

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ВКЛЮЧЕНИЙ В ОБЪЕКТЕ КОНТРОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКАНИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЦИФРОВОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ (ОДНОМЕРНЫЙ ВАРИАНТ)

С.Э. Воробейчиков, В.А. Удод, В.А. Клименов, С.А. Щетинкин

Представлена математическая модель цифрового сигнала на выходе отдельного измерительного канала сканирующей системы цифровой рентгенографии, содержащей линейку детекторов, для случая, когда основным видом искажений сигнала является шум, обусловленный квантовой природой излучения. С использованием данной модели разработан в одномерном варианте алгоритм автоматического обнаружения локальных “критических” включений в объекте контроля и получены статистические оценки его эффективности на модельном примере.

Ключевые слова: алгоритм обнаружения, объект контроля, локальные включения, цифровая рентгенография, сканирующая система.

ВВЕДЕНИЕ

Чрезвычайные ситуации, все чаще возникающие при эксплуатации технологически сложных и опасных промышленных объектов (аварии на Чернобыльской АЭС, Саяно-Шушенской ГЭС и др.), со второй половины XX века дополнились масштабными террористическими актами на транспорте (2001 г. — атака на башни-близнецы США; 2009—2010 гг. — взрывы в метро, подрыв поезда Невский экспресс; 2011 г. — теракт в аэропорту Домодедово) [1, 2]. Как ответная мера в России и за рубежом на современном этапе сформировалось целое научное направление, именуемое “анти-террористической диагностикой”, призванное обеспечить безопасность пассажирских и грузовых перевозок [2—10].

Спектр задач, решаемых на основе систем антитеррористической диагностики (досмотровых систем), очень широк и включает, в частности, задачу автоматического обнаружения локальных критических включений (например, металлических поражающих элементов) в объекте контроля (ОК) [2]. Между тем, как следует из многочисленных публикаций (например, [10—13]), в настоящее время среди досмотровых систем (как, впрочем, и среди систем неразрушающего контроля, технической и медицинской диагностики) одно из доминирующих положений занимают многоканальные сканирующие системы цифровой рентгенографии на основе линейки детекторов (ССЦР). Вследствие этого вполне актуальной становится задача разработки алгоритма автоматического обнаружения локальных критических включений в ОК с использованием ССЦР.

Структура ССЦР включает в себя следующие основные элементы [10, 14, 15]: источник фотонного излучения — щелевой коллиматор источника — ОК — щелевой коллиматор детекторов — линейка детекторов — временные

Сергей Эрикович Воробейчиков, доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор кафедры высшей математики и математического моделирования Томского государственного университета. Тел. (3822) 558871. E-mail: sev@mail.tsu.ru

Виктор Анатольевич Удод, доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры математических методов и информационных технологий в экономике Томского государственного университета, ведущий научный сотрудник лаборатории № 40 Института неразрушающего контроля Томского государственного университета. Тел. (3822) 26-16-40. E-mail: pr.udod@mail.ru

Василий Александрович Клименов, доктор техн. наук, профессор, проректор-директор Института неразрушающего контроля Томского политехнического университета. Тел. (3822) 41-86-97. E-mail: klimenov@tpu.ru

Сергей Александрович Щетинкин, ведущий инженер, Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), Институт технических средств неразрушающего контроля. Тел. 8(495) 228-18-28. E-mail: ssaft@rambler.ru

интеграторы — аналого-цифровые преобразователи — компьютер — полутонный дисплей. Поэтому разработка алгоритма обнаружения локальных критических включений по существу сводится к разработке алгоритма обработки цифрового изображения, синтезируемого ССЦР (в компьютере), который позволяет в автоматическом режиме обнаруживать совокупность локальных критических включений в ОК с заданными вероятностными характеристиками.

Решение данной задачи в одномерном варианте (ввиду ее сложности), то есть разработка алгоритма обработки отдельной строки цифрового изображения — цифрового сигнала на выходе отдельного измерительного канала, позволяющего автоматически обнаруживать совокупность локальных критических включений в ОК, и является целью проводимых в настоящей работе исследований. В свою очередь, для достижения этой цели и создания возможности проведения адекватного математического моделирования, иллюстрирующего работу алгоритма, нам необходима (хотя бы упрощенная) математическая модель цифрового сигнала на выходе отдельного измерительного канала ССЦР, то есть на выходе отдельной комбинированной структуры: детектор — временной интегратор — аналого-цифровой преобразователь.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦИФРОВОГО СИГНАЛА НА ВЫХОДЕ ОТДЕЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА ССЦР

Для построения математической модели цифрового сигнала на выходе отдельного измерительного канала ССЦР предположим:

- ОК постоянной толщины;
- ОК содержит локальные включения;
- все локальные включения однородны и притом состоят из одного и того же материала;
- материал ОК вне зоны включений (“фоновый” материал) также является однородным;
- ОК перемещается вдоль оси Ox непрерывно с постоянной скоростью, а система источник — линейка детекторов неподвижна;
- детекторы излучения идентичны;
- поверхности приема излучения (апертуры) всех детекторов плоские и ортогональны к падающему излучению;
- размеры фокусного пятна источника излучения, апертур детекторов и шагов дискретизации радиационного изображения ОК малы по сравнению с размерами локальных включений;
- угол раствора рабочего пучка излучения незначительный (поток излучения близок к мононаправленному);
- поток излучения моноэнергетический;
- линейка детекторов ориентирована вдоль оси Oy симметрично относительно оси Oz (оси пучка излучения);
- детекторы в линейке расположены эквидистантно;
- применяется аналоговый режим регистрации излучения;
- вклад рассеянного излучения в ОК в результаты регистрации считается пренебрежимо малым (вследствие коллимирования источника и линейки детекторов);
- в качестве временных интеграторов применяют идеальные интеграторы со сбросом;
- шум цифрового сигнала на выходе измерительного канала обусловлен преимущественно квантовой природой излучения;
- шаг квантования отсчетов выходных процессов с временных интеграторов аналого-цифровыми преобразователями мал по сравнению со среднеквадратическими отклонениями отсчетов.

С учетом принятых предположений математическая модель цифрового сигнала $B(i)$ на выходе отдельного измерительного канала ССЦР опишем, согласно [16—18], соотношением вида

$$B(i) = \bar{B}(i) + B_{\text{ш}}(i), \quad (1)$$

здесь $\bar{B}(i)$ — цифровой сигнал, представляющий собой математическое ожидание сигнала $B(i)$;

$$\bar{B}(i) = N_{\phi} \exp(\Delta\mu l(i\Delta x; j_0\Delta y)) \bar{A}; \quad (2)$$

$$N_{\phi} = N_0 \exp(-\mu H) S \varepsilon T \quad (3)$$

— среднее число квантов (математическое ожидание числа квантов) излучения, регистрируемых отдельным детектором из линейки, расположенным под участком ОК, не содержащим включения; N_0 — плотность потока квантов излучения вблизи поверхности детекторов при отсутствии ОК; μ — линейный коэффициент ослабления (ЛКО) излучения для “фонового” материала ОК; H — толщина ОК; S — площадь апертуры отдельного детектора из линейки; ε — эффективность регистрации излучения детектором; T — время регистрации излучения (постоянная времени каждого из временных интеграторов); $\Delta\mu = \mu - \mu_{\text{в}}$; $\mu_{\text{в}}$ — ЛКО для материала включений; $l(x, y)$ — функция, описывающая лучевой размер (высоту) включений; x, y — переменные в плоскости, проходящей через центр фокусного пятна источника перпендикулярно оси Oz (оси пучка излучения); i — номер элемента (отсчета) цифрового сигнала; j_0 — номер измерительного канала ССЦР; $\Delta x, \Delta y$ — шаги дискретизации радиационного изображения ОК вдоль соответствующих координатных осей;

$$\Delta x = vT; \quad (4)$$

$$\Delta y = d_y; \quad (5)$$

где v — скорость сканирования (перемещения) ОК; d_y — шаг расположения детекторов в линейке (для плотно упакованной линейки равен ширине (размеру вдоль оси Oy) апертуры отдельного детектора); $\bar{A}$ — среднее значение (математическое ожидание) амплитуд электрических импульсов с выхода отдельного детектора линейки, $B, B_{\text{ш}}(i)$ — шум (обусловленный квантовой природой излучения) с нулевым средним значением и дисперсией

$$\sigma^2[B_{\text{ш}}(i)] = N_{\phi} \exp(\Delta\mu l(i\Delta x; j_0\Delta y)) (\overline{A^2}), \quad (6)$$

где $(\overline{A^2})$ — среднее значение (математическое ожидание) квадратов амплитуд электрических импульсов с выхода отдельного детектора линейки. Отдельные отсчеты шума (его компоненты), соответствующие различным значениям i , являются независимыми случайными величинами.

Из (2) можно получить амплитудную характеристику $f(l)$ тракта формирования цифрового сигнала, то есть зависимость между лучевым размером включения и амплитудой среднего значения (математического ожидания) цифрового сигнала, а именно:

$$f(l) = N_{\phi} \exp(\Delta\mu l) \bar{A}. \quad (7)$$

Следует заметить, что в перспективе для уже созданной системы контроля (для большей достоверности) целесообразно использовать амплитудную характеристику $f(l)$, полученную экспериментально путем просвечивания ОК, содержащего включения с разными лучевыми размерами.

Основываясь на изложенной модели (соотношениях (1)—(7)), приведем описание алгоритма обнаружения локальных критических включений в ОК. С этой целью для удобства предварительно введем определения нескольких вспомогательных понятий, которые будут использованы при описании алгоритма.

НЕКОТОРЫЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ПОНЯТИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ОПИСАНИИ АЛГОРИТМА ОБНАРУЖЕНИЯ

1. *Локальное критическое включение* — локальное включение, у которого средний лучевой размер (средняя высота) равен либо превосходит заданный пороговый размер $l_{\text{пор}}$.

2. *Пороговый объем* $V_{\text{пор}}$ — общий объем всей совокупности локальных критических включений для одного измерительного канала, при превышении либо равенстве, которому ОК признается потенциально опасным.

3. *Критический сигнал* — сигнал на выходе измерительного канала, для которого общий объем $V_{\text{общ}}$ соответствующих ему локальных критических включений превышает либо равен пороговому объему $V_{\text{пор}}$, то есть сигнал, для которого $V_{\text{общ}} \geq V_{\text{пор}}$.

4. *Пороговый критический сигнал* $S_{\text{пк}}$ — сигнал на выходе измерительного канала, который в точности соответствует совокупности локальных критических включений с *пороговыми параметрами* $l_{\text{пор}}$ и $V_{\text{пор}}$, то есть сигнал, для которого $l = l_{\text{пор}}$ и $V = V_{\text{пор}}$.

5. *Некритический сигнал* — сигнал на выходе измерительного канала, для которого общий объем $V_{\text{общ}}$ соответствующих ему локальных критических включений не превышает *заданной фиксированной части* порогового объема $V_{\text{пор}}$, то есть сигнал, для которого $V_{\text{общ}} \leq CV_{\text{пор}}$, где C ($0 < C < 1$) — постоянный множитель, задаваемый априори (например, по условиям технического задания на проведение контроля).

6. *Пороговый некритический сигнал* $S_{\text{пн}}$ — сигнал на выходе измерительного канала, для которого общий объем $V_{\text{общ}}$ соответствующих ему локальных критических включений в точности совпадает с *заданной фиксированной частью* порогового объема $V_{\text{пор}}$, то есть сигнал, для которого $V_{\text{общ}} = CV_{\text{пор}}$.

7. *Правильное обнаружение* — принятие решения о наличии в предъявленной реализации критического сигнала при условии, что он действительно содержится в этой реализации.

8. *Ложная тревога* — принятие решения о наличии в предъявленной реализации критического сигнала при условии, что в действительности в этой реализации содержится некритический сигнал.

Здесь необходимо заметить, что в традиционном понимании под “ложной тревогой” понимается ситуация, когда принимается решение о наличии сигнала в предъявленной реализации при условии, что в действительности он не содержится в этой реализации. В настоящей работе по существу общепринятое понятие “ложной тревоги” обобщается на целый класс “ненулевых” сигналов. При этом определяющим условием этого класса является (в данном случае) соотношение вида $V_{\text{общ}} \leq CV_{\text{пор}}$. Такая модификация традиционного понимания “ложной тревоги” обусловлена самой физической сущностью рассматриваемой задачи.

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ КРИТИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ОБЪЕКТЕ КОНТРОЛЯ

Принимая во внимание описанные выше вспомогательные понятия и математическую модель сигнала на выходе измерительного канала ССЦР (соотношения (1)–(7)), нами был разработан алгоритм автоматического обнаружения локальных критических включений в ОК, состоящий из следующих основных этапов.

Этап 1. Находится пороговый уровень $B_{\text{пор}}$ для сигнала на выходе измерительного канала, то есть уровень, соответствующий пороговому лучевому размеру $l_{\text{пор}}$ локального критического включения

$$B_{\text{пор}} = f(l_{\text{пор}}).$$

Этап 2. Вычисляется информационный пороговый уровень

$$B_{\text{инф}} = C_1 B_{\text{пор}},$$

где $C_1 (C_1 > 1)$ — постоянный множитель, способ выбора которого описан ниже.

Этап 3. Выделяются критические области, что соответствует обнаружению локальных критических включений. При этом под критической областью D_k понимается произвольное множество значений переменной i , которое обладает свойствами:

1) D_k связно;

2) $\langle B_k \rangle \leq B_{\text{инф}}$, где $\langle B_k \rangle$ — оценка математического ожидания сигнала $B(i)$ на множестве D_k , которая представляет собой среднее арифметическое значений сигнала $B(i)$ на множестве D_k .

Если общее число K_0 выделенных критических областей (обнаруженных локальных критических включений для одного (данного) измерительного канала) оказалось равным нулю, то процесс анализа данных прекращается и при этом ОК не признается потенциально опасным. Если же оказалось, что $K_0 \geq 1$, то делается переход к следующему этапу алгоритма.

Этап 4. Осуществляется преобразование оценок $\langle B_k \rangle$ в оценки l_k лучевых размеров локальных критических включений по формуле

$$l_k = f^{-1}(\langle B_k \rangle), k = 1, 2, \dots, K_0.$$

Этап 5. Оценивается объем каждого обнаруженного локального критического включения (в пределах, соответствующих данному измерительному каналу)

$$W_k = l_k \Delta x \Delta y |D_k|, k = 1, 2, \dots, K_0,$$

где вертикальные линии означают мощность множества D_k (число его элементов).

Этап 6. Оценивается общий объем обнаруженных локальных критических включений (в пределах, соответствующих одному измерительному каналу)

$$W_{\text{общ}} = \sum_{k=1}^{K_0} W_k.$$

Этап 7. Вычисляется информационный пороговый объем всей совокупности локальных критических включений (на один измерительный канал)

$$V_{\text{инф}} = C_2 V_{\text{пор}},$$

где $C_2 (0 < C_2 < 1)$ — постоянный множитель, способ выбора которого (также, как и C_1) описан ниже.

Этап 8. Принятые решения:

если $W_{\text{общ}} \geq V_{\text{инф}}$, то ОК признается потенциально опасным;

если $W_{\text{общ}} < V_{\text{инф}}$, то ОК не признается потенциально опасным.

Заметим, что параметры K_0 , W_k , $W_{\text{общ}}$ зависят (хотя и в неявной форме) от множителя C_1 .

Постоянные множители C_1 и C_2 выбираются эмпирическим путем из условия обеспечения заданной вероятности правильного обнаружения (при наличии сигнала $S_{\text{пк}}$) и заданной вероятности ложной тревоги (при наличии сигнала $S_{\text{пн}}$), то есть из системы неравенств:

$$\begin{cases} P \{W_{\text{общ}} \geq V_{\text{инф}} | S_{\text{пк}}\} \geq P_{\text{пр}}; \\ P \{W_{\text{общ}} \geq V_{\text{инф}} | S_{\text{пн}}\} \leq P_{\text{лт}} \end{cases}$$

или (что то же самое)

$$\begin{cases} P \{W_{\text{общ}}(C_1) \geq C_2 V_{\text{пор}} | S_{\text{пк}}\} \geq P_{\text{пр}}; \\ P \{W_{\text{общ}}(C_1) \geq C_2 V_{\text{пор}} | S_{\text{пн}}\} \leq P_{\text{лт}}, \end{cases}$$

где $P_{\text{пр}}$, $P_{\text{лт}}$ — заданные вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги соответственно.

Основу вышеизложенного алгоритма составляет специально разработанная процедура выделения критических областей, реализуемая на этапе 3. Ввиду существенного значения этой процедуры приведем ее описание более подробно.

ПРОЦЕДУРА ВЫДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ОБЛАСТЕЙ

В основе действия процедуры, предназначенной для выделения критических областей, лежит предположение о том, что анализируемый сигнал может быть разделен на непересекающиеся участки, на каждом из которых математическое ожидание сигнала и его дисперсия отличаются от этих же характеристик на соседних участках. Для выделения границ однородных (имеющих постоянные характеристики) участков используется модифицированный алгоритм кумулятивных сумм (CUSUM) [19, 20].

Приведем сначала некоторые общие положения, лежащие в основе построения алгоритма CUSUM.

Предположим, что имеется выборка из N наблюдений $x_1, x_2, \dots, x_N$, которые являются независимыми и имеют гауссовское распределение, причем математическое ожидание первых n наблюдений равно m_0 , а остальные имеют математическое ожидание m_1 . Значение n (момент разладки) предполагается неизвестным, а дисперсия всех наблюдений (для простоты) — равной 1. Тогда для оценки параметра n по методу максимального правдоподобия (или по методу наименьших квадратов) необходимо найти минимальное значение следующей функции (кумулятивной суммы) по дискретной переменной m

$$I(m) = \sum_{k=1}^m (x_k - m_0)^2 + \sum_{k=m+1}^N (x_k - m_1)^2, \quad m = 0, 1, \dots, N.$$

При этом в качестве оценки параметра n выбирается $\text{argmin}(I(m))$ — точка минимума функции $I(m)$.

Поскольку заранее может быть неизвестна величина объема выборки N , в которой происходит изменение математического ожидания наблюдений, то для обнаружения момента изменения математического ожидания (момента разладки) применим алгоритм CUSUM [19, 20], определяемый формулами:

$$G_k = \max \left(G_{k-1} + x_k - \frac{m_0 + m_1}{2}, 0 \right); \quad G_0 = 0.$$

При этом задается параметр процедуры — порог h ($h > 0$) и решение об изменении математического ожидания в наблюдаемой последовательности принимается, когда впервые $G_k > h$. В качестве оценки параметра n выбирается последнее значение k , для которого $G_k = 0$. Следует заметить, что алгоритм CUSUM ориентирован на обнаружение однократного увеличения математического ожидания наблюдаемого сигнала.

Для применения указанной процедуры необходимо знать значения m_0 и m_1 . В действительности же они априорно неизвестны. Поэтому было предложено дополнительно модифицировать процедуру CUSUM следующим образом [21, 22]: вводятся параметры процедуры δ и L , а последовательность кумулятивных сумм G_k определяется по формулам:

$$G_k = \max(G_{k-1} + x_k - x_{k-L} - \delta, 0); \quad G_L = 0, \quad k = L + 1, \dots \quad (8)$$

Решение об изменении математического ожидания наблюдений принимается, когда впервые $G_k > h$. Модификация состоит в том, что используется сравнение значений наблюдений, отстоящих друг от друга на величину L . При этом математическое ожидание разности $x_k - x_{k-L}$ остается равным нулю, если эти наблюдения принадлежат участку данных с одинаковым математическим ожиданием. Сами значения математических ожиданий в процедуре не используются.

Описанная процедура ориентирована на обнаружение момента увеличения математического ожидания наблюдений. Для обнаружения момента уменьшения математического ожидания применяется аналогичная процедура, в которой кумулятивные суммы P_k вычисляются по формулам:

$$P_k = \max(P_{k-1} + x_k - x_{k-L} - \delta, 0); \quad P_L = 0, \quad k = L + 1, \dots \quad (9)$$

При обработке последовательности наблюдений обе процедуры используются одновременно.

Для практического применения описанной процедуры выделения (обнаружения однородных участков) рекомендуется выбирать используемые в ней параметры δ , h и L следующим образом:

1) δ — равным половине ожидаемой величины скачка математического ожидания;

2) $3\delta \leq h \leq 4\delta$;

3) L — равным ожидаемой минимальной длине участка, на котором значение математического ожидания наблюдений остается постоянным.

Следует заметить, что эффективность данной процедуры может быть повышена, если указанные параметры δ , h и L выбирать адаптивно в процессе решения конкретной задачи.

На обобщенном уровне действие вышеописанной модифицированной процедуры CUSUM, предназначенной для выделения критических областей D_k , происходит в два этапа, описание которых приведено ниже.

На первом этапе осуществляется “разметка” анализируемого сигнала $B(i)$. Это означает, что осуществляется разбиение области определения сигнала $B(i)$ (всего множества значений переменной i) на участки однородности, то есть на такие непересекающиеся участки, в пределах каждого из которых математическое ожидание сигнала $B(i)$ и его дисперсия постоянны. Для этого одновременно вычисляются кумулятивные суммы (8) и (9). При достижении одной из них порога h фиксируется момент изменения n_i математического ожидания наблюдений. Значение соответствующей кумулятивной суммы полагается равной нулю. Если оказывается, что скачок математического ожидания произошел в том же направлении (в сторону увеличения или уменьшения), что и в предыдущий момент n_{i-1} , и при этом разность $n_i - n_{i-1} < L$, то значение n_i не запоминается. Вычисление сумм (8),

(9) продолжается до тех пор, пока значение k не достигнет N . В результате формируется набор точек $n_0 = 0, n_1, \dots, n_m = N$, в которых зафиксирована смена модели наблюдаемого процесса. Здесь величина $m - 1$ определяет количество моментов разладки, то есть количество обнаруженных точек смены модели.

На втором этапе производится селективный отбор критических областей среди всей совокупности участков однородности. Для этого на каждом выделенном участке однородности $[n_{i-1} + 1, n_i]$ оценивается математическое ожидание сигнала $B(i)$ (вычисляется среднее арифметическое значений на участке). Если полученная оценка математического ожидания не превосходит информационного порога $B_{\text{инф}}$, то участок признается критическим. Если же полученная оценка математического ожидания оказывается неположительной (из-за влияния шума), то она заменяется на величину амплитудного порога, определяемого так:

$$B_{\text{ампл}} = \frac{B_{\Phi}}{L_{\text{одд}}},$$

где $L_{\text{одд}}$ — относительный динамический диапазон, равный отношению максимального значения к минимальному, которые “отводятся” для амплитуды цифрового сигнала.

Здесь необходимо заметить, что описанная процедура выделения критических областей непосредственно применима только для обработки случайных сигналов, у которых математическое ожидание и дисперсия являются кусочно-постоянными функциями дискретного аргумента. Между тем, сам алгоритм автоматического обнаружения локальных критических включений в ОК (точнее, его этап 3) оказывается работоспособным и в более общем случае.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ АЛГОРИТМА ОБНАРУЖЕНИЯ

Для проведения математического моделирования предположим, что ОК представляет собой аналог штриховой радиационной миры, поскольку данная мира широко используется в виде тестового образца для экспериментальной оценки качества функционирования (для оценки пространственной разрешающей способности) изображающих систем неразрушающего радиационного контроля. В соответствии с этим примем:

совокупность всех локальных включений в ОК образует периодическую структуру, изменение в которой происходит вдоль оси Ox ;

каждое из включений имеет постоянную высоту (лучевой размер), равную l , и длину (размер вдоль оси Ox), равную a ;

расстояние между соседними включениями постоянно и равно длине a включения.

Для указанной совокупности локальных включений функция, описывающая их лучевой размер, будет иметь следующий вид:

$$l(x, y) = l(x) = \begin{cases} l, & x \in Q; \\ 0, & x \notin Q, \end{cases} \quad (10)$$

где $Q = \bigcup_{k=1}^K Q_k$ — проекция всей совокупности включений на ось Ox ;

Q_k — проекция k -го локального включения на ось Ox ; K — общее число локальных включений в ОК. Заметим, что длина каждой проекции равна расстоянию между проекциями и равна a .

Предположим также, что амплитудный разброс электрических импульсов с выхода отдельного детектора линейки незначителен, то есть будем полагать

$$A = \bar{A}, \quad (11)$$

что вполне приемлемо для моноэнергетических источников излучения и детекторов полного поглощения.

При подстановке (10) и (11) в (2), (6), (7) получим:

$$\bar{B}(i) = \begin{cases} B_{\phi}, & i \notin Q_0; \\ B_{\psi}, & i \in Q_0; \end{cases} \quad (12)$$

$$\sigma^2[B_{\psi}(i)] = \begin{cases} \sigma_{\phi}^2, & i \notin Q_0; \\ \sigma_{\psi}^2, & i \in Q_0; \end{cases} \quad (13)$$

$$f(l) = N_{\phi} \exp(\Delta \mu l) A. \quad (14)$$

Здесь

$$B_{\phi} = N_{\phi} A \quad (15)$$

— фоновый уровень (фон) цифрового сигнала, соответствующий участкам ОК, не содержащим локальные включения;

$$B_{\psi} = N_{\psi} \exp(\Delta \mu l) A \quad (16)$$

— уровень цифрового сигнала, соответствующий участкам ОК, содержащим локальные включения; Q_0 — дискретное множество значений переменной i , соответствующее проекции Q совокупности включений на ось Ox ;

$$\sigma_{\phi}^2 = N_{\phi} A^2 \quad (17)$$

— дисперсия цифрового сигнала в области фона;

$$\sigma_{\psi}^2 = N_{\psi} \exp(\Delta \mu l) A^2 \quad (18)$$

— дисперсия цифрового сигнала, соответствующая участкам ОК, содержащим локальные включения.

Предположим теперь, что длина a локального включения (соответственно и расстояние между соседними включениями) кратна шагу дискретизации Δx . Тогда протяженность p (в количестве отсчетов) “провалов” (минимальных уровней сигнала $\bar{B}(i)$) и протяженность r (также в количестве отсчетов) “фоновых” участков (максимальных уровней сигнала $\bar{B}(i)$) будут равны

$$p = r = \frac{a}{\Delta x}.$$

Предположим далее, что материал включений намного плотнее основного (“фонового”) материала ОК, тогда

$$\Delta \mu = -\mu_{\psi}. \quad (19)$$

Допустим, что энергия квантов излучения равна эффективной энергии, соответствующей просвечиванию стальной (железной) пластины толщиной, равной пороговому значению $l_{\text{пор}}$ лучевого размера локального включения.

Тогда эффективное значение ЛКО μ_v найдем, согласно [23], из уравнения

$$\exp(-\mu_v l_{\text{пор}}) = \int_0^{E_0} (\exp(-\mu_c(E) l_{\text{пор}})) I(E) dE, \quad (20)$$

где μ_c — ЛКО для стали (железа); $\mu_v = \mu_{c \text{ эфф}}$; $\mu_{c \text{ эфф}}$ — эффективное значение ЛКО для стальной (железной) пластины толщиной $l_{\text{пор}}$; $I(E)$ — нормированный по площади на единицу энергетический спектр интенсивности излучения от источника; E_0 — максимальная энергия в спектре излучения. Для рентгеновских источников излучения энергетический спектр удовлетворительно описывается формулой Крамерса [24]. В нормированной форме он будет иметь следующий вид:

$$I(E) = \frac{2}{E_0^2} (E_0 - E); \quad 0 \leq E \leq E_0. \quad (21)$$

Предположим теперь, что:

$$l_{\text{пор}} = 5 \text{ мм}; \quad (22)$$

$$E_0 = 145 \text{ кэВ}, \quad (23)$$

что соответствует напряжению на рентгеновской трубке $U = 145 \text{ Кв}$.

При подстановке (21)—(23) в (20) после проведения вычислений с использованием данных о ЛКО железа [25] получаем

$$\mu_v = 5,82 \text{ см}^{-1}. \quad (24)$$

С учетом (19) и (24) будем иметь

$$\Delta\mu = -5,82 \text{ см}^{-1}. \quad (25)$$

Подставляя (25) в (14), (16) и (18) и учитывая (1), (12), (13), (15) и (17), окончательно получаем выражения, которые непосредственно будут использоваться для проведения математического моделирования:

$$B(i) = \bar{B}(i) + B_{\text{ш}}(i); \quad (26)$$

$$\bar{B}(i) = \begin{cases} B_{\text{ф}}, & i \notin Q_0 \\ B_v, & i \in Q_0 \end{cases} = \begin{cases} N_{\text{ф}} A, & i \notin Q_0, \\ N_{\text{ф}} (\exp(-5,82l)) A, & i \in Q_0; \end{cases} \quad (27)$$

$$\sigma^2[B_{\text{ш}}(i)] = \begin{cases} \sigma_{\text{ф}}^2, & i \notin Q_0 \\ \sigma_v^2, & i \in Q_0 \end{cases} = \begin{cases} N_{\text{ф}} A^2, & i \notin Q_0, \\ N_{\text{ф}} \exp(-5,82l) A^2, & i \in Q_0; \end{cases} \quad (28)$$

$$f(l) = N_{\text{ф}} \exp(-5,82l) A. \quad (29)$$

Параметры локальных включений и системы контроля с учетом соотношений (26)—(29) были выбраны следующим образом:

$$a = a_{\text{пор}} = l_{\text{пор}} = 5 \text{ мм};$$

$K_{\text{пор}} = 100$ — пороговое число локальных критических включений;

$$N_{\text{ф}} = 50; A = 1 \text{ В}; \Delta x = \Delta y = 0,5 \text{ мм};$$

$L_{\text{одд}} = 30$ (это соответствует данным, полученным по цифровой рентгенограмме модельного объекта, содержащего локальные металлические включения разной формы).

Остальные параметры (K и l) в процессе моделирования подвергали варьированию. Отсчеты шума предполагали распределенными по нормальному закону. При этом “фоновое” отношение сигнал/шум M , соответствующее участкам ОК, содержащим локальные включения, для порогового лучевого размера $l = l_{\text{пор}} = 5$ мм, с учетом соотношений (27), (28), оказывается равным

$$M = \frac{B_{\text{в}}}{\sigma_{\text{в}}} = \sqrt{N_{\text{ф}} \exp(-5,82l)} = \sqrt{50 \exp(-2,91)} \approx 1,64.$$

Пороговый объем совокупности локальных критических включений был принят равным

$$V_{\text{пор}} = a_{\text{пор}} \cdot \Delta y \cdot l_{\text{пор}} \cdot K_{\text{пор}} = 5 \text{ мм} \cdot 0,5 \text{ мм} \cdot 5 \text{ мм} \cdot 100 = 1250 \text{ мм}^3 = 1,25 \text{ см}^3.$$

Фактический объем совокупности локальных критических включений вычисляли по формуле $V = a \cdot \Delta y \cdot l \cdot K$.

Параметры δ , h и L алгоритма обнаружения (процедуры выделения критических областей) были настроены (выбраны), исходя из общих рекомендаций, по параметрам порогового критического сигнала, под которым в данном случае подразумевался сигнал, соответствующий совокупности локальных критических включений с пороговыми параметрами $l_{\text{пор}}$, $a_{\text{пор}}$, $K_{\text{пор}}$, а именно:

$$L = \frac{a_{\text{пор}}}{\Delta x} - 1 = \frac{5 \text{ мм}}{0,5 \text{ мм}} - 1 = 9;$$

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{B_{\text{ф}} - B_{\text{в}}}{2} = \frac{N_{\text{ф}} A - N_{\text{ф}} A \exp(-5,82l_{\text{пор}})}{2} = \\ &= \frac{50 \cdot 1\text{В} - 50 \cdot 1\text{В} \cdot \exp(-5,82 \text{ см}^{-1} \cdot 0,5 \text{ см})}{2} = 24 \text{ В}; \end{aligned}$$

$$h = 3,5\delta = 84 \text{ В}.$$

Параметр C (для моделирования ложной тревоги) был принят равным 0,97. Соответственно при этом под пороговым некритическим сигналом подразумевался сигнал, соответствующий совокупности локальных критических включений с параметрами $l_{\text{пор}}$, $a_{\text{пор}}$ и $0,97 K_{\text{пор}}$.

Теоретические вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги соответственно были выбраны 0,98 и 0,02. Для данных значений вероятностей было проведено математическое моделирование реализаций (выходных процессов измерительного канала), соответствующих правильному обнаружению и ложной тревоге. При этом в качестве тестовых использовали описанные выше пороговый критический и пороговый некритический сигналы. В результате чего получены следующие значения множителей C_1 и C_2 : $C_1 = 4,6$; $C_2 = 0,98$.

Для каждого набора варьируемых параметров (параметров K и l) проводили моделирование 1000 независимых реализаций сигнала $B(i)$. Каждую из смоделированных реализаций подвергали обработке по описанному выше алгоритму.

В табл. 1 и 2 представлены итоговые результаты моделирования и статистические оценки эффективности алгоритма обнаружения, то есть статистические оценки вероятности правильного обнаружения и вероятности ложной тревоги.

Таблица 1

Результаты моделирования правильного обнаружения

Параметры включений		Статистическая оценка вероятности правильного обнаружения
K	l , см	$P_{пр}$
100	0,5	0,985
110	0,5	1
100	0,55	1

Таблица 2

Результаты моделирования ложной тревоги

Параметры включений		Статистическая оценка вероятности ложной тревоги
K	l , см	$P_{лт}$
97	0,5	0,016
90	0,5	0
97	0,4	0

Как следует из результатов моделирования, разработанный одномерный алгоритм автоматического обнаружения локальных критических включений в ОК является достаточно эффективным и вследствие этого может быть использован для обработки сигналов на выходе измерительных каналов ССЦР (при соответствующей настройке его параметров δ , h , L , C_1 , C_2 по обучающей выборке экспериментальных данных).

Работа выполнена в рамках госзадания “Наука” и при поддержке гранта РФФИ № 13-08-98027 “Разработка информационной системы идентификации локальных включений на основе метода многоэнергетической цифровой рентгенографии”.

Томский государственный университет
Томский политехнический университет
Московский государственный институт
радиотехники, электроники и автоматики
(технический университет)

Поступила в редакцию
25 июня 2013 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ключев В.В., Бобров В.Т. Техническая диагностика — основа безопасности страны. — Контроль. Диагностика, 2011, № 5, с. 55—61.
2. Сессия научного совета по автоматизированным системам диагностики и испытаний РАН по проблемам обеспечения безопасности на транспорте. — Контроль. Диагностика, 2011, № 5, с. 61—67.
3. Macdonald Richard D.R. Design and implementation of a dual-energy X-ray imaging system for organic material detection in an airport security application. — Proc. SPIE, 2001, v. 4301, p. 31—41.
4. Ji Sung, Park and Jong Kyung Kim. Calculation of effective atomic number and normal density using a source weighting method in a dual energy X-ray inspection system. — Journal of the Korean physical society, 2011, v. 59, No. 4, p. 2709—2713.
5. Ковалев А.В., Самокрутов А.А., Федчишин А.Г., Шевалдыкин В.Г. Специальные поисковые средства интроскопии. — Контроль. Диагностика, 1999, № 5, с. 24—28.
6. Ковалев А.В. Антитеррористическая и криминалистическая диагностика. — Контроль. Диагностика, 2004, № 2, с. 21—29.

7. Усачев Е.Ю. Разработка и внедрение мобильных рентгеноскопических систем для промышленной дефектоскопии и антитеррористической диагностики: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Томск, 2005.— 20 с.
8. Щетинкин С.А., Чахлов С.В., Усачев Е.Ю. Использование метода двуэнергетической цифровой радиографии для портативных рентгенотелевизионных систем.— Контроль. Диагностика, 2006, № 2, с. 49—52.
9. Лебедев М.Б., Усачев Е.Ю., Чумаков Д.М., Касьянов В.А., Касьянов С.В., Сидуленко О.А., Штейн М.М. Установка для рентгеновского контроля крупногабаритных объектов (грузовых и легковых автомобилей, контейнеров для морских авиаперевозок).— 6-я Междунар. конф. “Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности”. Тез. докл.— Москва, 15—17 мая 2007 г., с. 69—70.
10. Лебедев М.Б., Сидуленко О.А., Удод В.А. Анализ современного состояния и развития систем цифровой рентгенографии.— Известия Томского политехнического университета, 2008, т. 312, № 2, с. 47—55.
11. Спирин Д.О., Бердников Я.А., Гавриш Ю.Н. Принципы интроскопии крупногабаритных грузов.— Науч.-техн. ведомости СПбГТУ, 2010, № 2, с. 120—127.
12. Огородников С.А. Распознавание материалов при радиационном таможенном контроле на базе линейного ускорителя электронов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Санкт-Петербург, 2002.— 16 с.
13. Недавний О.И., Осипов С.П., Касьянов С.В. Исследование возможности применения малогабаритных бетатронов для идентификации веществ объектов контроля методом дуальных энергий.— Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2008, № 8, с. 46—52.
14. Недавний О.И., Удод В.А. Современное состояние систем цифровой рентгенографии (обзор).— Дефектоскопия, 2001, № 8, с. 62—82.
15. Лебедев М.Б., Сидуленко О.А., Удод В.А. Оптимальный выбор параметров многоканальных непрерывно-сканирующих систем цифровой рентгенографии.— Дефектоскопия, 2009, № 10, с. 58—77.
16. Недавний О.И., Удод В.А. Математическая модель многоканальных сканирующих систем цифровой рентгенографии.— Контроль. Диагностика, 2002, № 2, с. 27—33.
17. Лебедев М.Б., Сидуленко О.А., Удод В.А. Математическая модель многоканальных непрерывно-сканирующих систем цифровой рентгенографии.— Дефектоскопия, 2007, № 6, с. 65—72.
18. Лебедев М.Б. Оптимизация параметров многоканальных непрерывно-сканирующих систем цифровой рентгенографии.— Дис. ... канд. техн. наук.— Томск, 2009.— 166 с.
19. Lorden G. Procedures for reacting to a change in distribution.— Annals. Math. Statist, 1971, No. 42, p. 1897—1908.
20. Pollak M. Optimal detection of a change in distribution.— Ann. Statist, 1985, No. 13, p. 206—227.
21. Воробейчиков С.Э. Об обнаружении изменения среднего в последовательности случайных величин.— Автоматика и телемеханика, 1998, № 3, с. 50—58.
22. Воробейчиков С.Э., Кабанова Т.В. Обнаружение момента разладки последовательности независимых случайных величин.— Радиотехника и электроника, РАН, 2002, т. 47, № 10, с. 1198—1203.
23. Воробьев В.А., Горбунов В.И., Покровский А.В. Бетатроны в дефектоскопии.— М.: Атомиздат, 1973.— 176 с.
24. Рентгентехника. Справочник. В 2-х кн. Кн. 1. Под ред. В.В. Ключева.— М.: Машиностроение, 1980.— 431 с.
25. Машкович В.П. Защита от ионизирующих излучений. Справочник, 3-е изд., перераб. и доп.— М.: Энергоатомиздат, 1982.— 296 с.