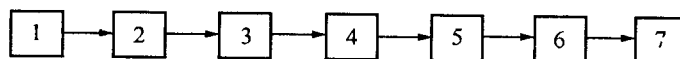


Рис. 1. Структурная схема СЦР: 1 – источник излучения; 2 – коллиматор источника; 3 – объект контроля; 4 – кассета с рентгеновской пленкой; 5 – денситометр; 6 – компьютер; 7 – полутоновый дисплей

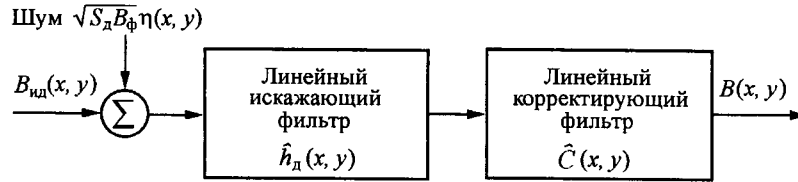


Рис. 2. Математическая модель СЦР

Необходимая для проведения расчетов математическая модель СЦР разработана нами при следующих предположениях: кассета с рентгеновской пленкой располагается в непосредственной близости за объектом контроля; расстояние источник – пленка (фокусное расстояние) значительно превосходит толщину ОК; размеры пленки малы по сравнению с фокусным расстоянием; шаги дискретизации рентгенограммы денситометром малы по сравнению с размерами апертуры денситометра; число квантов, испускаемых источником излучения за единицу времени, есть случайная величина, распределенная по закону Пуассона (рис. 2).

При этом использованы следующие обозначения:

$$B(x, y) = [B_{нд}(x, y) + \sqrt{S_d B_\phi} \eta(x, y)] * \hat{h}_d(x, y) * \hat{C}(x, y) \quad (1)$$

– полутоновое изображение (ПИ), синтезируемое СЦР;

$$B_{нд}(x, y) = B_\phi [1 + \Delta\mu S(x, y)]$$

– идеальное ПИ, синтезируемое идеальной СЦР, т. е. такой гипотетической СЦР, в которой отсутствуют все возможные искажения ПИ;

$$B_\phi = N_0 \exp[-\mu(E_{эф})H] S_d T \epsilon \quad (2)$$

– яркость фона идеального ПИ; N_0 – плотность потока квантов в плоскости рентгеновской пленки при отсутствии объекта контроля; μ – линейный коэффициент ослабления (ЛКО) излучения для материала ОК; $E_{эф}$ – эффективная энергия излучения за ОК; H – толщина ОК; S_d – площадь апертуры денситометра; T – время экспозиции ОК; ϵ – эффективность регистрации излучения рентгеновской пленкой; $\Delta\mu = \mu - \mu_d$, где μ_d – ЛКО излучения для материала неоднородности; $S(x, y)$ – лучевой размер неоднородности; $\eta(x, y)$ – пространственный белый шум с единичной спектральной плотностью, т. е. стационарное случайное поле с нулевым средним значением и δ -корреляционной функцией:

$$\overline{\eta(x, y)} = 0, \quad \overline{\eta(x, y)\eta(u, v)} = \delta(x - u)\delta(y - v),$$

где $\delta(z)$ – дельта-функция Дирака; $\hat{h}_d(x, y)$ – нормированный по площади на единицу импульсный отклик апертуры денситометра; $\hat{C}(x, y)$ – нормированный по площади на единицу импульсный отклик линейного аналогового фильтра, адекватного линейному цифровому фильтру с импульсным откликом $C_{n, k} = \Delta x \Delta y \hat{C}(n \Delta x, k \Delta y)$, где $\Delta x, \Delta y$ – шаги дискретизации рентгенограм-

мы денситометром вдоль соответствующих координатных осей; символ «*» означает двумерную свертку.

Рассмотрим теперь непосредственно задачу оптимальной фильтрации, т. е. задачу выбора линейного корректирующего фильтра из условия максимума РС СЦР. Воспользовавшись математической моделью СЦР (1) и общими результатами оптимальной фильтрации изображений по критерию максимума РС [6, 7], получим выражения для максимума РС R_{\max} СЦР и передаточной функции (ПФ) оптимального корректирующего фильтра:

$$R_{\max} = \gamma \left\{ \bar{v} \geq 0 \left| 1 \geq \pi \frac{M_{\text{пор}}^2 S_d}{k_0^2 B_\Phi} \bar{v}^2, \left| \tilde{h}_d(v_x, v_y) \right| > 0 \text{ при } v_x^2 + v_y^2 \leq \bar{v}^2 \right. \right\}, \quad (3)$$

$$\tilde{C}_{\text{opt}}(v_x, v_y) = \begin{cases} \frac{1}{\tilde{h}_d(v_x, v_y)}, & v_x^2 + v_y^2 < R_{\max}^2; \\ 0, & v_x^2 + v_y^2 \geq R_{\max}^2. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь γ – мера Лебега; \bar{v} , v_x , v_y – пространственные частоты; k_0 – исходный контраст; $M_{\text{пор}}$ – пороговое отношение сигнал/шум, характеризующее надежность разрешения; $\tilde{h}_d(v_x, v_y)$ – ПФ апертуры денситометра.

В системе радиационного контроля под исходным контрастом понимают радиационный контраст подлежащих обнаружению (разрешению) неоднородностей [1]:

$$k_0 = |\Delta\mu|d, \quad (5)$$

где d – максимальный лучевой размер неоднородности.

Для проведения практических расчетов величину R_{\max} удобно представить в следующей эквивалентной форме:

$$R_{\max} = \min(\bar{R}, R_0), \quad (6)$$

где

$$\bar{R} = \gamma \left\{ \bar{v} \geq 0 \left| 1 \geq \frac{\pi M_{\text{пор}}^2 S_d \bar{v}^2}{k_0^2 B_\Phi} \text{ при } v_x^2 + v_y^2 \leq \bar{v}^2 \right. \right\} = \frac{k_0 \sqrt{B_\Phi}}{\sqrt{\pi S_d} M_{\text{пор}}} \quad (7)$$

– составляющая РС, обусловленная наличием шума в СЦР;

$$R_0 = \gamma \left\{ \bar{v} \geq 0 \left| \left| \tilde{h}_d(v_x, v_y) \right| > 0 \text{ при } v_x^2 + v_y^2 \leq \bar{v}^2 \right. \right\} \quad (8)$$

– составляющая РС, обусловленная наличием нулей у ПФ искажающего фильтра (апертуры денситометра).

Заметим, следуя терминологии [8], что величина R_0 является предельной РС СЦР и для непрерывной функции $\tilde{h}_d(v_x, v_y)$ представляет собой расстояние от начала системы координат (в частотной плоскости) до ближайшего к нему нуля этой функции.

При подстановке (2), (5) в (7) получим развернутое выражение для составляющей РС, обусловленной наличием шума в СЦР:

$$\bar{R} = \frac{|\Delta\mu| d \sqrt{N_0 \exp[-\mu(E_{эф})H] T\epsilon}}{\sqrt{\pi M_{пор}}} \quad (9)$$

Из выражения (9) следует, что величина \bar{R} не зависит от апертуры денситометра. Поэтому, если существует возможность выбора формы и размеров апертуры денситометра, целесообразно, согласно (6), их выбирать таким образом, чтобы выполнялось условие $R_0 \geq \bar{R}$.

Полученные соотношения (4), (6), (8), (9) могут быть взяты за основу для оценки РС СЦР при заданных условиях контроля (тип источника излучения, толщина и материал ОК, тип рентгеновской пленки, фокусное расстояние и т. д.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кантер Б. М., Ключев В. В., Леонов Б. И., Соснин Ф. Р. Сканирующие средства радиационного контроля // Дефектоскопия. 1985. № 5.
2. Гусев Е. А. и др. Сканирующий рентгеновский интроскоп с одномерным матричным преобразователем на основе кремниевых детекторов излучения // Дефектоскопия. 1989. № 7.
3. Нуделмэн С., Рерих Х., Кэпп М. П. Электронно-оптическая цифровая рентгенография. Ч. III. Устройства формирования изображения и принципы проектирования систем // ТИИЭР. 1982. 70, № 7.
4. Недавний О. И., Максименко Б. В., Осипов С. П., Удод В. А. Многоканальные радиометрические системы контроля с полутоновой визуализацией теневых радиационных изображений. Ч. 1. Математическая модель // Дефектоскопия. 1993. № 4.
5. Недавний О. И., Максименко Б. В., Осипов С. П., Удод В. А. Многоканальные радиометрические системы контроля с полутоновой визуализацией теневых радиационных изображений. Ч. 2. Расчет оптимальных параметров систем // Там же. № 7.
6. Удод В. А. О разрешающей способности // Оптика атмосферы. 1989. 2, № 2.
7. Завьялкин Ф. М., Удод В. А. Максимальная разрешающая способность изображающих систем, достигаемая при апостериорной линейной фильтрации изображений // Автометрия. 1992. № 3. С. 75.
8. Вычислительная оптика /Под общ. ред. М. М. Русинова. Л.: Машиностроение, 1984.

*Научно-исследовательский институт интроскопии
Тамского политехнического университета*

*Поступило в редакцию
16 августа 1999 г.*