

УДК 004.31

DOI: 10.18413/2518-1092-2024-9-4-0-5

**Басов О.О.  
Трухачев А.А.  
Соболев Ю.И.  
Селезнев В.В.****ФОРМИРОВАНИЕ АНСАМБЛЯ МОДЕЛЕЙ РАСПОЗНАВАНИЯ  
ОБЪЕКТОВ НА РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ  
НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ИНФОРМАЦИИ**

Акционерное общество «АСТ», пер. Капранова, 3, стр. 2, Москва, 123242, Россия

*e-mail: o.basov@acti.ru***Аннотация**

В работе рассмотрены основные функциональные подходы к построению схем обработки изображений различных спектральных диапазонов, энергий и масштаба. Оценена их эффективность с точки зрения ценности информации, определяемой степенью достижения цели функционирования системы неразрушающего контроля - обнаружением всех возможных объектов интереса при минимальном числе изображений. Установлено, что при отсутствии возможности проведения оптического (визуального) контроля и технической возможности получения рентгенографических изображений при различных энергиях излучателя повысить качество распознавания объектов возможно за счёт использования ансамбля моделей распознавания. Указанный вывод подтверждён конкретным примером, продемонстрировавшим улучшение качества распознавания объектов интереса двухуровневым ансамблем моделей Yolo8 на 12–18 % по сравнению с их распознаванием с использованием одной нейросетевой модели.

**Ключевые слова:** каскад моделей; распознавание объектов; теория информации; ценность информации; неразрушающий контроль

**Для цитирования:** Басов О.О., Трухачев А.А., Соболев Ю.И., Селезнев В.В. Формирование ансамбля моделей распознавания объектов на рентгенографических изображениях на основе теории информации // Научный результат. Информационные технологии. – Т.9, №4, 2024. – С. 44-50. DOI: 10.18413/2518-1092-2024-9-4-0-5

**Basov O.O.  
Trukhachev A.A.  
Sobolev Yu.I.  
Seleznev V.V.****FORMATION OF AN ENSEMBLE OF MODELS FOR  
RECOGNIZING OBJECTS IN RADIOGRAPHIC IMAGES  
BASED ON INFORMATION THEORY**

Joint Stock Company «AST», trans. Kapranova, 3, building 2, Moscow, 123242, Russia

*e-mail: o.basov@acti.ru***Abstract**

The paper considers the main functional approaches to the construction of image processing schemes for various spectral ranges, energies and scales. Their effectiveness is estimated from the point of view of the information value determined by the degree of achieving the goal of the non-destructive testing system - detection of all possible objects of interest with a minimum number of images. It is established that in the absence of the possibility of optical (visual) control and the technical possibility of obtaining radiographic images at different emitter energies, it is possible to improve the quality of object recognition by using an ensemble of recognition models. This conclusion is confirmed by a specific example demonstrating an improvement in the quality of recognition of objects of interest by a two-level ensemble of Yolo8 models by 12-18% compared to their recognition using a single neural network model.

**Keywords:** cascade of models; object recognition; information theory; value of information; non-destructive testing

**For citation:** Basov O.O., Trukhachev A.A., Sobolev Yu.I., Seleznev V.V. Formation of an ensemble of models for recognizing objects in radiographic images based on information theory // Research result. Information technologies. – Т.9, №4, 2024. – P. 44-50. DOI: 10.18413/2518-1092-2024-9-4-0-5

## **ВВЕДЕНИЕ**

С целью выявления дефектов (нарушений структуры материалов) и/или скрытых объектов, которые невозможно обнаружить при помощи визуального осмотра, применяется рентгенографический (радиографический, радиационный) контроль. Так, неразрушающий рентгеновский контроль используется для инспекции скрытых соединений (контроль качества BGA, CSP, CGA,  $\mu$ BGA, FlipChip компонентов) [1], для инспекционно-досмотрового таможенного контроля, контроля входящей корреспонденции, а также контроль качества промышленных сооружений, транспортных средств, нефте- и газопроводов, мостовых конструкций и т.п. – для повышения безопасности страны, защиты прав граждан на жизнь и здоровье, противодействие терроризму [2].

В условиях возрастания сложности и неоднородности объектов контроля основной целью функционирования систем неразрушающего контроля является повышение его полноты и оперативности. Она достигается эффективным выбором функциональных построений схем обработки изображений различных спектральных диапазонов (при дополнении рентгенографического изображения оптическим), энергий и масштаба.

Необходимой предпосылкой решения данной задачи является получение некоторого минимального количества изображений в указанных условиях и их совместная обработка, в том числе с использованием современных нейросетевых архитектур, обеспечивающая обнаружение всех возможных скрытых объектов или дефектов (далее – объектов интереса).

## **ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ЦЕННОСТИ**

С точки зрения теории ценности информации [3] поставленная задача трактуется следующим образом: чем больше объектов интереса обнаружено, тем больше ценность информации. Такой цели системы неразрушающего контроля  $C$  можно достичь различными путями  $c_j (1 \leq j \leq n)$ , общее количество которых  $n$  известно, а вероятности достижения цели по различным путям (вероятность обнаружения всех возможных типов объектов интереса на изображении)  $\varphi(c_j)$  априори неизвестны.

Под путем  $c_j$  будем понимать процесс обработки изображения, полученного в результате неразрушающего контроля, с целью определения всех возможных типов объектов интереса на нем. Тогда под вероятностью  $\varphi(c_j)$  следует понимать вероятность обнаружения всех возможных типов объектов интереса на изображении.

Для того, чтобы задачу решить наиболее целесообразным способом, получаемая информация должна позволить определить значения  $\varphi(c_j)$  на путях  $c_j$  и выбрать тот путь, на котором величина  $\varphi(c_j)$  наибольшая. В данном случае большей вероятности обнаружения объектов интереса будет соответствовать большая ценность информации.

Аналогично предыдущему исследованию [4] в качестве меры ценности информации примем величину разности между вероятностями обнаружения объектов интереса при отсутствии информации  $\Phi(C)$  и при получении  $i$ -го сообщения:

$$Z_i = \Phi_i(C) - \Phi(C). \quad (1)$$

При полном отсутствии априорной информации выбор различных путей равновероятен:

$$\Phi(C) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \varphi(c_j)$$

При случайном выборе одного из путей  $c_j$  вероятность достижения цели равна:

$$\Phi(C) = \sum_{j=1}^n P_j \varphi(c_j), \quad (2)$$

где  $P_j$  – вероятность выбора  $j$ -го пути  $c_j$ .

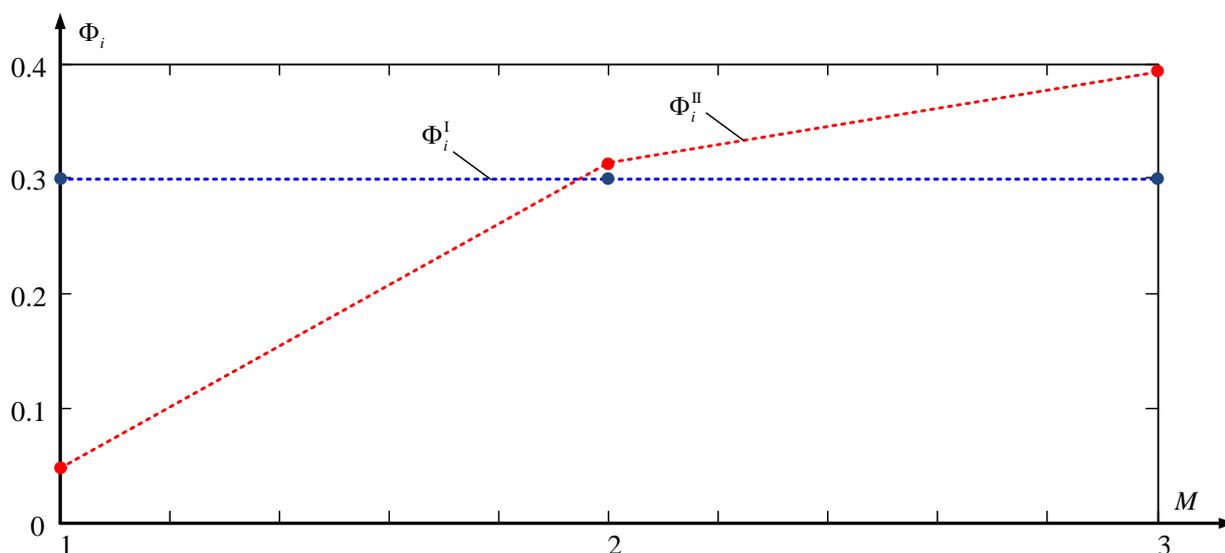
Получение информации от  $i$ -го источника о  $j$ -м пути меняет распределение вероятностей  $P_j$ . Это апостериорное распределение в значительной мере определяется субъективными факторами, проявляющимися в решении, принимаемом оператором системы неразрушающего контроля при анализе полученных изображений. Такое решение может быть отражено и в поведении системы неразрушающего контроля при проведении рентгенографического контроля объектов интереса.

### **ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОСТРОЕНИЯ СХЕМ ОБРАБОТКИ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Полная формализация поведения системы неразрушающего контроля при получении рентгенографических изображений затруднительна. Тем не менее, в ряде типичных случаев можно констатировать некоторые общие тенденции изменения распределения  $P_j$ .

I. Применение мультэнергетической рентгенографии [5] позволяет сформировать мультиизображение, которое дает информацию о значениях  $\varphi(c_j)$  на всех  $n$  путях.

В этом случае, естественно, необходимо выбрать тот путь, для которого величина  $\varphi(c_j)$  максимальна, тогда  $\Phi_i^I(C) = \varphi_{\max}(c_j)$  (рис. 1).



*Рис. 1.* Вероятность достижения цели (обнаружение всех возможных объектов интереса) от числа используемых путей

*Fig. 1.* The probability of goal achievement (detection of all possible hidden objects) from the number of used paths

К недостаткам данного подхода следует отнести:

1) отсутствие механизмов определения значений  $\varphi(c_j)$ , даже при небольшом числе путей. Как правило, характеристики отдельных изображений, участвующих в формировании мультиизображения, определяются экспертным путем отдельно для каждого образца, что значительно увеличивает время выявления объектов интереса;

2) технически ограниченное число (один–два) путей – значений энергий, при которых осуществляется получение рентгенографических изображений. При этом не гарантируется определение всех объектов интереса.

II. Использование различных вида и характера источника информации [6], например, совместное применение оптического (визуального) и рентгеновского контроля.

Можно утверждать, что совмещенное изображение оптического и рентгеновского диапазонов дает информацию о значениях  $\varphi(c_j)$  на  $M$  ( $M < n$ ) из  $n$  путях и не содержит информации об остальных  $(n - M)$  путях; выбор любого из этих  $(n - M)$  путей равновероятен. Тогда

$$\Phi_i^{III}(C) = \sum_{j=1}^M P_j \varphi(c_j) + \frac{1}{n-M} \sum_{k=M+1}^n P_k \varphi(c_k). \quad (3)$$

Анализ зависимости вероятности достижения цели  $C$  от числа «используемых» оператором изображений (рис. 1) позволяет сделать вывод о том, что при заданной вероятности выбора  $P_j$  ( $r = 0,1$ )  $j$ -го пути (путей) вероятность  $\Phi_i(C)$  достижения цели функционирования комбинированной системы оптического и рентгеновского контроля возрастает с увеличением  $M$ . При этом первый путь связан с получением изображения видимого диапазона, а последующие пути – с анализом рентгеновских изображений.

Такой подход показал высокую эффективность при инспекции электронных модулей [7], однако оказался абсолютно не применим в задачах, априори исключающих возможность визуального осмотра объектов интереса, например, при контроле входящей корреспонденции.

III. Квазимасштабирование рентгенографического изображения за счёт последовательного применения моделей распознавания объектов интереса, иначе – ансамблирование с последовательным уменьшением размера объектов интереса на изображении и/или числа классов таких объектов. В описанных условиях можно утверждать, что каждый следующий классификатор дает информацию о значениях  $\varphi(c_j)$  на  $M$  из  $n$  путях и содержит информацию об остальных  $(n - M)$  путях:

$$\begin{aligned} \Phi_i^{III}(C) = & \sum_{j=1}^M P_j \varphi(c_j) + \frac{1}{n-M} \sum_{k=M+1}^n P_k \varphi(c_k) + \frac{1}{n-M-1} \sum_{k=M+2}^n P_k \varphi(c_k) + \dots \\ & + \frac{1}{n-M-2} \sum_{k=M+3}^n P_k \varphi(c_k) + \dots + \sum_{k=n}^n P_k \varphi(c_k) \end{aligned} \quad (4)$$

С учетом того, что  $P_j = [\varphi(c_j)]^r$  ( $r > 0$ ) характеристика ценности информации  $i$ -го изображения о  $j$ -м пути (1) получается в виде (рис. 2).

Откуда следует, что при заданной вероятности выбора  $P_j$  ( $r = 0,1$ )  $j$ -го пути (путей) ценность информации  $i$ -го изображения возрастает при использовании ансамбля моделей распознавания объектов на нём.

### **КАСКАДИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ РАСПОЗНАВАНИЯ ТОВАРОВ НА РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ**

Для экспериментальной проверки данного вывода на рентгенографических изображениях 32 различных товаров была обучена нейросетевая модель Yolo8. В качестве объектов интереса выбраны товары, визуально близкие по форме, структуре и проницаемости: (K1) семена, злаки, масличные; (K2) первичные формы пластмасс; (K3) корма для животных; (K4) замазки стекольные и садовые; (K5) адсорбенты; (K6) масла; (K7) крахмал, клей.

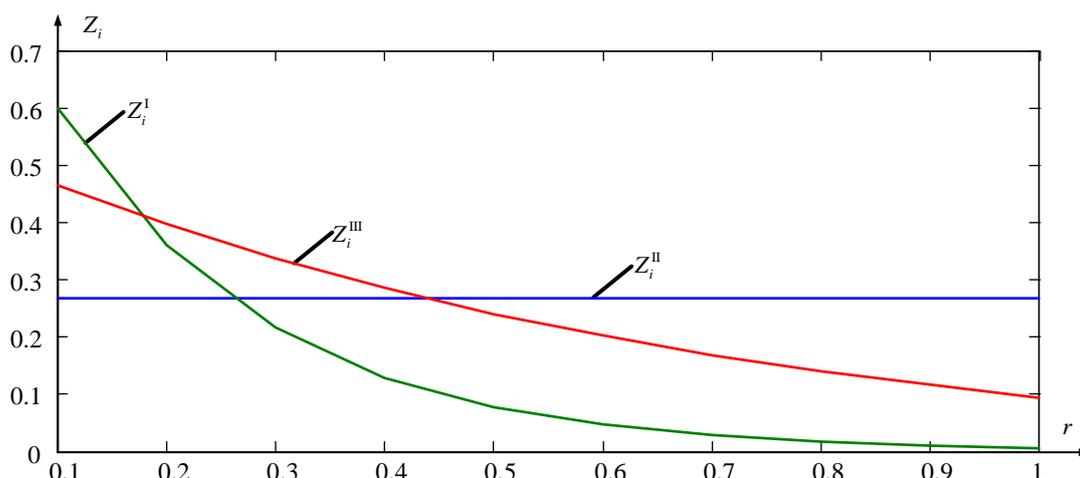


Рис. 2. Ценность информации при различных функциональных построениях схем обработки рентгенографических изображений

Fig. 2. The value of information in various functional designs of radiographic image processing schemes

В процессе тестирования обученной нейросети было установлено качество распознавания (отношение изображений, на которых нейронная сеть с уверенностью более 80 % отнесла детектированный товар к правильному классу, к общему числу обработанных изображений) указанных объектов интереса не выше 82 % (таблица).

Таблица

Точность распознавания товаров ансамблем нейросетевых моделей

Table

Accuracy of product recognition by an ensemble of neural network models

Количество изображений	Исходная нейросетевая модель		Нейросетевая модель первого уровня		Нейросетевая модель второго уровня	
	Номер класса	Точность распознавания	Номер объединения классов	Точность распознавания	Номер класса	Точность распознавания
178	1	76 %	6	93 %	1	<b>93 %</b>
216	2	82 %			2	<b>95 %</b>
192	3	78 %			3	<b>95 %</b>
208	4	73 %			4	<b>90 %</b>
212	5	80 %			5	<b>94 %</b>
198	6	75 %			6	<b>93%</b>
185	7	81 %			7	<b>93 %</b>

В связи с чем, нейросеть была переобучена таким образом, что классы (К1)–(К7) были объединены в один класс (рис. 3), и использовалась как сеть первого уровня.

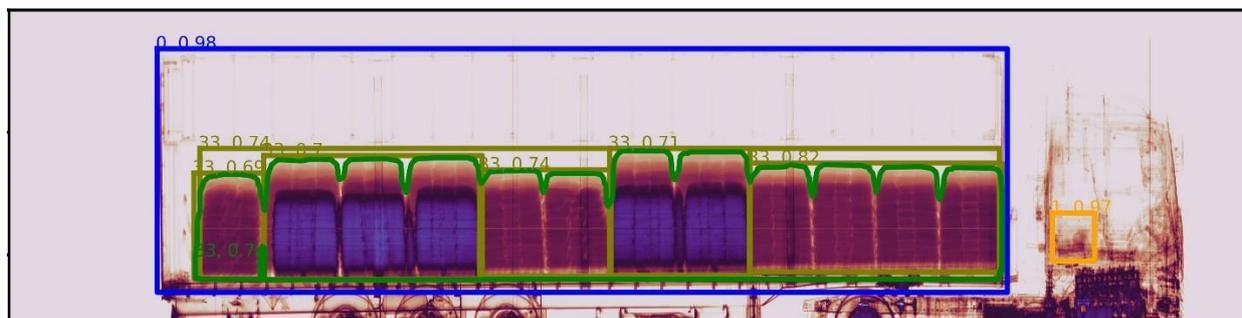


Рис. 3. Пример распознавания объединения классов товаров

Fig. 3. An example of recognizing a combination of classes of goods

Для различения схожих объектов интереса в объединении, представленном на рисунке 3, применялась модель Yolo8 второго уровня, обученная на рентгенографических изображениях классов (K1)–(K7). Таким образом было обеспечено повышение точности распознавания за счёт применения ансамбля моделей.

## **ВЫВОДЫ**

Представленные результаты свидетельствуют о повышении качества распознавания объектов интереса, обладающих схожестью формы, структуры и проницаемости рентгеновского излучения, на 12–18 %, что, в свою очередь, подтверждает состоятельность подхода к квазимасштабированию рентгенографического изображения за счёт применения ансамбля моделей распознавания объектов интереса.

Между тем, дальнейшее повышение полноты и оперативности неразрушающего контроля может быть достигнуто за счёт последовательного применения рассмотренных функциональных схем обработки изображений, а именно:

- 1) использования информации оптического диапазона;
- 2) применения мультэнергетической рентгенографии;
- 3) ансамблирования моделей обнаружения и распознавания скрытых объектов (дефектов).

## **Список литературы**

1. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1979. – 12 с.
2. Афонин П.Н. Работа на досмотровых рентгеновских аппаратах. СПб.: ИЦ Интермедия, 2017. –240 с.
3. Коган И.М. 1981. Прикладная теория информации. М., Радио и связь, – 216 с.
4. Осипенко А.А., Басов О.О. Моделирование систем неразрушающего контроля электронных модулей на основе теории информации // Научные ведомости БелГУ. Сер. Экономика. Информатика. – 2018. – Т.45. – №1. – С. 93-102. DOI: 10.18413/2411-3808-2018-45-1-93-102.
5. Григоров М.С., Басов О.О. Метод формирования рентгеновского мультиизображения изделия микроэлектроники с неоднородной структурой // Научные ведомости БелГУ. Серия: Экономика. Информатика. – 2015. – № 7 (204). Выпуск 34/1. – С. 67-72.
6. Осипенко А.А., Игнатенкова О.А., Григоров М.С., Басов О.О. 2017. Обоснование необходимости совместного применения автоматической оптической инспекции и неразрушающего рентгеновского контроля электронных модулей. Научный результат. Информационные технологии. – Т. 2. – № 2. С. 3–8.

## **References**

1. GOST 18353-79. Nondestructive control. Classification of types and methods. Date of introduction 01.07.1980. (in Russian).
2. Afonin P.N. Working with inspection X-ray machines. SPb.: IC Intermediya, 2017. – 240 p.
3. Kogan I.M. 1981. The applied information theory. Moscow, Radio and communication, 216 p. (in Russian).
4. Osipenko A.A., Basov O.O. Modeling of non-destructive testing systems of electronic modules based on information theory // Belgorod State University. Scientific Bulletin. Series: Economics. Information technologies. – 2018. – Т.45. – №1. – P. 93-102. DOI: 10.18413/2411-3808-2018-45-1-93-102. (in Russian).
5. Grigorov M.S., Basov O.O. 2015. Method of formation of the x-ray multiimage of a product of microelectronics with heterogeneous structure // Belgorod State University. Scientific Bulletin. Series: Economics. Information technologies. – 2015. – № 7 (204). – Issue 34/1. – P. 67-72. (in Russian).
6. Osipenko A.A., Ignatenkova O.A., Grigorov M.S., Basov O.O. 2017. Justification for need of combined use of automatic optical inspection and non-destructive x-ray control of electronic modules // Research result. Information technologies. – Т. 2. – № 2. – P. 3–8. (in Russian).

**Басов Олег Олегович**, доктор технических наук, доцент, руководитель центра искусственного интеллекта  
**Трухачев Андрей Александрович**, кандидат технических наук, руководитель проектов направления информационно-аналитических систем

**Соболев Юрий Игоревич**, разработчик направления информационно-аналитических систем

**Селезнев Владимир Владимирович**, ведущий разработчик направления информационно-аналитических систем

**Basov Oleg Olegovich**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Artificial Intelligence Center

**Trukhachev Andrey Aleksandrovich**, Candidate of Technical Sciences, Project Manager of the Information and Analytical Systems Department

**Sobolev Yuri Igorevich**, Developer of the Information and Analytical Systems Direction

**Seleznev Vladimir Vladimirovich**, Leading Developer of the Information and Analytical Systems Direction