

УДК 621.039.84: 620.179.15

ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МАЛОДОЗОВЫЙ МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

А. Д. Абашкин, С. П. Осипов, А. М. Штейн

Томский политехнический университет,
г. Томск

Статья посвящена исследованию возможностей распознавания материалов объектов и их фрагментов в досмотровом контроле высокоэнергетическим методом дуальных энергий в условиях малых мощностей доз рентгеновского излучения.

Ключевые слова: досмотровый контроль, радиография, метод дуальных энергий.

Распознавание материалов объектов досмотрового контроля (ОК) и его фрагментов остается одной из важнейших проблем, решаемых таможенными и пограничными органами стран мира и службами обеспечения безопасности пассажирских и грузовых перевозок. Под распознаванием материалов применительно к досмотровому контролю традиционно понимают сопоставление материалов ОК или его фрагментов по эффективному атомному номеру (Z_{eff}) или другому связанному с ним параметру к одному из достаточно широких классов веществ. Все материалы делят на ряд классов, причем каждый из этих классов соотносится со своим диапазоном изменения Z_{eff} и ассоциируется с наиболее типичным своим представителем. К классу органических материалов относят, например, воду, графит, полиэтилен и т.п., любой из указанных материалов может быть выбран в качестве типичного представителя класса. Класс материалов с малым значением Z_{eff} ассоциируется с алюминием. Типичным представителем класса металлов и сплавов со средним значением Z_{eff} является сталь. Класс материалов с большим значением Z_{eff} ассоциируют со свинцом. Двух энергетическую и многоэнергетическую реализации цифровой радиографии применяют для распознавания материалов ОК и их фрагментов [1, 2]. Двух энергетическую цифровую радиографию называют методом дуальных энергий (МДЭ). Различают две основных реализации МДЭ – низкоэнергетическую и высокоэнергетическую. В низкоэнергетической реализации МДЭ используются источники рентгеновского излучения до 150 кэВ, поэтому контролируются объекты небольших размеров (багаж,

ручная кладь, почтовые отправления) [3, 4]. В высокоэнергетической реализации МДЭ применяют источники рентгеновского излучения с максимальной энергией в от 2 до 9 МэВ (бетатроны и линейные ускорители) [5–6]. Высокоэнергетическим МДЭ контролируются крупногабаритные объекты: железнодорожные, и морские контейнеры, легковые и грузовые автомобили, железнодорожные вагоны. К характеристикам инспекционных досмотровых комплексов (ИДК) анализируемого типа относятся производительность и разрешение по эффективному атомному номеру. Под разрешением по эффективному атомному номеру понимается разность Z_{eff} материалов фрагментов ОК, которые достоверно различаются комплексом. В силу особенностей взаимодействия рентгеновского излучения с веществом низко и высокоэнергетические реализации МДЭ существенно различаются по пределу разрешения по Z_{eff} .

Принцип физической реализуемости определяется наличием физических закономерностей, связывающих оцениваемые параметры ОК с измеряемыми физическими величинами. Применительно к досмотровому контролю с помощью МДЭ оцениваемым параметром ОК является Z_{eff} или связанный с ним параметр. Измеряемые физические величины в МДЭ – это значения энергии, поглощенной в радиометрических детекторах, для двух максимальных энергий рентгеновского излучения. Математическая формализация принципа физической реализуемости применительно к МДЭ подробно описана в научной литературе [7, 8].

Таможенные органы различных стран выдвигают дополнительное требование к

ИДК. Оно связано со снижением мощности поглощенной дозы источника рентгеновского излучения до уровня 0,2–0,3 сГр/мин на расстоянии 1 метр. Номинальная мощность поглощенной дозы для бетатрона МИБ–7,5 на расстоянии 1 метр составляет 5 сГр/мин. Это означает, что количество зарегистрированных детектором фотонов при прочих равных условиях упадет при выполнении указанного требования в 15–30 раз. Возникает вопрос работоспособности ИДК и алгоритмов распознавания при таких условиях.

Проектирование ИДК и составляющих их элементов базируется на принципах физической и технической реализуемости. При изменении мощности дозы источника высокоэнергетического излучения изменяется только количество излучаемых фотонов. Энергетический спектр рентгеновского излучения, его угловое распределение в остаются неизменными. Физические закономерности взаимодействия фотонного излучения с материалом ОК не зависят от мощности дозы источника излучения. Это означает, что определяющим принципом применительно к модернизации ИДК с функцией распознавания материалов ОК и их фрагментов с помощью МДЭ для малых мощностей доз излучения является принцип технической реализуемости, с которым и связаны основные проверяемые гипотезы, предположения и проблемные вопросы.

Для облегчения понимания сути проблемы введем важное понятие.

Определение. Инвариантом способа распознавания материалов с помощью МДЭ $I_{\text{МДЭ}}$ назовем произведение мощности дозы излучения P на время формирования t пар строк первичных радиографических изображений и на площадь изображения части фрагмента S_{γ} , материал которого распознается с вероятностью большей γ .

Формула, соответствующая введенному определению, имеет вид

$$I_{\text{МДЭ}} = PS_{\gamma}t. \quad (1)$$

Площадь S_{γ} зависит от массовой толщины и материала фрагмента, числа зарегистрированных фотонов и т.д. Из анализа выражения (1) очевиден вывод о том, что поддержание инварианта $I_{\text{МДЭ}}$ на заданном уровне обеспечивается при уменьшении мощности излучения пропорциональным увеличением площади S_{γ} или времени измерения t . Из этого вывода можно сформулировать проверяемую гипотезу.

Проверяемая гипотеза. Ухудшение качества распознавания материалов ОК и их фрагментов с помощью МДЭ, обусловленное уменьшением мощности дозы источника рентгеновского излучения, компенсируется уменьшением производительности контроля и (или) увеличением площади фрагмента объекта контроля, материал которого распознается с заданной степенью доверия.

Пусть в процессе экспериментальных исследований для мощности дозы излучения P_0 получено, что материал фрагмента с площадью изображения $S_{\gamma 0}$ распознается с вероятностью γ для времени измерения t_0 . В соответствии с проверяемой гипотезой запишем условие поддержания инварианта (1) на одном и том же уровне

$$S_{\gamma}t = \frac{P_0 S_{\gamma 0} t_0}{P}. \quad (2)$$

Максимальная производительность ИДК Π с функцией распознавания материалов с помощью МДЭ рассчитывается (определяется экспериментально) для транспортных средств с усредненной длиной L и определяется временем формирования пар строк первичных радиографических изображений t и количеством столбцов M изображений

$$\Pi = \frac{L}{Mt + T_0}, \quad (3)$$

здесь T_0 – минимальный технологический промежуток времени между сканированием двух транспортных средств, следующих друг за другом. В ИДК анализируемого типа применяются импульсные источники высокоэнергетического рентгеновского излучения, поэтому свяжем производительность Π с частотой ν следования импульсов излучения. Для формирования пары соответствующих друг другу строк двух первичных радиографических изображений необходим пакет импульсов. Указанный пакет импульсов состоит из k_L импульсов рентгеновского излучения с меньшей энергией и k_H импульсов рентгеновского излучения с большей энергией. С учетом сказанного выражение (3) примет вид

$$\Pi = \frac{\nu L}{M(k_L + k_H) + T_0 \nu}. \quad (4)$$

Производительность максимальна, если $k_L=1$ и $k_H=1$.

Сведем воедино формулы (2) и (3) с учетом (4)

$$S_y(k_L + k_H) = \frac{P_0 S_{y0}}{PM} \left(\frac{L}{\Pi_0} - T_0 \right) \quad (5)$$

Формула (5) является уравнением связи основных технических характеристик ИДК.

Отметим, что применительно к анализируемой задаче увеличение минимальной площади фрагмента ОК, материал которого надежно распознается, является более предпочтительным подходом, чем уменьшение производительности ИДК.

Возможные причины возникновения проблемных вопросов, связанные с уменьшением мощности дозы излучения. В настоящее время максимальная мощность дозы излучения в ИДК, работающих на базе малогабаритных импульсных бетатронов МИБ 4/7,5, составляет 5 сГр/мин. По техническому заданию мощность дозы должна быть уменьшена до 0,2–0,3 сГр/мин, то есть в 16–20 раз. Следовательно, в диапазоне регулирования мощности дозы излучения от 0,2 до 5 сГр/мин и сохранении максимального значения массовой толщины ОК на уровне 120 г/см² диапазон изменения радиометрического сигнала также увеличится в 16–20 раз. Увеличение диапазона изменения радиометрического сигнала и приводит к возникновению нескольких проблемных вопросов. К основным проблемным вопросам следует отнести возможную нелинейность усилителей радиометрических сигналов и недостаточную разрядность АЦП. Эти факторы приводят к появлению систематических погрешностей в исходных радиографических изображениях и к смещению значения параметра распознавания материалов и, как следствие, к некорректному распознаванию.

Главным фактором, снижающим качество функционирования ИДК с функцией распознавания материалов с помощью МДЭ, является снижение количества фотонов, регистрируемых единичным детектором.

Экспериментально оценивалось качество распознавания следующих материалов: органические материалы – мука, плексиглас, вода; легкие металлы и неорганические материалы – алюминий, цемент, поваренная соль; металлы со средним значением эффективного атомного номера – сталь, медь; тяжелые металлы – свинец. Массовые толщины фрагментов близки к 40 г/см².

Всего было проведено 9 циклов сканирования тестовых объектов. В каждом цикле изменялась мощность дозы излучения – 3; 2; 1; 0,5 сГр/мин. Тестовые объекты от цикла к

циклу отличались взаимным расположением фрагментов из различных материалов по высоте. Нижние блоки детекторов работали при более низких уровнях мощности дозы излучения, чем центральные блоки.

Из анализа полученных изображений можно сделать ряд выводов о том, что с уменьшением мощности дозы:

- возрастают уровни шумов полутонных изображений и цветовые шумы;
- искажается цвет значительной части фрагментов;
- искажения выражены на периферии.

Заключение.

В статье рассмотрены проблемы распознавания материалов ОК с помощью МДЭ, связанные с уменьшением мощности поглощенной дозы излучения.

С уменьшением мощности дозы излучения существенно изменяется диапазон изменения радиометрических сигналов, в результате чего уменьшается толщина фрагментов, материалы которых распознаются с заданной вероятностью.

Введен инвариант способа распознавания материалов, позволяющий связать качество распознавания с производительностью ИДК и площадью фрагмента ОК, материал которого распознается с заданной вероятностью.

Показано, что увеличение минимальной площади фрагмента является единственным подходом, позволяющим сохранить качество распознавания на заданном уровне.

Экспериментально доказана возможность удовлетворительного распознавания материалов ОК при уровнях мощности дозы рентгеновского излучения около 0,25 сГр/мин. Доказано существенное влияние граничных эффектов на качество распознавания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере научной деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rebuffel V., Dinten J. M. Dual-energy X-ray imaging: benefits and limits // Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. 2007. V. 49. pp. 589-594.
2. Park J.S., Kim J.K.. 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. № 4. pp. 2709–2713.

3. Mery D., Riffo V., Zuccar I., Pieringer C. Automated X-ray object recognition using an efficient search algorithm in multiple views // Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2013 IEEE Conference on. – IEEE. 2013. pp. 368–374.

4. Uroukov I., Speller R. A preliminary approach to intelligent x-ray imaging for baggage inspection at airports // Signal Processing Research. 2015. V. 4, pp. 1–11.

5. Сидуленко О.А., Касьянов В.А., Касьянов С.В., Осипов С.П. Исследование возможности применения малогабаритных бетатронов для идентификации веществ объектов контроля методом дуальных энергий // Контроль. Диагностика. 2008. № 8. С. 46–52.

6. Reed W.A. Nondestructive testing and inspection using electron Linacs // Industrial Accelerators and Their Applications. Edited by Hamm Robert W. Published by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2012. V. 1. pp. 307–369.

7. Osipov S.P., Chakhlov S.V., Osipov O.S., Shtein A.M., Strugovtsev D.V. About accuracy of the discrimination parameter estimation for the dual high-energy method // Materials Science and Engineering Conference Series. 2015. Vol. 81. № 2082. pp. 1–13.

8. Чахлов С.В., Осипов С.П. Высокоэнергетический метод дуальных энергий для идентификации веществ объектов контроля // Контроль. Диагностика. 2013. № 9. С. 9–17.

Абашкин Антон Дмитриевич – магистрант, 8(952)898-98-92;

Осипов Сергей Павлович – к.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории технической томографии и интроскопии, тел.: 8(3822) 41-78-14, e-mail: osip1809@rambler.ru;

Штейн Александр Михайлович – ассистент кафедры ФМПК