УДК 004.056:004.932

### Оценка эффективности автоматизированного анализа рентгенограмм при обнаружении закладочных устройств в ходе специального рентгеновского контроля технических средств на основе вычислительного эксперимента

Власов К. А., Усатиков С. В.

Постановка задачи: необходимость расширения возможностей существующих программно-аппаратных комплексов по автоматизации и повышению оперативности проведения операций при обеспечении необходимой достоверности по обнаружению, идентификации и локализации закладочных устройств актуализирует вопросы разработки автоматизированной системы специального рентгеновского контроля. С этой целью предложена математическая модель подсистемы анализа рентгенограмм автоматизированной системы специального рентгеновского контроля, в котором обнаружение закладочных устройств осуществляется в результате сравнения и выявления различий имеющихся рентгеновских снимков типовых блоков технических средств с реально наблюдаемыми изображениями различных объектов контроля из одной партии технических средств. Для оценки эффективности определены показатели, по которым оценивается качество автоматизированный системы специального рентгеновского контроля, а именно – оперативность, достоверность и полнота. Цель работы: верификация и определение параметров разработанной математической модели подсистемы анализа рентгенограмм автоматизированной системы специального рентгеновского контроля на основе вычислительного эксперимента для максимальной эффективности функционирования подсистемы по показателям оперативности, достоверности и полноты. Используемые методы: системный анализ процесса обработки рентгенограмм технических средств при специальных проверках закладочных устройств, моделирование и алгоритмизация методами компьютерного зрения и теории векторной оптимизации процесса обнаружения структурных различий растровых изображений рентгенограмм, планирование вычислительного эксперимента. Новизна: разработана и верифицирована математическая модель автоматизированной системы специального рентгеновского контроля с этапом визуального сравнения рентгенограмм объектов контроля из одной партии технических средств с эталонными рентгенограммами, для выявления различий и выделения аномалий разности эталонного изображения и снимка из партии технических средств, позволяющая повысить оперативность проведения операций при обеспечении заданной достоверности по обнаружению, идентификации и локализации закладочных устройств. Предложен метод карт энтропии для бинарной классификации «шум-закладка» случайных и организованных пикселей для локализации на изображениях изменений из-за появления или исчезновения объектов в наблюдаемой сцене. Данный метод основан на энтропийном подходе к обнаружению в изображении внутренних статистических связей между его элементами, включающем построение карты энтропии, примененном в методе окна Парзена-Розенблатта. Разработана методика формирования начальной популяции в генетическом алгоритме при совмещении рентгенограмм, основанная на определении морфологии рассматриваемых изображений. Результат: обоснована система показателей оценки эффективности функционирования автоматизированной системы специального рентгеновского контроля, включающая оперативность, достоверность и полноту. На основе выборочно-

#### Библиографическая ссылка на статью:

Власов К. А., Усатиков С. В. Оценка эффективности автоматизированного анализа рентгенограмм при обнаружении закладочных устройств в ходе специального рентгеновского контроля технических средств на основе вычислительного эксперимента // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 1. С. 1-32. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-1-1-32

#### **Reference for citation:**

Vlasov K. A., Usatikov S. V. Evaluation of the effectiveness of automated analysis radiographs when detecting secret intelligence device during special X-ray control of technical means based on a computational experiment. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 1, pp. 1-32 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-1-1-32

го метода определены структура и объем выборки рентгеновских снимков технических средств, гарантирующие ее репрезентативность и адекватность. Спланирован и проведён на основе программной реализации подсистемы анализа рентгенограмм автоматизированной системы специального рентгеновского контроля вычислительный эксперимент по оценке показателей эффективности и определению параметров модели, при которых достигается максимальная эффективность. Предложены варианты повышения скорости работы программной реализации путем оптимизации последовательных вычислений и организации параллельных вычислений. **Практическая значимость:** выполнена программная реализация математической модели перспективной подсистемы анализа рентгенограмм автоматизированной системы специального рентгеновского контроля и определены её параметры, позволяющие достичь максимальной эффективности функционирования подсистемы.

**Ключевые слова:** специальная проверка, специальный рентгеновский контроль, закладочное устройство, генетический алгоритм, совмещение изображений, структурные различия растровых изображений, вычислительный эксперимент.

#### Актуальность

Одним из основных негативных факторов, влияющих на состояние информационной безопасности, является наращивание рядом зарубежных стран возможностей информационно-технического воздействия на информационную инфраструктуру в военных целях. Одновременно с этим усиливается деятельность организаций, осуществляющих техническую разведку в отношении российских государственных органов, научных организаций и предприятий оборонно-промышленного комплекса.

Использование закладочных устройств (ЗУ), внедряемых в технические средства (ТС), является одним из способов ведения технической разведки. Для противодействия данному техническому каналу утечки информации необходимо проводить специальные проверки (СП) ТС.

Одним из этапов СП ТС является специальный рентгеновский контроль (СРК), особенность которого заключается в получении рентгеновских изображений объекта контроля в виде цифрового сигнала и выведении его на экран графического дисплея для представления оператору в виде полутонового изображения. Общая схема проведения СРК представлена на рис. 1. В данной работе рассматривается блок анализа рентгенограмм.

В подсистеме анализа рентгенограмм важную роль играют методы предварительной обработки и выделения контуров на изображениях, алгоритмы бинаризации изображений, методы анализа шума на цифровых изображениях, алгоритмы определения контрастности цифровых изображений, методы совмещения изображений, методы выявления структурных различий.

В настоящее время перспективным направлением в области СП ТС является автоматизация операций по обнаружению, идентификации и локализации ЗУ для повышения производительности, достоверности и оперативности проведения СРК. В последнее время всё чаще используются автоматизированные программно-аппаратные комплексы, которые позволяют при анализе рентгенограмм автоматизировать весьма трудоёмкие и требующие достаточно высокой квалификации персонала операции по обнаружению, идентификации и локализации ЗУ [1-8].



Рис. 1. Общая схема проведения СРК

Из существующих программно-аппаратных комплексов известен «X-Vizor» (ООО «Ньюком-НДТ»), предназначенный для цифровой и компьютерной радиографии и зарегистрированный в Едином реестре российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных. Включает автоматизированное выделение сварных швов, встроенную систему автоматизированного поиска и определения параметров дефектов технологических трубопроводов, и их отбраковку в соответствии с нормативными документами. Известны также ПАК «Монолит» (ООО «ЦБИ «МАСКОМ») и «Х-Ray Анализ» (ООО «ИНФОСЕКЬЮР», ЗАО НПЦ Фирма «НЕЛК»), предназначенные для хранения и систематизации эталонных оцифрованных рентгеновских изображений (рентгенограмм) объектов контроля и электронной компонентной базы, а также для проведения сравнительного анализа рентгенограмм по отношению к эталонным. Возможности этих комплексов предусматривают только использование цифровых алгоритмов обработки рентгеновских изображений для контрастирования изображения, низкочастотной и высокочастотной фильтрации, сшивки рентгеновских изображений, масштабирования по реперным точкам и сравнительного анализа по отношению к эталонным.

Аналитический обзор современных методов СРК показывает необходимость разработки автоматизированных систем (AC) выявления на рентгеновских снимках ЗУ, так как у существующих AC реализованы те методы компьютерного зрения, которые не позволяют без участия оператора попиксельно совместить два изображений, произвести фильтрацию шумов и выявить структурные различия. При этом целью СРК является точное определение наличия или отсутствия ЗУ в TC, причем недопустимы те ошибки, при которых существующие ЗУ не будут обнаружены.

Для этого предложена математическая модель подсистемы анализа рентгенограмм АС СРК, которая расширяет возможности существующих программно-аппаратных комплексов, повышая оперативность проведения операций при обеспечении необходимой достоверности выявления ЗУ при проведении СРК [9].

# Формальная постановка задачи анализа рентгенограмм при обнаружении закладочных устройств

При разработке AC должен быть определен порядок оценки эффектов, получаемых от системы, а также необходимо учитывать показатели и критерии оценки эффективности перспективной AC, а также результаты сравнения с существующими системами. Поэтому при вводе в действие AC первым требуется провести предварительные испытания. Показатели и критерии оценки эффективности можно определять с помощью выборочного метода – способа статистического исследования, при котором обобщающие показатели изучаемого массива устанавливаются по некоторой его части на основе положений случайного отбора.

На эффективность работы AC влияют множество факторов: настройка параметров выполняемых алгоритмов, характеристики и архитектура вычислительных мощностей, состояние операционной системы и среда программирования, оптимальность программного кода и степень параллельности вычислений.

Рассмотрим показатели соответствия реального результата функционирования подсистемы анализа рентгенограмм требуемому значению [10]. При специальном рентгеновском контроле качество AC определяется следующими показателями: оперативность T, достоверность D и полнота M.

Для оценки показателей эффективности работы АС СРК в целом используется выборочный метод, а показатели эффективности оперативности T, достоверности D и полноты M для каждого l-го измерения (наблюдения) рассчитываются отдельно. Для оценки эффективности функционирования подсистемы анализа рентгенограмм АС СРК по показателям T, D, M вводится векторная целевая функция  $\vec{F}$ :

$$\vec{F} = \left\{ T, D, M \right\},\tag{1}$$

где для достижения максимальной эффективности функционирования AC CPK необходимо определить оптимальные параметры используемого метода выявления структурных различий между изображениями.

Но для этого предварительно требуется произвести оценку эффективности подсистемы совмещения изображений по следующим показателям: точность совмещения  $D_{\text{совм}}$ , время выполнения  $T_{\text{совм}}$ . Таким образом, для оценки эффективности подсистемы совмещения изображений вместо (1) будет применяться векторная целевая функция  $\overline{F_{\text{совм}}}$ :

$$\overrightarrow{F_{\text{cobm}}} = \{T_{\text{cobm}}, D_{\text{cobm}}\},\tag{2}$$

где для достижения максимальной эффективности используемого метода совмещения изображений необходимо определить его оптимальные параметры.

Для обработки рентгеновских снимков (эталона и объектов контроля) требуется предварительно их загрузить в АС СРК. В разработанном программ-

ном модуле растровые изображения (в оттенках серого) эталона и объектов контроля на рентгенограммах представляют собой пиксельные матрицы  $(L_{ij}), 0 \le i \le I - 1, 0 \le j \le J - 1$ , где яркость пикселя L=0,3R+0,59G+0,11B при аддитивной цветовой модели R (красный), G (зеленый) и B (синий), каждый из цветов в пределах от 0 до 255. Размеры изображения (I – ширина, J – высота) в пикселях будем считать одинаковыми для всей партии TC и эталона.

При наличии ЗУ изображающие их пиксели окажутся среди ненулевых элементов матрицы разности между изображениями эталона и объектов контроля – в частности, попиксельной разности *Rp*, элементы которой являются абсолютными величинами:

$$Rp_{ij} = \left| Vin^{a_1, a_2, b, \varphi}_{ij} - E_{ij} \right|,$$
(3)

где: *Е* – пиксельная матрица рентгенограммы эталона; *Vin<sup>a1, a2, b, φ</sup>* – пиксельная матрица рентгенограммы объекта контроля после совмещения.

Но среди ненулевых элементов *Rp* также содержится «шум» из-за ошибок интерполяции после аффинных преобразований и ошибок совмещения (из-за неточностей определения границ фона и пр.), причём яркость «шумов» может быть настолько высокой, что вероятные ЗУ не выделяются на фоне шумов.

Поэтому необходимо решить следующую задачу бинарной классификации «шум/закладка». Пусть множество описаний объектов S и признаковое пространство состоит из элементов матрицы разности (*Rp*<sub>ii</sub>),  $0 \leq i \leq I - 1$ ,  $0 \le j \le J - 1$  между изображениями *E* эталона и *Vin* объектов контроля. Множество номеров (или наименований) классов К={ЗУ, ошибки интерполяции и совмещения $=\{1,0\}$  вместе с *S* образует вероятностное пространство с элемен-Требуется тарными исходами  $S \times K$ . построить алгоритм ALG:  $S \to K$ , способный классифицировать произвольный  $el \in S$  (т.е. указать номер наименование класса, которому к относится данный элемент ИЛИ  $el \subset \{Rp_{ij}, 0 \le i \le I - 1, 0 \le j \le J - 1\}$ ).

При СРК могут возникнуть ошибки I и II рода. Пусть нулевая гипотеза – «в TC присутствует ЗУ», тогда  $p_{\alpha}$  – вероятность не найти ЗУ там, где оно фактически присутствует (ошибка I рода),  $p_{\beta}$  – вероятность найти ЗУ там, где фактически оно отсутствует (ошибка II рода). Зададим пороговые: уровень значимости  $\alpha$  и  $\beta$ -уровень, (приемлемы  $\alpha = 0,001$  и  $\beta = 0,05$ ). Для AC СРК наиболее критичны ошибки I рода, когда ЗУ не будет распознано, так как ошибки II рода могут быть быстро исправлены специалистом при проверке результатов работы AC в отличие от ошибок I рода. Установить величины  $p_{\alpha}$  и  $p_{\beta}$  возможно только в некотором доверительном интервале  $\pm \Delta p$  (приемлема относительная  $\pm 10\%$ ) уровнем значимости  $\gamma$  (приемлемо  $\gamma = \beta$ ):  $p_{\alpha} = (1 - M) \pm \Delta p$  и  $p_{\beta} = (M - D) \pm \Delta p$  с доверительной вероятностью не менее  $1 - \gamma$  [11].

Исходя из (1) и (2), с учетом вероятности возникновения ошибок, для повышения эффективности функционирования подсистемы анализа рентгенограмм АС СРК необходимо, чтобы соблюдалось условие:

$$T \to \min,$$
  

$$T_{\text{совм}} \to \min,$$
  

$$D \to \max,$$
  

$$D_{\text{совм}} \to \max,$$
  

$$M \to \max,$$
  
(4)

для целевой функции при допустимом множестве

$$\begin{cases} T < T_{\text{суш}}, \\ 1 - M \le \alpha, \\ M - D \le \beta, \end{cases}$$
(5)

где  $T_{\text{сущ}}$  – затрачиваемое время на проведение специального рентгеновского контроля существующими способами и средствами.

# Функциональная и алгоритмическая структура подсистемы анализа рентгенограмм АС СРК

Для решения поставленной задачи была разработана математическая модель подсистемы анализа рентгенограмм АС СРК с этапом визуального сравнения рентгенограмм объектов контроля из одной партии ТС с эталонными рентгенограммами для выявления различий и выделения аномалий разности эталонного изображения и снимка из партии ТС. Данная модель включает в себя математическую модель подсистемы совмещения изображений эталона с объектами контроля и математическую модель подсистемы выявления различий между изображениями эталона и объектов контроля.

Схема функциональной и алгоритмической структуры предлагаемого AC СРК представлена на рис. 2.

#### Математическая модель подсистемы совмещения изображений эталона с объектами контроля

После загрузки рентгеновских снимков в AC CPK требуется провести их корректировку (удаление искажений) и сегментацию [12-14]. После выделения сегментов объектов контроля и сегментов эталона производятся аффинные преобразования объектов контроля для полного геометрического совмещения с эталоном [15-17].

Для решения задачи совмещения изображения необходимо решить оптимизационную задачу поиска параметров  $a_1$ ,  $a_2$ , b,  $\varphi$ , которые доставляют экстремумы следующим целевым функциям (функциям фитнеса):

$$FW(a_1, a_2, b, \varphi) == \frac{1}{IJ} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} Win^{a_1, a_2, b, \varphi} Wet_{ij} \xrightarrow[a_1, a_2, b, \varphi]{} \max, \qquad (6)$$

$$F(a_1, a_2, b, \varphi) == \frac{1}{IJ} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} \left( Vin^{a_1, a_2, b, \varphi}_{ij} - E_{ij} \right)^2 \underset{a_1, a_2, b, \varphi}{\longrightarrow} \min, \qquad (7)$$

где: *Wet* – бинарная матрица рентгенограммы эталона; *E* – пиксельная матрица рентгенограммы эталона; *Win<sup>a1, a2, b, φ</sup>* – бинарная матрица рентгенограммы объ-

6

екта контроля после аффинного преобразования;  $Vin^{a_1, a_2, b, \varphi}$  – пиксельная матрица рентгенограммы объекта контроля после аффинного преобразования;  $a_1$  – коэффициент перемещения образца по оси абсцисс;  $a_2$  – коэффициент перемещения образца по оси ординат; b – коэффициент масштабирования общего снимка по двум осям;  $\varphi$  – угол поворота общего снимка.



Рис. 2. Схема функциональной и алгоритмической структуры предлагаемой подсистемы анализа рентгенограмм АС СРК

Иными словами, требуется найти такие параметры  $a_1$ ,  $a_2$ , b,  $\varphi$ , при которых наложение сегмента объекта контроля на сегмент эталона будет максимально точным, в идеале с совпадающими пикселями. Целевая функция (6) обеспечивает высокую скорость поиска параметров  $a_1$ ,  $a_2$ , b,  $\varphi$ , но из-за бинаризации изображений не учитывается внутренняя структура объекта контроля, что может привести к грубым ошибкам. Поэтому требуется дополнительная корректировка параметров сдвига  $a_1$ ,  $a_2$  и угла поворота  $\varphi$  через поиск минимума целевой функции (7).

Решение задачи оптимизации осуществляется с помощью генетического алгоритма [18-19]. В теории генетических алгоритмов используется биологическая терминология в упрощенном виде: особь – совокупность хромосом (значений параметров целевой функции); популяция – совокупность (множество) особей; хромосома – решение рассматриваемой проблемы, носитель наследственной информации; приспособленность особи – значение функции фитнеса (6) или (7) для данного набора хромосом; селекция – выбор особей с наилучшей приспособленностью для воспроизводства (сортировка по значению целевой функции); кроссовер (скрещивание) – получение генотипа потомка по двум родительским особям; мутация – случайное изменение хромосом в особи. Вычисление параметров аффинного преобразования производится согласно общей схеме работы генетического алгоритма [8]. Оно продолжается до тех пор, пока не будет найдено решение задачи или не пройдено определенное количество поколений. Затем по такой же схеме проводится корректировка найденных параметров.

Для формирования начальной популяции в генетическом алгоритме при совмещении рентгенограмм была предложена методика, основанная на определении морфологии рассматриваемых изображений. Она заключается в генерации определенного количества возможных особей со значениями, распределенных в окрестности приближенных параметров  $a_{1\mu}$ ,  $a_{2\mu}$ ,  $b_{\mu}$ ,  $\varphi_{\mu}$ .

Приближенные значения  $a_{1H}$ ,  $a_{2H}$  можно вычислить путем разности координат центров тяжести  $x_{ut}$ ,  $y_{ut}$  изображений эталона и объекта контроля:

$$a_{1H} = x_{1T1} - x_{1T2}, \qquad (8)$$

$$a_{2H} = y_{1T1} - y_{1T2}, (9)$$

где:  $x_{\text{цт1}}$ ,  $y_{\text{цт1}}$  – координаты центра тяжести изображения эталона;  $x_{\text{цт2}}$ ,  $y_{\text{цт2}}$  – координаты центра тяжести изображения объекта контроля.

Координаты *x*<sub>цт</sub>, *y*<sub>цт</sub> для каждого изображения вычисляются следующим образом:

$$(x_{\rm IIT}, y_{\rm IIT}) = \left( \frac{1}{\sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} W_{ij}} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} i \cdot W_{ij}, \frac{1}{\sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} W_{ij}} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} j \cdot W_{ij} \right),$$
(10)

Угол поворота  $\varphi_{\rm H}$  вычисляется из разности ориентаций главных осей момента инерции изображений эталона и объекта контроля:

$$\varphi_{\rm H} = \varphi_{\rm o1} - \varphi_{\rm o2} \,, \tag{11}$$

DOI: 10.24412/2410-9916-2023-1-1-32 URL: https://sccs.intelgr.com/archive/2023-01/01-Vlasov.pdf где:  $\varphi_{o1}$  – угол ориентации главной оси момента инерции изображения эталона;  $\varphi_{o2}$  – угол ориентации главной оси момента инерции изображения объекта контроля.

Угол ориентации  $\phi_0$  для каждого изображения вычисляется по формуле:

$$\varphi_{o} = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2M_{xy}}{M_{xx} - M_{yy}}\right),\tag{12}$$

где:  $M_{xx}$  – центральный момент второго порядка по строке;  $M_{yy}$  – центральный момент второго порядка по столбцу;  $M_{xy}$  – смешанный центральный момент второго порядка.

Параметрами модели подсистемы совмещения изображений эталона с объектами контроля, подлежащими определению из вычислительного эксперимента для достижения максимальной эффективности функционирования АС СРК, являются параметры генетического алгоритма: количество поколений, количество независимых популяций, множитель получаемых потомков, процент мутации, количество особей в популяции.

# Математическая модель подсистемы выявления различий между изображениями эталона и объектов контроля

После совмещения двух изображений необходимо решить задачу поиска различий двух изображений на наличие ЗУ, то есть решить задачу локализации на изображениях изменений, произошедших вследствие появления или исчезновения объектов в наблюдаемой сцене. При этом важно, чтобы алгоритм, решающий эту задачу, выявлял структурные различия. Под различиями здесь понимаются существенные изменения цветности, исчезновения или изменения формы объектов. При этом изменения освещенности объектов структурными различиями не считаются.

Для решения задачи бинарной классификации «шум-закладка» случайных и организованных пикселей, к разновидности метода окна Парзена-Розенблатта [20-23] предложено применить энтропийный подход к обнаружению в изображении внутренних статистических связей между его элементами, включающий построение поверхности энтропии. Условно такое решение задачи бинарной классификации назовём методом карт энтропии. Матрица разности *R*, элементы которой являются абсолютными величинами, имеет вид:

$$R_{ij} = \frac{1}{\left(2r+1\right)^2} \sum_{m=i-r}^{i+r} \sum_{n=j-r}^{j+r} \left| Vin^{a_1,a_2,b,\varphi}_{mn} - E_{mn} \right|,$$
(13)

где: R- пиксельная матрица разности E и  $Vin^{a_1, a_2, b, \varphi}$ ; E - пиксельная матрица рентгенограммы эталона;  $Vin^{a_1, a_2, b, \varphi}$  - пиксельная матрица рентгенограммы объекта контроля после аффинного преобразования; r - радиус окна.

Для (13) целесообразно применять контрастирование, лучше выделяющее аномалии в разностном изображении:

$$R_{ij}^{con} = \left(col\frac{R_{ij}}{Cr}\right)^d,\tag{14}$$

DOI: 10.24412/2410-9916-2023-1-1-32 URL: https://sccs.intelgr.com/archive/2023-01/01-Vlasov.pdf

9

где: 
$$Cr = \frac{1}{IJ} \sum_{i=1}^{J} \sum_{j=1}^{J} R_{ij}$$
 – среднее значение уровня яркости точек матрицы *R*;

*col* – коэффициент влияния цвета; *d* – степень усиления; *I* – ширина снимка; *J* – высота снимка.

Для устранения влияния шумов предлагается применить метод карты энтропии, а именно вычислить карту локальной энтропии для пиксельной матрицы разностного изображения R (метод карты энтропии) по следующим формулам:

$$n_{(ij)xyk} = \sum_{m=i-u+qx}^{i-u+q(x+1)-1} \sum_{n=j-u+qy}^{j-u+q(y+1)-1} Ind_{mnk} \quad ,$$
(15)

где:  $Ind_{mnk} = \begin{cases} 1, \text{если } R_{mn} \in LS_k \\ 0, \text{если } R_{mn} \notin LS_k \end{cases}$  – индикатор принадлежности пикселя  $R_{mn}$ 

к k-му промежутку оттенков серого LS; LS – промежутки оттенков серого; k – номер промежутка оттенков серого LS; R – пиксельная матрица разности E и Vin<sup>a1, a2, b,  $\varphi$ </sup>; q – количество пикселей по вертикали или горизонтали в ячейке окна; x, y – координаты ячейки в окне, причем  $x \in [0; z-1], y \in [0; z-1]; z$  – количество ячеек по вертикали или горизонтали в окне; u – радиус окна в пикселях;  $n_{(ij)xyk}$  – количество пикселей того или иного промежутка LS<sub>k</sub> в ячейке с координатами (x, y) выбранного окна с центром в точке (i, j) и радиусом u.

Вероятность появления  $p_{(ij)xyk}$  промежутка оттенков серого  $LS_k$  в ячейке с координатами (x, y) выбранного окна с центром в точке (i, j) вычисляется по следующей формуле:

$$p_{(ij)xyk} = \frac{n_{(ij)xyk}}{(qz)^2},$$
(16)

Значение энтропии  $H_{ij}$  в окне с центром в точке (i, j) рассчитывается следующим образом:

$$H_{ij} = -\sum_{x=0}^{z-1} \sum_{y=0}^{z-1} \sum_{k=0}^{K} p_{(ij)xyk} \ln\left(p_{(ij)xyk}\right).$$
(17)

По результатам (17) для каждой точки (*i*, *j*) можно рассчитать уровень яркости энтропии в градациях оттенков серого *L*э:

$$L\mathfrak{S}_{ij} = 255 \frac{H_{ij} - H_{\min}}{H_{\max} - H_{\min}},$$
(18)

где:  $H_{\text{max}}$ ,  $H_{\text{min}}$  – максимальное и минимальное значения энтропии во всём разностном изображении.

Для выделения структурных различий на фоне шумов у разностного изображения *R* необходимо вычесть значения энтропии:

$$R_{ij}^{H} = 2R_{ij} - 0.5(255 - L_{\mathcal{F}_{ij}}).$$
<sup>(19)</sup>

Согласно формуле (14) также рекомендуется применять контрастирование результата (19). В случаях, когда несколько ЗУ на объекте контроля имеют разные степени контрастности, то (19) приводит к ошибкам I рода, когда ЗУ

DOI: 10.24412/2410-9916-2023-1-1-32	
URL: https://sccs.intelgr.com/archive/2023-01/01-Vlasov.pdf	

сливается с фоном шумов. Для недопущения этих ошибок требуется производить не менее двух-трех раундов метода карты энтропии, когда результат первых раундов не будет учитываться при выполнении следующих раундов, тогда сильно выделяющиеся ЗУ не будут затмевать собой ЗУ, цветность которых близка к цвету объекта контроля. Для наглядности было создано тестовое изображение со всеми оттенками серого (рис. 3), которые играют роль ЗУ различной цветностью в градациях серого.



Рис. 3. Тестовое изображение со всеми оттенками серого

На рис. 4 представлен пример работы данного алгоритма в режиме трех раундов, где после первого раунда ЗУ выделены красным цветом, после второго раунда оранжевым цветом и после третьего раунда зеленым цветом.



Рис. 4. Тестовое изображение с указанием ЗУ

На выходе подсистемы выявления различий (рис. 2) имеем матрицу  $(d_{ij}), 0 \le i \le I - 1, 0 \le j \le J - 1$ , где каждый элемент принимает значение 1, если в

точке (i, j) находится ЗУ, в противном случае  $d_{ij}$  будет принимать значение 0.

В результате работы АС СРК специалист получает снимки с указанием вероятных ЗУ, поэтому ему требуется еще визуально сличить объект контроля с эталоном для подтверждения или опровержения найденных системой ЗУ в количестве *N*<sub>выч</sub> штук.

Таким образом, параметрами модели подсистемы выявления различий между изображениями эталона и объектов контроля, подлежащими определению из вычислительного эксперимента для достижения максимальной эффективности функционирования АС СРК, являются параметры метода карт энтропии: количество ячеек в ряду окна, размер ячейки, количество промежутков оттенков серого, радиус окна разности.

#### Планирование вычислительного эксперимента и показатели эффективности автоматизированной системы специального рентгеновского контроля

Показатель оперативности системы *Т* отражает суммарную продолжительность процессов обработки исходных данных и описывается выражением:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6, (20)$$

где:  $T_1$  – продолжительность загрузки и предварительной обработки изображений рентгеновских снимков;  $T_2$  – продолжительность автоматизированных процессов корректировки и сегментации изображений эталона и объектов контроля;  $T_3$  – продолжительность автоматизированных процессов аффинных преобразований сегментов объектов контроля на сегменты эталона;  $T_4$  – продолжительность работы подсистемы выявления различий между изображениями эталона и объектов контроля;  $T_5$  – продолжительность подготовки выходных данных и доведение информации до специалиста;  $T_6$  – продолжительность интерпретации и проверки результатов, полученных с помощью АС СРК.

Показатель достоверности *D* характеризуется соответствием вычисленных значений точек принадлежности к ЗУ к их истинному значению:

$$D = \frac{1}{IJ} \sum_{i=1}^{J} \sum_{j=1}^{J} \left( 1 - \left| d_{ij}^{\text{MCT}} - d_{ij}^{\text{BLIY}} \right| \right)$$
(21)

где:  $d_{ij}^{\text{ист}}$  – истинное значение соответствия точки (i, j) ЗУ;  $d_{ij}^{\text{выч}}$  – вычисленное значение соответствия точки (i, j) ЗУ.

Однако наиболее важным показателем является полнота *M*, которая характеризуется соответствием найденных ЗУ к их истинному количеству:

$$M = 1 - \frac{N_{ucm} - N_{_{\theta b i \prime u}}}{N_{ucm}},$$
(22)

где: *N*<sub>ист</sub> – истинное количество ЗУ; *N*<sub>выч</sub> – количество найденных ЗУ.

Согласно (1) для достижения максимальной эффективности функционирования АС СРК необходимо определить оптимальные параметры подсистемы

DOI: 10.24412/2410-9916-2023-1-1-32	
URL: https://sccs.intelgr.com/archive/2023-01/01-Vlasov.pdf	

выявления различий: количество ячеек в ряду окна, размер ячейки, количество промежутков оттенков серого, радиус окна разности.

Согласно (2) для достижения максимальной эффективности функционирования подсистемы совмещения изображений эталона с объектами контроля АС СРК необходимо определить оптимальные: количество поколений в генетическом алгоритме: количество независимых популяций, множитель получаемых потомков, процент мутации, количество особей в популяции. Стоит отметить, что для оценки эффективности подсистемы совмещения изображений эталона с объектами контроля, включающей результаты работы генетического алгоритма, нельзя вычислить полноту M,  $T_{совм}$  соответствует  $T_3$  из (20), а точность совмещения  $D_{совм}$  характеризуется соответствием вычисленных значений точек принадлежности к объекту контроля к их истинному значению согласно точкам эталона:

$$D_{cogM} = \frac{1}{IJ} \sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J} \left( 1 - \left| d_{ij}^{\text{ST}} - d_{ij}^{\text{OK}} \right| \right),$$
(23)

где:  $d_{ij}^{_{3T}}$  – значение соответствия точки (i, j) эталону;  $d_{ij}^{_{0K}}$  – вычисленное значение соответствия точки (i, j) объекту контроля.

Для оценки показателей эффективности работы АС СРК требуется определиться с выборкой, которая является подмножеством генеральной совокупности (множества всех возможных рентгеновских снимков), где каждый элемент имеет определенную вероятность быть отобранным [11].

На практике обычно встречаются компактные (геометрические ширина и длина примерно равны) и распределенные (геометрические ширина и длина значительно различаются) ЗУ [1-8], причем количество их различных видов постоянно растет, поэтому при работе с АС СРК требуется реализовать возможность выявления неизвестного типа ЗУ. Эта возможность обеспечивается предварительной выработкой эталона специалистом другими методами специальной проверки. Поэтому основное требование к АС СРК заключается в том, чтобы в результате ее работы были максимально точно выявлены все отличия от эталона. Следовательно, показатель полноты в (4) должен быть равен 1, в противном случае можно сделать вывод о том, что АС СРК не обнаружила существующие ЗУ, что является критичным для систем рентгеновского контроля. Также стоит отметить, что показатель полноты не учитывает количество «ложных» срабатываний, когда искажения на изображении воспринимаются АС СРК как ЗУ. Эти «ложные» срабатывания учитываются показателем достоверности.

Напомним, что установить величины показателей возможно только в некотором доверительном интервале  $\pm \Delta p$  (приемлема относительная  $\pm 10\%$ ):  $p_{\alpha} = (1 - M) \pm \Delta p$  и  $p_{\beta} = (M - D) \pm \Delta p$  с доверительной вероятностью  $1 - \gamma$  (приемлемо  $\gamma = \beta$ ). Для обеспечения заданных  $\alpha$ -уровня и  $\beta$ -уровня в оценке показателей эффективности необходимо определиться с объемом выборки  $n_k$  для каждого *k*-го вида ЗУ (компактного и распределенного), а также для TC, у которых отсутствуют ЗУ. Для этой оценки мы располагаем  $p^{\text{вы6}}{}_{\alpha}$  и  $p^{\text{вы6}}{}_{\beta}$  выборочными (по выборке искомого объёма  $n_k$ ) вероятностями ошибок I и II рода. Частный объем выборки *n<sub>k</sub>* для конкретного случая вида ЗУ можно определить по следующей формуле [11]:

$$n_k = \left(\frac{t_{\gamma}}{4 \cdot \Delta p}\right)^2,\tag{24}$$

где: *t*<sub>γ</sub> – квантиль Стьюдента.

Общее количество проведенных измерений (объем выборки) *n* равняется взвешенной сумме частных объемов выборок *n<sub>k</sub>*:

$$n = \sum_{k=1}^{3} w_k n_k , \qquad (25)$$

где *w*<sub>*k*</sub> – весовой коэффициент пропорции в генеральной совокупности.

Для оценки показателя достоверности требуется провести вычислительный эксперимент, чтобы определить, при каких значениях D увеличение продолжительности интерпретации и проверки результатов работы АС СРК  $T_6$  не нарушит выполнение условия (4).

Если ориентироваться на приемлемую величину доверительной вероятности, равную 95,4 %, то квантиль Стьюдента  $t_{\gamma}$  будет равен 2. Предельную ошибку  $\Delta p$  примем равной 0,1. Тогда частный объем выборки  $n_k$  по (24) примет значение  $n_k = 25$ .

Вероятность наличия ЗУ (компактного или распределенного) в TC крайне мала по сравнению с вероятностью его отсутствия, однако для обеспечения попадания под наблюдение всех видов ЗУ требуется уравнять все весовые коэффициенты пропорции в генеральной совокупности, то есть $w_1=w_2=w_3=1$ . В итоге для трех вариантов наличия ЗУ всего рентгеновских снимков TC по формуле (25) требуется не меньше 75.

В программной реализации разработанной математической модели подсистемы анализа рентгенограмм АС СРК отсутствует функциональные возможности по выделению конкретного объекта контроля в случае нахождения на снимке нескольких ТС. Поэтому по условиям вычислительного эксперимента на рентгеновские снимки налагались следующие ограничения:

- для однозначной интерпретации объектов контроля на растровых изображениях не допускалось наличие посторонних предметов, а также нескольких объектов контроля на одном снимке;
- не допускалось наличие гибких элементов объектов контроля (провода), соединяющие разные части TC;
- не допускались снимки, объект контроля на которых показан не полностью или срезан.

В качестве эталонов было выбрано семь TC, рентгеновский снимок которых выполнен с различной интенсивностью, в связи с чем были получены изображения в разной цветовой гамме (рис. 5а-5ж).



Рис. 5а. Эталон № 1



Рис. 5в. Эталон № 3



Рис. 5б. Эталон № 2



Рис. 5г. Эталон № 4



Рис. 5д. Эталон № 5



Рис. 5е. Эталон № 6



Рис. 5ж. Эталон № 7

Для вычислительного эксперимента эти 7 эталонных снимков были средствами графических редакторов преобразованы в снимки ТС для получения необходимого объема выборки. При этом для качественной оценки показателей эффективности выдвигались следующие требования к объектам контроля и ЗУ:

- различное количество внедренных ЗУ в ТС для качественной оценки полноты М и оперативности Т;
- различные искажения по углу поворота, масштабирования и сдвигам по ширине и высоте для качественной оценки достоверности D и оперативности T.

На каждый эталонный снимок было создано по 20 объектов контроля.

Для проведения вычислительного эксперимента по верификации и определению параметров разработанной математической модели для максимальной эффективности функционирования подсистемы анализа рентгенограмм была создана программная реализация модели.

Алгоритмы реализованы с использованием языка программирования С# в среде Visual Studio. Скриншот программной реализации представлен на рис. 6. Эксперименты проводились на компьютере со следующими характеристиками: процессор Intel i3-4170, тактовая частота 3,7 ГГц; количество ядер: 2; количество потоков: 4; кэш-память 3 Мб; оперативная память DDR3 4 ГБ 1600 МГц; жёсткий диск HDD Toshiba DT01ACA100; операционная система Windows 7; установленная платформа .NET Framework 4.5.



Рис. 6. Скриншот программной реализации автоматизированной системы специального рентгеновского контроля

## Результаты вычислительного эксперимента

Для подсистемы совмещения изображений эталона с объектами контроля AC CPK результаты оценки  $\overrightarrow{F_{\text{совм}}}$  (2) (в зависимости от количества поколений в

генетическом алгоритме, количества независимых популяций, множителя получаемых потомков, процента мутации, количества особей в популяции) показаны на рис. 7 в критериальном пространстве с осями: точность совмещения

 $D_{\text{совм}}$ , время выполнения совмещения  $\frac{T_3}{T_{\text{max}}}100\%$  .

На рис. 7 указана кривая 4 фронта Парето, соответствующая объединению эффективных значений наборов параметров генетического алгоритма в множество Парето. Кривая 4 построена как регрессия по экспериментальным точкам с фронта Парето. Проведенные вычисления показали, что максимальная точность совмещения  $D_{совм}$  достигается при увеличении таких параметров генетического алгоритма, как количество поколений, количество независимых популяций, множитель получаемых потомков и количество особей в популяции.

Однако при увеличении этих параметров увеличивается требуемое время для выполнения совмещения  $T_3$ . Поэтому при векторной оптимизации требуется найти такие элементы множества Парето, которые являются ближайшими к идеальной точке, указанной под номером «1» при  $D_{\text{совм}} = 100$  % и  $T_3 \rightarrow \text{min.}$ Были выбраны две точки под номерами «2» и «3», полученных при сужении множества Парето. При одинаковой важности критериев  $D_{\text{совм}}$  и  $T_3$  была выбрана точка под номером «2». При приоритете критерия  $D_{\text{совм}}$  над  $T_3$  была выбрана точка под номером «3».



Рис. 7. Фронт Парето и экспериментальные значения элементов достижимого множества для подсистемы совмещения изображений эталона с объектами контроля, в зависимости от изменения параметров генетического алгоритма:

1 – идеальная точка; 2, 3 – сужение фронта Парето; 4 – фронт Парето

Элементу под номером «2» соответствует набор параметров, у которого:

- количество поколений 5;
- количество независимых популяций 2;
- множитель получаемых потомков 2;
- процент мутации 10 %;
- количество особей в популяции 50;
- среднее время совмещения 10934 мс;
- точность совмещения 99,04 %.

Элементу под номером «3» соответствует набор параметров, у которого:

- количество поколений 5;
- количество независимых популяций 2;
- множитель получаемых потомков 2;
- процент мутации 10 %;
- количество особей в популяции 100;
- среднее время совмещения 13883 мс;
- точность совмещения 99,19 %.

Отличие «2» от «3» состоит лишь в количестве особей в популяции. Однако увеличение количества поколений или особей хоть и повышает среднюю точность, но из-за большой погрешности получаемых результатов (97-99,6 %) целесообразней проводить этап корректировки путем сдвига преобразованного объекта контроля аффинными преобразованиями в пределах нескольких пикселей по оси абсцисс и ординат. Это позволит уменьшить вероятность тех случаев, когда генетический алгоритм упирается в локальный экстремум. Время работы корректирующего блока составляет не более 1 с. Поэтому наиболее оптимальным элементом множества Парето является набор параметров генетического алгоритма под номером «2».

Для подсистемы выявления различий между изображениями эталона и объектов контроля AC CPK результаты оценки  $\vec{F}$  (1) (в зависимости от параметров метода карты энтропии: количество ячеек в ряду окна, размер ячейки, количество промежутков оттенков серого, радиус окна разности) показаны на

рис. 8 в критериальном пространстве с осями: среднее время  $\frac{T_4}{T_{\text{max}}}100\%$ ; досто-

верность после 3-го цикла D, %; полнота M, %.

Требуется найти такие параметры метода карты энтропии, при которых  $\vec{F}$  будет наилучшим. Согласно (1) используется показатель оперативности T, однако при изменении параметров только метода выявления различий достаточно оперировать временем работы алгоритма  $T_4$ . На рис. 8 указана кривая 3 фронта Парето, соответствующая объединению эффективных значений наборов параметров метода карт энтропии в множество Парето. Кривая 3 построена как регрессия по экспериментальным точкам с фронта Парето.



Рис. 8. Фронт Парето и экспериментальные значения элементов достижимого множества для подсистемы выявления различий между изображениями эталона и объектов контроля, в зависимости от изменения параметров метода карт энтропии: 1 – идеальная точка; 2 – сужение фронта Парето; 3 – фронт Парето

Так как на выходе подсистемы выявления различий (рис. 2) имеем матрицу  $d_{ij}$  с указанием вероятных ЗУ, то необходимо первым делом подобрать оптимальные параметры метода выявления различий, при которых полнота M = 1. Для достижения этой цели можно использовать тестовое изображение со всеми оттенками серого (рис. 3), когда отсутствует влияние шумов, приводящее к ошибкам II рода. В этом случае полнота M будет равна достоверности D.

На рис. 9 представлены экспериментальные значения элементов достижимого множества, при которых D > 0,92, с указанием множества наборов параметров метода карты энтропии в таблице 1.



Рис. 9. Экспериментальные значения элементов достижимого множества в зависимости от изменения параметров метода карты энтропии в случае полноты *M* равной достоверности *D* 

							-
№ п/п	Количество ячеек в ряду окна	Размер ячейки	Количество промежутков оттенков серого	Радиус окна разности	Среднее время, мс	Полнота после 2 раунда, %	Полнота после 3 раунда, %
1.	3	3	10	1	7069	83,92156863	97,6470588
2.	5	3	2	0	9008	91,37254902	96,4705882
3.	3	5	10	0	7970	90,19607843	96,4705882
4.	3	5	2	0	6135	91,76470588	96,0784314
5.	3	5	3	0	6355	91,76470588	96,0784314
6.	5	5	2	0	11529	90,58823529	96,0784314
7.	5	5	3	0	12282	90,58823529	96,0784314
8.	5	5	10	0	17597	89,80392157	96,0784314
9.	5	3	3	0	9762	91,37254902	95,6862745
10.	3	5	4	0	6569	90,19607843	95,6862745
11.	3	5	5	0	6837	90,19607843	95,6862745
12.	5	3	4	0	10558	89,80392157	95,6862745
13.	5	3	5	0	11382	89,80392157	95,6862745
14.	5	3	10	1	15326	85,88235294	95,6862745
15.	5	5	3	2	12572	83,92156863	95,6862745
16.	5	5	4	2	13321	83,92156863	95,2941176

Таблица 1 – Зависимость полноты М от параметров метода выявления различий

№ п/п	Количество ячеек в ряду окна	Размер ячейки	Количество промежутков оттенков серого	Радиус окна разности	Среднее время, мс	Полнота после 2 раунда, %	Полнота после 3 раунда, %
17.	5	3	10	0	15123	89,01960784	94,9019608
18.	3	5	10	2	8121	82,35294118	94,9019608
19.	5	3	10	2	15251	81,17647059	94,9019608
20.	3	5	10	1	8024	85,88235294	94,5098039
21.	5	5	2	1	11726	86,66666667	93,7254902
22.	5	5	3	1	12416	83,92156863	93,7254902
23.	5	5	10	1	17670	83,52941176	93,7254902
24.	5	5	6	2	14935	81,17647059	93,7254902
25.	5	5	5	2	13937	81,56862745	93,3333333
26.	5	5	7	2	15846	79,60784314	92,5490196
27.	5	5	8	2	16359	79,60784314	92,5490196
28.	5	5	9	2	17263	79,60784314	92,5490196
29.	5	5	10	2	17753	79,60784314	92,5490196
30.	3	5	2	2	6503	92,15686275	92,1568627
31.	5	5	2	2	11731	86,2745098	92,1568627
32.	5	5	11	2	18706	79,60784314	92,1568627
33.	5	5	12	2	19255	79,60784314	92,1568627

Для оптимизации параметров метода карты энтропии было отобрано 33 набора параметров, при которых значение достоверности *D* после третьего раунда больше 92 %. По таблице 1 также выявлены следующие закономерности:

- количество ячеек в ряду окна z ∈ [3; 5];
- размер ячейки q ∈ [3; 5];
- количество промежутков оттенков серого К ∈ [2; 12];
- радиус окна разности и ∈ [0; 2].

Стоит отметить, что тестовое изображение не содержит ошибки интерполяции, из-за которых могут возникнуть ошибки II рода при выявлении ЗУ, а также изображение эталона (белый фон) и объекта контроля (тестовое изображение) геометрически выравнены, поэтому по тестовому примеру нельзя вычислить векторную целевую функцию  $\vec{F}$  (1) и произвести оценку эффективности функционирования всей АС СРК.

Для оптимизации параметров метода карты энтропии был выбран объект контроля (рис. 10), у которого одно из трех ЗУ слабо выделяется на фоне объекта. Его эталон представлен на рис. 5в.



Рис. 10. Объект контроля для оптимизации параметров метода карты энтропии

В таблице 2 отражены значения достоверности D, полноты M и времени  $T_4$  работы алгоритма от выбранных параметров из таблицы 1 по результатам исследования объекта контроля из рис. 10. Сортировка произведена по достоверности D после третьего раунда от наибольшей до наименьшей.

Таблі	ица 2	- Дост	говерно	ость, п	олнота	и среди	нее вре	мя выя	вления	различи	ий для
объекта контроля из рис. 10											

№ п/п	Количество ячеек в ряду окна	Размер ячейки	Количество промежутков оттенков серого	Радиус окна разности	Среднее время, мс	Достоверность после 1 цикла, %	Достоверность после 2 цикла, %	Достоверность после 3 цикла, %	Полнота после 1 раунда	Полнота после 2 раунда	Полнота после 3 раунда
1	5	5	12	2	20066	99,034	98,536	98,304	1	1	1
2	5	5	11	2	19445	98,966	98,521	98,288	1	1	1
3	5	5	10	2	18694	98,919	98,51	98,281	1	1	1
4	5	5	9	2	18022	98,854	98,468	98,278	1	1	1
5	5	5	8	2	17557	98,815	98,437	98,264	1	1	1
6	5	5	5	2	15310	98,688	98,328	98,138	1	1	1
7	5	5	4	2	14211	98,608	98,261	98,117	1	1	1
8	5	5	7	2	16290	98,758	98,346	98,108	1	1	1
9	5	5	6	2	15801	98,738	98,328	98,068	1	1	1

При достоверности D < 98 % количество ошибок II рода настолько велико, что выявить корректно ЗУ не представляется возможным, поэтому указанные параметры в дальнейшем рассматриваться не будут. Также наиболее критичным является наличие ошибки I рода, при которых ЗУ не обнаруживается даже после первого раунда.

По таблице 2 также выявлены следующие закономерности, при которых D < 0.98 и M = 1:

- количество ячеек в ряду окна z = 5;
- размер ячейки q = 5;
- количество промежутков оттенков серого К ∈ [4; 12];
- радиус окна разности и = 2.

Для выбора количества промежутков оттенков серого K выбран другой объект контроля, для которого была допущена ошибка в совмещении по оси абсцисс и ординат на один пиксель. На рис. 11 представлена зависимость точности выявления различий в зависимости от количества промежутков оттенков серого K.



Рис. 11. Экспериментальные значения элементов достижимого множества в зависимости от количества промежутков оттенков серого: 1 – идеальная точка; 2 – точка, ближайшая к идеальной

Из рис. 11 видно, что полнота M равна 1 только в трех случаях, а наилучший результат достигается при K = 5. Поэтому наиболее приемлемый набор параметров метода карты энтропии (точка 2 на рис. 8): количество ячеек в ряду окна z = 5; размера ячейки q = 5; количество промежутков оттенков серого K = 5; радиус окна разности u = 2.

По результатам проведения вычислительного эксперимента также были определены значения показателей эффективности выбранных методов выявления различий для каждого объекта контроля (рис. 5), средние значения которых приведены в таблице 3.

Время выполнения методов выявления различий постоянное, не зависит от типа объекта контроля. Для метода окна Парзена-Розенблатта среднее время составило 3031 мс, для метода карты энтропии – 15036 мс.

Для метода окна Парзена-Розенблатта среднее значение достоверности составило 0,985, для метода карты энтропии – 0,986.

Для метода окна Парзена-Розенблатта среднее значение полноты составило 0,972, для метода карты энтропии – 1.

№ п/п	Объект контроля	Время выявления различий методом окна Парзена- Розенблатта, мс	Время выявления различий методом карты энтропии, мс	Достоверность методом окна Парзена-Розенблатта	Достоверность методом карты энтропии	Полнота методом окна Парзена- Розенблатта	Полнота методом карты энтропии
1.	Nº 1	3042	15043	0,9858	0,9843	0,95	1
2.	Nº 2	3012	15021	0,9815	0,9872	1	1
3.	Nº 3	3055	15054	0,9851	0,9862	0,967	1
4.	<u>№</u> 4	3032	15031	0,9856	0,9867	0,917	1
5.	<u>№</u> 5	2989	14988	0,9856	0,9867	1	1
6.	№ 6	3076	15079	0,9872	0,988	0,967	1
7.	№ 7	3045	15041	0,9838	0,9849	1	1

Таблица 3 – Средние значения показателей эффективности методов выявления различий

#### Оптимизация программной реализации

В программном коде отсутствуют параллельные вычисления, что негативно сказывается на скорости работы АС.

Известен теоретический предел возможностей распараллеливания вычислительного процесса [24-25]. В соответствии с законом Амдала-Уэра, оптимизация по параллельности ограничена временными затратами на выполнение последовательного кода. Предел ускорения с использованием параллельных вычислений ограничен долей последовательного кода – коэффициентом µ, который рассчитывается по формуле:

$$\mu = \frac{t_1}{t_2},\tag{26}$$

где:  $t_1$  – время, потраченное на выполнение последовательного кода;  $t_2$  – время, потраченное на выполнение кода, который можно распараллелить.

Ускорение, которое может быть получено на многопроцессорной системе, не может превышать величину:

$$s_p = \frac{1}{\mu + \frac{1 - \mu}{N}},$$
 (27)

где *N* – число процессоров в системе.

Время, равное результату деления времени работы на одном процессоре на ускорение  $s_p$ , является минимальным временем, которое можно получить за счет организации параллельных вычислений. Для расчета времени выполнения параллельных и последовательных участков кода, использовался таймер класса StopWatch пространства имён System.Diagnostics. Последовательно выполняется код загрузки изображения в оперативную память, операции сегментации изображений, вывод результатов работы АС. Алгоритмы поиска параметров аффинного преобразования и выявления структурных различий можно распараллелить. В результате среднее значение  $\mu$  было получено равным 0,38. Коэффициент  $\mu$  показывает долю кода, которую невозможно распараллелить – чем меньше значение  $\mu$ , тем лучше будет эффект от увеличения числа процессоров.

Скорость работы AC зависит как от технических характеристик компьютера, так и от самого языка программирования. Например, скорость выполнения вычислений, реализованных на языке программирования  $C^{++}$ , быстрее, чем аналогичные действия на  $C^{\#}$ , что объясняется особенностями работы платформы .NET Framework.

#### Выводы

Разработана и верифицирована математическая модель АС СРК с этапом визуального сравнения рентгенограмм объектов контроля из одной партии ТС с эталонными рентгенограммами, для выявления различий и выделения аномалий разности эталонного изображения и снимка из партии TC, позволяющая повысить оперативность проведения операций при обеспечении заданной достоверности по обнаружению, идентификации и локализации закладочных устройств.

Предложен метод карт энтропии для бинарной классификации «шумзакладка» случайных и организованных пикселей для локализации на изображениях изменений из-за появления или исчезновения объектов в наблюдаемой сцене. Данный метод основан на энтропийном подходе к обнаружению в изображении внутренних статистических связей между его элементами, включающем построение карты энтропии, примененном в методе окна Парзена-Розенблатта.

Разработана методика формирования начальной популяции в генетическом алгоритме при совмещении рентгенограмм, основанная на определении морфологии рассматриваемых изображений. Обоснована система показателей оценки эффективности функционирования АС СРК, включающая оперативность, достоверность и полноту. На основе выборочного метода определены структура и объем выборки рентгеновских снимков TC, гарантирующие ее репрезентативность и адекватность. Спланирован и проведён на основе программной реализации подсистемы анализа рентгенограмм АС СРК вычислительный эксперимент по оценке показателей эффективности и определению параметров модели, при которых достигается максимальная эффективность ее функционирования. По условиям вычислительного эксперимента на рентгеновские снимки налагались следующие ограничения:

- для однозначной интерпретации объектов контроля на растровых изображениях не допускалось наличие посторонних предметов, а также нескольких объектов контроля на одном снимке;
- не допускалось наличие гибких элементов объектов контроля (провода), соединяющие разные части TC;
- не допускались снимки, объект контроля на которых показан не полностью или срезан.

Предложены варианты повышения скорости работы программной реализации путем оптимизации последовательных вычислений и организации параллельных вычислений.

#### Литература

1. Хорев А. А. Техническая защита информации. Т. 1: Технические каналы утечки информации. – М.: НПЦ «Аналитика», 2008. – 436 с.

2. Давыдов А. Е., Максимов Р. В., Савицкий О. К. Защита и безопасность ведомственных интегрированных инфокоммуникационных систем – М.: ОАО Воентелеком, 2015. – 520 с.

3. Courtland R., 3D X-ray tech for easy reverse engineering of ICs // IEEE Spectrum. 2017. Vol. 54. № 5. P. 11-12. doi: 10.1109/MSPEC.2017.7906884.

4. Swierczynski P., Fyrbiak M., Paar C., Huriaux C., Tessier R. Protecting against Cryptographic Trojans in FPGAs // 23rd IEEE Annual International Sympsium on Field-Programmable Custom Computing Machines. – Canada, Vancouver, 2015. P. 151-154. doi: 10.1109/FCCM.2015.55.

5. Лучинин В. В., Гасников А. О. Анализ возможных методов поиска и идентификации блока радиоканала на кристалле интегральной микросхемы // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2012. № 8. С. 14-19.

6. Лучинин В. В. Эволюция вакуумной электроники. Микро- и наноразменые системы и технологии // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21. № 2. С. 67-72. doi: 10.17587/nmst.21.67-72.

7. Филиппов А. С. Разработка методики по выявлению электронных устройств негласного получения информации, использующих узлы и блоки средств беспроводной связи // Концепции современного образования: новации в системе научного знания. Сборник научных трудов. 2020. С. 301-306.

8. Староверов Н. Е. Метод автоматизированного контроля электронных компонентов на микрофокусных рентгеновских снимках // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24. № 4. С. 27–36. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-4-27-36.

9. Власов К. А., Усатиков С. В. Концепция автоматизированной системы специального рентгеновского контроля технических средств // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 5. С. 180-198. doi: 10.24412/2410-9916-2021-5-180-198.

10. Макаренко С. И. Критерии и показатели оценки качества тестирования на проникновение // Вопросы кибербезопасности. 2021. №. 3 (43). С. 43-57.

11. Шварц Г. Выборочный метод. Руководство по применению статистических методов оценивания. – М.: Статистика, 1978.

12. Джо К. О., Гергет О. М. Методы и алгоритмы сегментации изображений // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2020. № 2 (8). С. 11-16.

13. Хаустов П. А. Алгоритмы распознавания рукописных символов на основе построения структурных моделей // Компьютерная оптика. 2017. Т. 41. № 1. С. 67-78. doi: 10.18287/2412-6179-2017-41-1-67-78.

14. Захарова А. М., Сиволобов С. В. Исследование методов локальной бинаризации для изображений печатной платы // Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук. IV научно-практическая международная конференция (школа-семинар) молодых ученых: в двух частях (Тольятти, 23–25 апреля 2018 г.). Часть 1. – Тольятти: Издатель Качалин Александр Васильевич, 2018. С. 43-48.

15. Красник Е. В., Трушлякова В. В. Применение аффинного преобразования для совмещения совокупности растровых изображений слоев интегральной схемы // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Серия «Физика твёрдого тела». 2008. №3. С. 19-25.

16. Нгуен В. Ч., Тропченко А. А. Анализ методов интерполяции в задачах реконструкции изображений // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. № 3. С. 170-181.

17. Мамедов Р. К., Алиев Т. Ч., Муталлимова А. С. Распознавание бинарных изображений объектов, подвергнутых аффинным преобразованиям // Информационные технологии. 2016. Т. 22, № 10. С. 754-757.

18. Mikhalev A. S., Rouban A. I. Global optimization on set of mixed variables: continuous and discrete with unordered possible values // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. doi: 10.1088/1757-899X/122/1/012024.

19. Мараев В. С., Беззубенко Е. А., Черкашин Д. А., Михалев А. С. Исследование эффективности генетического алгоритма с различными методами селекции, типами кроссовера и стратегиями формирования поколений при

поиске экстремумов функций // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2017. № 2 (17). С. 12.

20. Дубнов Ю. А. Метод отбора признаков на основе вероятностного подхода и перекрёстной энтропии на примере задачи распознавания изображений // Искусственный интеллект и принятие решений. 2020. № 2. С. 78-85.

21. Акимова П. Р., Мацулевич В. В., Замурий Н. М., Украинцев М. О., Баринова С. А., Дубов А. Б., Аниканова В. В., Занченко Ф. Р., Иванов Ф. И. О влиянии энтропии внутри класса на точность и полноту классификации // Информационные процессы. 2021. Т. 21. № 3. С.149–161.

22. Сирота А. А., Донских А. О., Акимов А. В., Минаков Д. А. Смешанные ядерные оценки многомерных распределений и их применение в задачах машинного обучения для классификации биологических объектов на основе спектральных измерений // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43. № 4. С. 677-691. doi:10.18287/2412-6179-2019-43-4-677-691.

23. Румянцев А. А., Бикмуратов Ф. М., Пашин Н. П., Голованов Р. А. Оценка энтропии фрагментов рентгеновских изображений легких // Инженерный вестник Дона. 2019. № 9 (60). С. 23.

24. Воеводин В. В. Вычислительная математика и структура алгоритмов. М.: Изд-во МГУ, 2010. – 162 с.

25. Карпов В. Е. Введение в распараллеливание алгоритмов и программ. // Компьютерные исследования и моделирование. 2010. Т. 2. № 3. С. 231-272.

## References

1. Horev A. A. *Tehnicheskaja zashhita informacii. Tehnicheskie kanaly utechki informacii* [Technical Protection of Information. Technical Channels of Information Leakage]. Moscow, Research and production center Analytics, 2008. 436 p. (in Russian).

2. Davydov A. E., Maksimov R. V., Savickij O. K. Zashhita i bezopasnost' vedomstvennyh integrirovannyh infokommunikacionnyh system [Protection and security of departmental integrated infocommunication systems]. Moscow, JSC Voentelecom, 2015. 520 p. (in Russian).

3. Courtland R. 3D X-ray tech for easy reverse engineering of ICs. *IEEE Spectrum*, May 2017, vol. 54, no. 5, pp. 11-12. doi: 10.1109/MSPEC.2017.7906884.

4. Swierczynski P., Fyrbiak M., Paar C., Huriaux C., Tessier R. Protecting against Cryptographic Trojans in FPGAs. *IEEE 23rd Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines*, Vancouver, BC, Canada, 2015, pp. 151-154. doi:10.1109/FCCM.2015.55.

5. Luchinin V. V., Gasnikov A. O. Analysis of the Possible Methods for Search and Identification of the Unit Crystal Radio Channel on the Integrated Circuits. *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*, 2012, no. 8, pp. 14-19 (in Russian). 6. Luchinin V. V. Evolution of Vacuum Electronics Micro and Nanoscale Systems and Technologies. *Nano and Microsystems Technology Journal*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 67-72. doi: 10.17587/nmst.21.67-72. doi:10.17587/nmst.21.67-72 (in Russian).

7. Filippov A. S. Razrabotka metodiki po vyjavleniju jelektronnyh ustrojstv neglasnogo poluchenija informacii, ispol'zujushhih uzly i bloki sredstv besprovodnoj svjazi [Development of a Methodology for Identifying Electronic Devices for Secretly Obtaining Information Using Nodes and Blocks of Wireless Communication Means]. *Koncepcii sovremennogo obrazovanija: novacii v sisteme nauchnogo znanija. Sbornik nauchnyh trudov.* Kazan, 2020, pp. 301-306. (in Russian).

8. Staroverov N. E. A Method for Automated Control of Electronic Components on Microfocus X-ray Images. *Journal of the Russian Universities*. *Radioelectronics*, 2021, vol. 24, no. 4, pp. 27-36. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-4-27-36 (in Russian).

9. Vlasov K. A., Usatikov S. V. The Concept of an Automated System for Special X-ray Control of Technical Equipment. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 5, pp. 180-198 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2021-5-180-198.

10. Makarenko S. I. Criteria and parameters for estimating quality of penetration testing. *Voprosy kiberbezopasnosti*, 2021, no. 3 (43), pp. 43-57 (in Russian).

11. Shvarc G. *Vyborochnyj metod. Rukovodstvo po primeneniyu statisticheskih metodov ocenivaniya* [Selective method. Guidelines for the use of statistical evaluation methods]. Moscow, 1978. 213 p. (in Russian).

12. Joe K. O., Gerget O. M. Methods and Algorithms for Image Segmentation. *Automation and Modeling in Design and Management*, 2020, no. 2 (8), pp. 11-16 (in Russian). doi: 10.30987/2658-6436-2020-2-11-16.

13. Haustov P. A. Algorithms for Handwritten Character Recognition Based on Constructing Structural Models. *Computer optics*, 2017, vol. 41, no. 1, pp. 67-78 (in Russian). doi: 10.18287/2412-6179-2017-41-1-67-78.

14. Zakharova A. M., Sivolobov S. V. Issledovaniye metodov lokalnoy binarizatsii dlya izobrazheniy pechatnoy platy [Investigation of local binarization methods for the image of a Printed Circuit Board]. *Prikladnaya matematika i informatika: sovremennyye issledovaniya v oblasti estestvennykh i tekhnicheskikh nauk* [IV nauchno-prakticheskaya mezhdunarodnaya konferentsiya (shkola-seminar) molodykh uchenykh] Toliatti: Izdatel Kachalin Aleksandr Vasilyevich, 2018. pp. 43-48 (in Russian).

15. Krasnik E. V., Trushljakova V. V. Primenenie affinnogo preobrazovanija dlja sovmeshhenija sovokupnosti rastrovyh izobrazhenij sloev integral'noj shemy. *Izvestiya SPbGETU «LETI». «Fizika tvjordogo tela»*, 2008, no. 3, pp. 19-25 (in Russian).

16. Nguen V. Ch., Tropchenko A. A. Analiz metodov interpoljacii v zadachah rekonstrukcii izobrazhenij. *Science and Education: Scientific Publication Science and Education of the Bauman MSTU*, 2017, no. 3, pp. 170-181. (in Russian).

17. Mamedov R. G., Aliyev T. Ch., Mutallimova A. S. Recognition of Binary Images of the Objects Suffected to Affine Transformations. *Information Technologies*, 2016, vol. 22, no. 10, pp. 754-757. (in Russian).

18. Mikhalev A. S., Rouban A. I. Global Optimization on Set of Mixed Variables: Continuous and Discrete with Unordered Possible Values. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016. doi: 10.1088/1757-899X/122/1/012024.

19. Maraev V. S., Bezzubenko E. A., Cherkashin D. A., Mihalev A. S. Research of the Efficiency of the Genetic Algorithm With Various Methods of Selection, Crossover Types and Strategies of Formation of Generations in Searching of Extremums of Test Functions. *Modeling, Optimization and Information Technology*, 2017, vol. 5, no. 2 (17), p. 12 (in Russian).

20. Dubnov YU. A. Feature selection method based on a probalistic approach and cross entropy metric for image recognition problem. *Iskusstvennyj intellekt i prinyatie reshenij*, 2020, no. 2, pp.78-85 (in Russian).

21. Akimova P. R., Maculevich V. V., Zamurij N. M., Ukraincev M. O., Barinova S. A., Dubov A. B., Anikanova V. V., Zanchenko F. R., Ivanov F. I. On the Influence of Entropy within a Class on the Precision and Recall of Classification. *Informacionnye processy*, 2021, vol. 21, no. 3, pp.149-161 (in Russian).

22. Sirota A. A., Donskih A. O., Akimov A. V., Minakov D. A. Multivariate Mixed Kernel Density Estimators and their Application in Machine Learning for Classification of Biological Objects Based on Spectral Measurements. *Computer optics*, 2019, vol. 43, no. 4, pp. 677-691. doi: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-677-691. (in Russian).

23. Rumjancev A. A., Bikmuratov F. M., Pashin N. P., Golovanov R. A. Evaluation of the Entropy of Fragments of X-ray Images of the Lungs. *Engineering journal of Don*, 2019, no. 9 (60), p.23. (in Russian).

24. Voevodin V. V. Vychislitel'naya matematika i struktura algoritmov [Computational mathematics and the structure of algorithms]. Moscow, Lomonosov Moscow State University, 2010. 162 p. (in Russian).

25. Karpov V. E. Vvedenie v rasparallelivanie algoritmov i programm. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie*, 2010. vol. 2, no. 3, pp. 231-272. (in Russian).

## Статья поступила 25 января 2023 г.

## Информация об авторах

Власов Константин Александрович – старший научный сотрудник научно-исследовательского центра. Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С.М. Штеменко. Область научных интересов: информационная безопасность; компьютерное зрение. E-mail: meavit@yandex.ru

*Усатиков Сергей Васильевич* – доктор физико-математических наук, доцент. Профессор кафедры средств и систем передачи и обработки информации. Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С.М. Штеменко. Область научных интересов: математическое моделирование. E-mail: SV@Usatikov.com

Адрес: 350005, Россия, г. Краснодар, ул. им. Грибоедова, д. 18.

#### Evaluation of the effectiveness of automated analysis radiographs when detecting secret intelligence device during special X-ray control of technical means based on a computational experiment

K. A. Vlasov, S. V. Usatikov

Formulation of the problem: the need to empowerment of existing software and hardware complexes to automate and increase the efficiency of operations while ensuring the necessary reliability for the detection, identification and localization of secret intelligence device actualizes the issues of developing an automated system of special X-ray control. For this purpose, a mathematical model of the subsystem for analyzing radiographs of an automated system of special X-ray control is proposed, in which the detection of stowing devices is carried out as a result of comparing and identifying differences between the available Xray images of standard blocks of technical means with the actually observed images of various objects of control from one batch of technical means. To assess the effectiveness, the indicators were determined by which the quality of the automated system of special X-ray control is evaluated, namely, efficiency, reliability and completeness. **Purpose:** verification and determination of parameters of the developed mathematical model of the X-ray analysis subsystem of the automated system of special X-ray control based on a computational experiment for maximum efficiency of the subsystem in terms of efficiency, reliability and completeness. Methods: system analysis of the process of processing radiographs of technical means during special checks of secret intelligence device, modeling and algorithmization by computer vision methods and the theory of vector optimization of the process of detecting structural differences in raster images of radiographs, planning a computational experiment. Novelty: a mathematical model of an automated system of special Xray control with a stage of visual comparison of radiographs of control objects from one batch of technical means with reference radiographs has been developed and verified to identify differences and highlight anomalies of the difference between the reference image and the snapshot from the batch of technical means, which allows to increase the efficiency of operations while ensuring a given reliability for detection, identification and localization of secret intelligence device. A method of entropy maps for binary classification of "noise-bookmark" random and organized pixels for localization of changes in images due to the appearance or disappearance of objects in the observed scene is proposed. This method is based on an entropy approach to detecting internal statistical relationships between its elements in an image, including the construction of an entropy map, applied in the Parsen-Rosenblatt window method. A technique for the formation of the initial population in the genetic algorithm with the combination of radiographs, based on the determination of the morphology of the images under consideration, has been developed. **Result:** the system of indicators for evaluating the effectiveness of the automated system of special X-ray control, including efficiency, reliability and completeness, is substantiated. On the basis of the sampling method, the structure and sample size of Xray images of technical means were determined, guaranteeing its representativeness and adequacy. A computational experiment was planned and carried out on the basis of the software implementation of the X-ray analysis subsystem of the automated system of special X-ray control to evaluate performance indicators and determine the parameters of the model at which maximum efficiency is achieved. Variants of increasing the speed of the software implementation by optimizing sequential computations and organizing parallel computations are proposed. **Practical relevance:** a software implementation of a mathematical model of a promising subsystem for analyzing radiographs of an automated system of special X-ray control has been performed and its parameters have been determined to achieve maximum efficiency of the subsystem functioning.

*Key words:* special inspection, special X-ray control, secret intelligence device, genetic algorithm, image combination, structural differences of raster images, computational experiment.

#### **Information about Authors**

*Konstantin Aleksandrovich Vlasov* – Senior Researcher at the Research Center. Krasnodar Higher Military School named after general of the army S.M. Shtemenko. Field of research: information security; computer vision. E–mail: meavit@yandex.ru

Sergey Vasilievich Usatikov – Dr. habil. of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor. Professor of the Department of Means and Systems of Information Transmission and Processing. Krasnodar Higher Military School named after general of the army S.M. Shtemenko. Field of research: mathematical modeling. E-mail: SV@Usatikov.com

Address: Russia, 350005, Krasnodar, st. Griboedova, 18.