

Повышение информативности системы распознавания загрязнений элементов ракетно-космической техники

Лебедев А.С.^{1*}, Добролюбов А.Н.¹, Безруков А.В.², Ярыгин Д.М.²

*¹Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия*

²Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова, ул. 1-я Красноармейская, 1, Санкт-Петербург, 190005, Россия

**e-mail: vka@mil.ru*

Статья поступила 27.05.2021

Аннотация

В данной статье представлены результаты применения расширенного словаря признаков для системы распознавания загрязнений поверхностей. Рассматривается возможность использования теории распознавания образов применительно к оптико-электронному контролю качества поверхностей изделий (элементов изделий) авиационной и ракетно-космической техники для определения уровня их дефектов различного рода. В качестве расширенного словаря использовались признаки, основанные на статистиках второго порядка (матрицах сочетаний). Представленные результаты позволяют сделать вывод об улучшении распознающих свойств системы диагностики по сравнению с ранее рассмотренной системой, использующей признаки, основанные только на статистиках первого порядка (гистограммах распределения интенсивностей отраженных сигналов).

Ключевые слова: контроль качества, разделение классов, распознавание образов, словарь признаков, матрица интенсивностей, матрица сочетаний, интенсивность отраженного сигнала.

Введение

Системы искусственного интеллекта для обеспечения качества все чаще находят свое применение в различных областях промышленности, особенно в авиационной и космической. Достаточно активно сегодня эти системы внедряются в процесс неразрушающего контроля элементов ракетно-космической техники при их производстве и эксплуатации [1-9]. Задача распознавания образов – одно из направлений искусственного интеллекта [10-12, 14, 15]. Результатом такого внедрения является повышение информативности и объективности систем контроля и диагностики при формировании экспертных заключений о состоянии исследуемого объекта, в том числе и за счет устранения, так называемого человеческого фактора. В ранее проведенных исследованиях были представлены результаты поиска диагностических признаков для системы распознавания повреждений поверхностей, вызванных окислением, появлением шероховатостей различных классов и маслянистым загрязнением различной степени, которые, наряду с эталонной (чистой) поверхностью составили алфавит распознаваемых образов [1, 20, 21].

Классом сигналов (кластером), которые должны находиться в транзитивном (переходном) отношении к образу (типу поверхности) принимались замеры

интенсивностей отраженных от различных поверхностей электромагнитных сигналов оптического диапазона волн.

В качестве словаря признаков использовались математическое ожидание, дисперсия, коэффициенты асимметрии и эксцесса, получаемые из гистограмм интенсивностей (статистик первого порядка) сигналов, отраженных от поверхностей с различными загрязнениями [1, 21-23].

Недостатком данной методики оказалась невозможность однозначного различения маслянистой и чистой поверхностей, образующих в пространстве перечисленных признаков пересекающиеся области.

В данной статье представлены результаты устранения указанного недостатка за счет расширения признакового пространства признаками, основанными на статистике второго порядка, а именно: матрице пространственной зависимости (матрице сочетаний).

Описание диагностических признаков

Краткое описание сути вводимых признаков заключается в следующем. Обозначим $I(n,m)$ – значение интенсивности отраженного от поверхности оптического сигнала с координатами отражающего пиксела n – номер строки, и m – номер столбца. Тогда всю совокупность измерений интенсивностей отражений для поверхности можно представить в виде матрицы интенсивностей [16-19]:

$$I(n, m) = \begin{bmatrix} I_{00} I_{01} \dots I_{0M} \\ I_{10} I_{11} \dots I_{1M} \\ \dots \dots \dots \dots \\ I_{N0} I_{N1} \dots I_{NM} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Рассмотрим, как меняется интенсивность отраженного сигнала в соседних пикселах. Пусть d -расстояние между пикселами, а $\varphi = \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\}$ – ориентация (рис. 1), т.е. у нас имеется горизонтальное, диагональное, вертикальное и антидиагональное соседство.

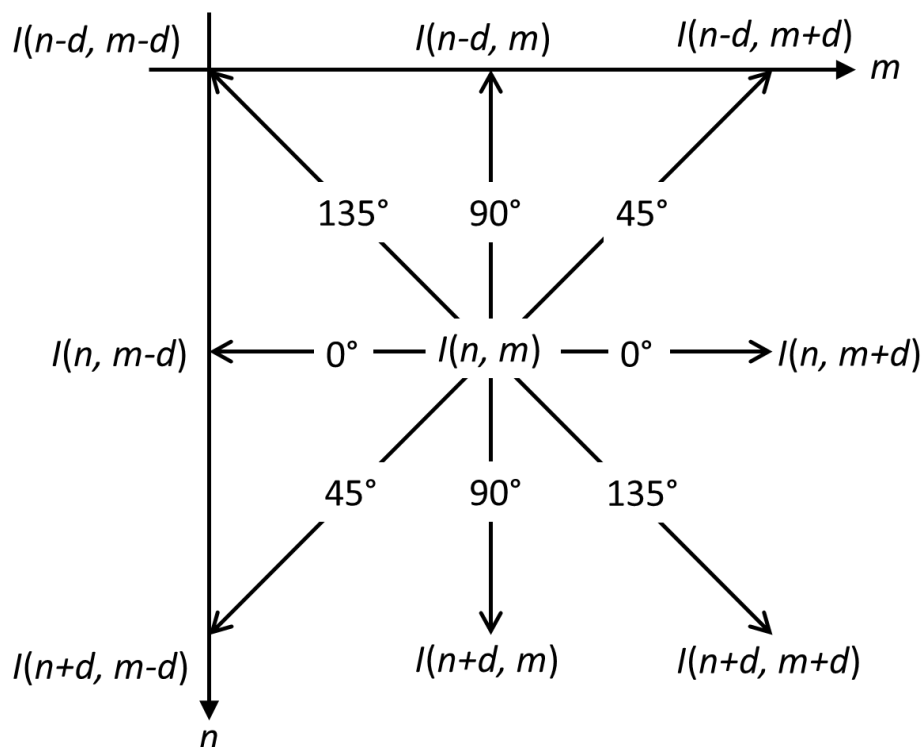


Рисунок 1 – Схема ориентации пикселей в пространстве

Обозначим через $P_\varphi [I_1(n, m), I_2(n_1, m_1)]$ – совместную вероятность. Тогда P_0 – вероятность того, что пиксели, расположенные на горизонтали на расстоянии d друг от друга имеют интенсивности I_1 и I_2 , равные отношению числа пар пикселей с

расстоянием d и интенсивностями I_1 и I_2 к общему числу таких сочетаний в матрице интенсивностей:

$$P_0 [I_1(n, m), = I_1; I(n + d, m) = I_2], \quad (2)$$

Аналогично определяем:

$$\begin{aligned} P_{45}(I_1, I_2) &= P [I_1(n, m), = I_1, I(n \pm d, m \mp d) = I_2], \\ P_{90}(I_1, I_2) &= P [I_1(n, m), = I_1, I(n, m \mp d) = I_2], \\ P_{135}(I_1, I_2) &= P [I_1(n, m), = I_1, I(n \pm d, m \pm d) = I_2]. \end{aligned} \quad (3)$$

Каждый такой массив является матрицей сочетаний $P(I_m, I_n)$:

$$P(I_m, I_n) = \begin{bmatrix} P(0, 0) & \dots & P(0, G-1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P(G-1, 0) & \dots & P(G-1, G-1) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где G -количество градаций интенсивностей.

Например, для матрицы интенсивностей I :

$$I = \begin{bmatrix} 1122 \\ 1100 \\ 3233 \\ 3222 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

для $\varphi = 0^0$, $d = 1$ общее количество просматриваемых по горизонталям матрицы пар равно 24 (т.к. просмотр происходит в обе стороны), $0 \leq I_m, I_n \leq 3$, матрица сочетаний принимает вид:

$$P_0(I_m, I_n) = \begin{bmatrix} P(0,0)P(0,1)P(0,2)P(0,3) \\ P(1,0)P(1,1)P(1,2)P(1,3) \\ P(2,0)P(2,1)P(2,2)P(2,3) \\ P(3,0)P(3,1)P(3,2)P(3,3) \end{bmatrix} = \frac{1}{24} \begin{bmatrix} 4110 \\ 1200 \\ 1063 \\ 0033 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

для $\varphi = 45^\circ$ и $d=1$:

$$P_{45}(I_m, I_n) = \frac{1}{18} \begin{bmatrix} 0121 \\ 1011 \\ 2103 \\ 1130 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

и т.д.

Определение признаков, основанных на статистиках второго порядка

Существуют следующие основные виды признаков, основанных на статистиках второго порядка [11, 12, 14-18]:

– угловой момент второго порядка ASM – мера гладкости изображения:

$$ASM = \sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} [P(i, j)]^2. \quad (8)$$

при малой вариации $ASM \approx 1$, а при больших вариациях контраста $ASM \rightarrow 0$.

– контраст по заданной паре CON – мера локальной дисперсии серого имеет вид:

$$CON = \sum_{i=0}^{G-1} n^2 \left\{ \sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} P(i, j) \right\} \quad (9)$$

– момент обратной разности IDF определяется по формуле:

$$IDF = \sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} \frac{P(i, j)}{1 + (i - j)^2}; \quad (10)$$

– энтропия H – мера равномерности:


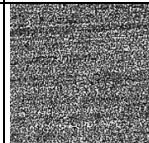
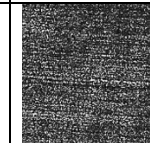
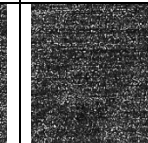



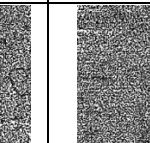

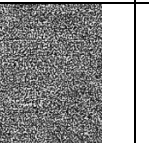
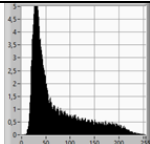
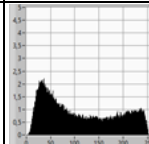
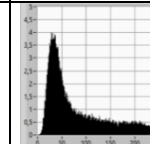
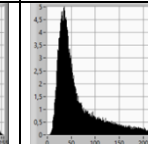
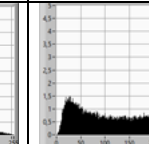
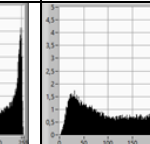
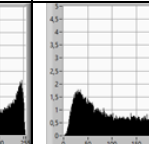
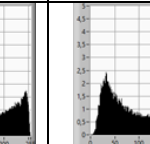
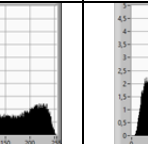
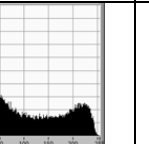
$$H = \sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} P(i, j) \log_2 P(i, j) \quad (11)$$

Энтропия связана с фиксированной ориентацией и фиксированным расстоянием.

Результаты расчетов вышеперечисленных признаков для всех классов распознаваемых поверхностей приведены в таблице 1, где представлены визуальные иллюстрации матриц интенсивностей отраженных от различных поверхностей оптических сигналов, их гистограммы интенсивностей и количественные значения выше упомянутых признаков, рассчитанные на основе матриц сочетания сигналов, отраженных от различных поверхностей из исходного алфавита классов [13].

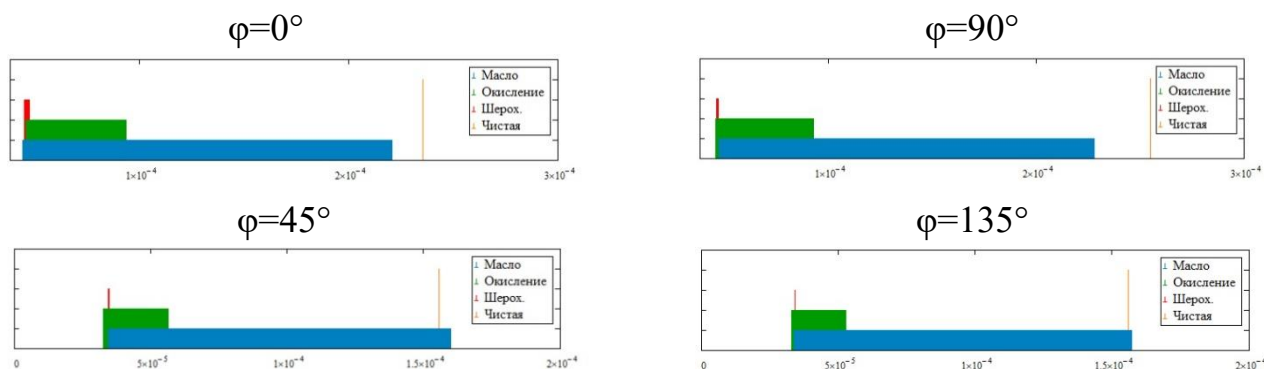
Таблица 1

Результаты расчетов признаков для всех классов распознаваемых поверхностей

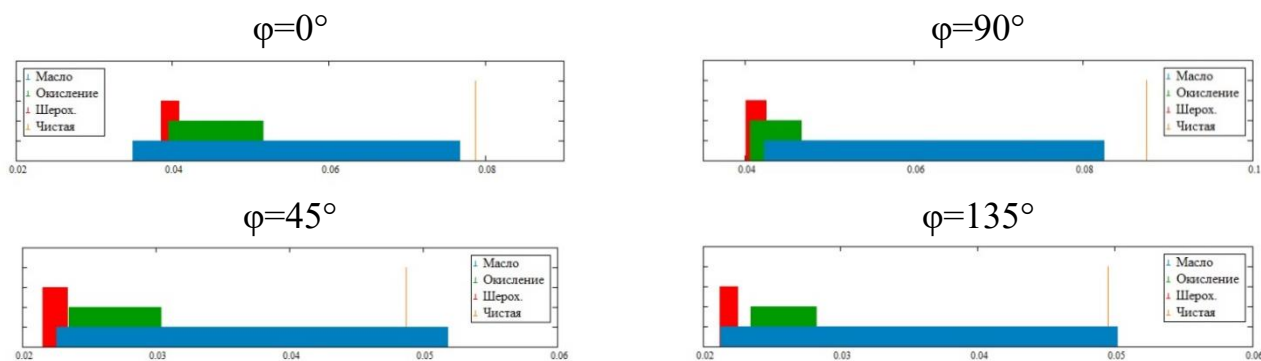
Класс		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тип дефекта		Чистая	Масло	Масло	Масло	Окисление	Окисление	Окисление	Шероховатость	Шероховатость	Шероховатость
Степень		-	20 мг на площади 0,0024 м ²	40 мг на площади 0,0024 м ²	60 мг на площади 0,0024 м ²	1 час в HCL 90%	2 час в HCL 90%	3 час в HCL 90%	R _z = 6,3-10 мкм, R _a = 1,25-2,5 мкм	R _z = 3,2-6,3 мкм, R _a = 0,63-1,26 мкм	R _z = 2,6-3,2 мкм, R _a = 0,32-0,63 мкм
Матрица интенсивностей I(n, m)											
Гистограмма интенсивностей P(I)											
φ=0°	ASM	23,554·10 ⁻⁵	4,39·10 ⁻⁵	12,794·10 ⁻⁵	22,045·10 ⁻⁵	9,345·10 ⁻⁵	4,913·10 ⁻⁵	4,54·10 ⁻⁵	4,713·10 ⁻⁵	4,54·10 ⁻⁵	4,448·10 ⁻⁵
	IDF	0,079	0,035	0,06	0,077	0,052	0,04	0,039	0,041	0,038	0,039
	H	13,625	14,99	14,12	13,43	14,87	15,039	15,03	14,943	14,944	14,96
φ=90°	ASM	25,48·10 ⁻⁵	4,71·10 ⁻⁵	12,374·10 ⁻⁵	22,78·10 ⁻⁵	9,262·10 ⁻⁵	5,05·10 ⁻⁵	4,538·10 ⁻⁵	4,685·10 ⁻⁵	4,604·10 ⁻⁵	4,605·10 ⁻⁵
	IDF	0,087	0,042	0,059	0,082	0,047	0,044	0,041	0,042	0,040	0,042
	H	13,614	14,981	14,193	13,443	14,874	15,038	15,049	14,978	14,968	14,961
φ=45°	ASM	15,55·10 ⁻⁵	3,452·10 ⁻⁵	8,8·10 ⁻⁵	15,972·10 ⁻⁵	5,643·10 ⁻⁵	3,49·10 ⁻⁵	3,269·10 ⁻⁵	3,461·10 ⁻⁵	3,434·10 ⁻⁵	3,434·10 ⁻⁵
	IDF	0,049	0,023	0,036	0,052	0,03	0,025	0,023	0,023	0,023	0,022
	H	13,840	15,171	14,375	13,672	15,069	15,24	15,248	15,156	15,144	15,144
φ=135°	ASM	15,579·10 ⁻⁵	3,386·10 ⁻⁵	8,769·10 ⁻⁵	15,711·10 ⁻⁵	5,265·10 ⁻⁵	3,496·10 ⁻⁵	3,291·10 ⁻⁵	3,410·10 ⁻⁵	3,417·10 ⁻⁵	3,395·10 ⁻⁵
	IDF	0,049	0,021	0,036	0,05	0,028	0,024	0,023	0,022	0,022	0,021
	H	13,838	15,187	14,381	13,681	15,088	15,237	15,251	15,168	15,149	15,152

Приведенные ниже иллюстрации (рис. 2) отображают области, занимаемые в признаковом пространстве различными классами поверхностей

Графики распределения углового момента второго порядка ASM



Графики распределения момента обратной разности IDF



Графики распределения энтропии H

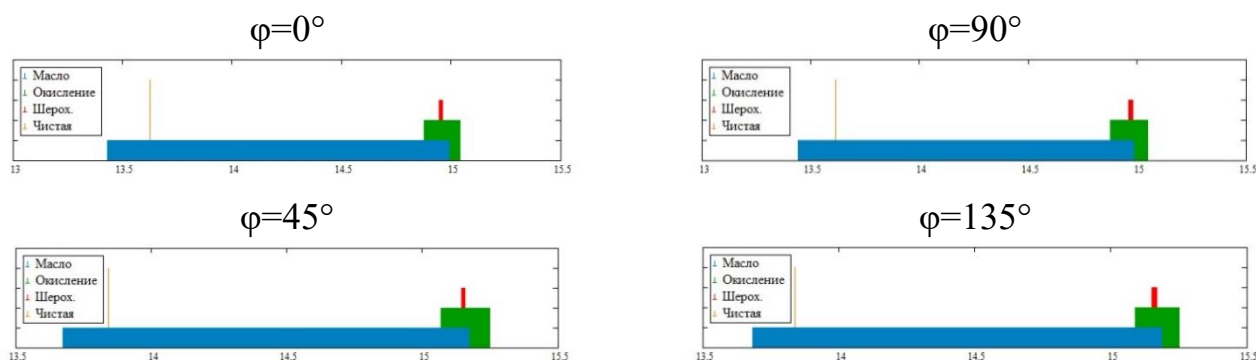


Рисунок 2 – Графики распределения признаков, основанных на статистиках второго порядка

Заключение

По результатам проведенных исследования можно сделать вывод о принципиальной возможности однозначного разделения чистой и маслянистых

исследуемых поверхностей, что невозможно было сделать на основе предыдущего набора признаков [1].

Библиографический список

1. Лебедев А.С., Добролюбов А.Н., Михайленко А.В., Безруков А.В. Поиск диагностических признаков для системы распознавания загрязнений контролируемых поверхностей изделий при оптико-электронном контроле // Труды МАИ. 2020. № 112. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=116578>. DOI: [10.34759/trd-2020-112-018](https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-018)
2. Денискин Ю.И., Дубровин А.В., Подколзин В.Г. Управление качеством процессов жизненного цикла инновационной продукции на основе компьютерной системы менеджмента качества // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=84603>
3. Шевцов С.Н., Сибирский В.В., Чигринец Е.Г. Применение нейронных сетей в прогнозировании качества механической обработки особо нагруженных композитных конструкций // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75572>
4. Geoff Vorley, Fred Tickle. Quality Management Principles & Practice, Section 9 – Computer Aided Quality, Quality Management & Training (Publications), Ltd, 5th edition, UK, 2002, 335 p.

5. Павлов П.В., Горюнов А.Е. Аппаратно-программный комплекс неразрушающего контроля авиационных деталей // Труды МАИ. 2015. № 80. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57019>
6. Halász L. Control Methods in Polymer Processing, Studies in Polymer Science, 2012, vol. 10, 486 p.
7. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. - М.: Изд-во стандартов, 1980. -12 с.
8. ГОСТ 23479-79. Контроль неразрушающий. Методы оптического вида. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 1980. - 13 с.
9. Чигринец Е.Г., Верченко А.В. CAD/CAM/CAE системы, OMW-технологии и нейросетевые алгоритмы анализа данных на предприятиях авиастроительной отрасли // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=102420>
10. Потапов А.С. Автоматический анализ изображений и распознавание образов. - М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2017. – 292 с.
11. Горелик А.Л., Скрипкин В.А. Методы распознавания. – М.: Высшая школа, 1984. - 208 с.
12. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. – М.: Мир, 1978. – 411 с.
13. Воробьев С. Н. Цифровая обработка сигналов. - М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 213 с.

14. Фомин Я.А. Распознавания образов: теория и применение. - М.: Фазис, 2014. – 670 с.
15. Мерков А.Б. Распознавание образов. Построение и обучение вероятностных моделей. - М.: Ленанд, 2014. – 240 с.
16. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. - М.: Изд-во Медиа. 2012. - 678 с.
17. Табарин Г.Т. Методы математической физики. - М.: Изд-во АСВ, 2009. - 208 с.
18. Мазуров Вл.Д. Математические методы распознавания образов. - Свердловск: Изд-во УрГУ, 2010. – 101 с.
19. Сутырин А.А. Аппаратура оперативного контроля чистоты поверхности изделий ракетно-космической техники // Труды МАИ. 2012. № 51. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29228>
20. ОСТ 92-1152-2014. Подготовка поверхности деталей под сварку и пайку и обработка сборочных единиц после сварки и пайки. Основные требования. - М.: Композит, 2014. - 35 с.
21. Михайленко А.В. Лебедев Е.Л., Лебедев А.С. Основы методики оценивания качества поверхностей стенок камер жидкостных ракетных двигателей по статистическим характеристикам параметров отраженного света // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т.10. № 2. С. 4 - 12. DOI: [10.24411/2409-5419-2018-10036](https://doi.org/10.24411/2409-5419-2018-10036)
22. Mitra Sanjit K. Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach, Mcgraw Hill, 1997, 864 p.

23. Лебедев А.С., Добролюбов А.Н., Лебедев Е.Л., Безруков А.В. Методика распознавания степени повреждений поверхностей материалов по параметрам акустико-эмиссионных сигналов // Современные наукоемкие технологии. 2017. № 2. С. 36 - 40.

Improving the information content of the system for detecting contamination of elements of rocket and space technology

Lebedev A.S.*, Dobrolyubov A.N., Bezrukov A.V., Yarigin D.M.

¹Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky,

13, Zhdanovskaya str., Saint Petersburg, 197198, Russia

²Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D.F. Ustinov,

1, 1-ya Krasnoarmeyskaya str., Saint Petersburg, 190005, Russia

**e mail: vka@mil.ru*

Abstract

The subject of the study is the methods of quality control of elements of rocket and space technology in production and operation. The aim of the work is to separate surfaces with various impurities (defects) due to an expanded dictionary of features based on second-order statistics (combination matrices).

The method of identification (recognition) of various damage to the surfaces of elements of rocket and space technology is considered.

The initial data for generating signs of damage discrimination is a two-dimensional array of intensities $I(n,m)$ of electromagnetic waves reflected from these surfaces in the optical range. The reflection of light from the studied surfaces is recorded by the digital camera's CCD-matrix when they are irradiated with a single-

mode laser module S-5 (Sanyo) of the visible (red) range with a continuous radiation power of 5 MW in the spectral range of 635 nm, which is the optimal source of coherent radiation for building control and automation systems, alignment and marking devices, as well as for scientific purposes.

The generation of a dictionary of surface recognition features is based on nonlinear transformations of the resulting images (textures). To do this, the two-dimensional array $I(n, m)$ is transformed into a second-order statistic – the spatial dependence matrix (the matrix of combinations) $P(I_m, I_n)$.

The description of class recognition in the language of newly generated features made it possible to eliminate areas of ambiguous solution when identifying surfaces that were present in the previously developed method based on the feature space (mathematical expectation, variance, skewness and kurtosis coefficients) formed on the basis of first-order statistics (histograms of the intensity distribution of reflected signals). Thus, it is possible to separate the contamination (damage) of the surface of the studied elements from each other, eliminating the previously existing uncertainty.

The proposed methodology can be used to form expert opinions that exclude the «human factor» when assessing the condition of the studied surfaces of rocket and space technology elements at various stages of their manufacture and operation (at the manufacturing plant – during production and in operating organizations during repair and maintenance work).

Keywords: quality control, class separation, pattern recognition, feature dictionary, intensity matrix, combination matrix, reflected signal intensity.

References

1. Lebedev A.S., Dobrolyubov A.N., Mihajlenko A.V., Bezrukov A.V. *Trudy MAI*, 2020, no. 112. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=116578>. DOI: [10.34759/trd-2020-112-018](https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-018)
2. Deniskin Yu.I., Dubrovin A.V., Podkolzin V.G. *Trudy MAI*, 2017, no. 95. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=84603>
3. Shevtsov S.N., Sibirskii V.V., Chigrinets E.G. *Trudy MAI*, 2016, no. 91. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=75572>
4. Geoff Vorley, Fred Tickle. *Quality Management Principles & Practice*, Section 9 – Computer Aided Quality, Quality Management & Training (Publications), Ltd, 5th edition, UK, 2002, 335 p.
5. Pavlov P.V., Goryunov A.E. *Trudy MAI*, 2015, no. 80. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=57019>

6. Halász L. *Control Methods in Polymer Processing*, Studies in Polymer Science, 2012, vol. 10, 486 p.
7. *GOST 18353-79. Kontrol' nerazrushayushchii. Klassifikatsiya vidov i metodov* (State Standard 18353-79. Non-destructive control. Classification of species and methods), Moscow, Izd-vo standartov, 1980, 12 p.
8. *GOST 23479-79. Kontrol' nerazrushayushchii. Metody opticheskogo vida. Obshchie trebovaniya* (State Standard 23479-79. Non-destructive control. Methods of the optical type. General requirements), Moscow, Izd-vo standartov, 1980, 13 p.
9. Chigrinets E.G., Verchenko A.V. *Trudy MAI*, 2019, no. 104. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=102420>
10. Potapov A.S. *Avtomaticheskii analiz izobrazhenii i raspoznavanie obrazov* (Automatic image analysis and pattern recognition), Moscow, LAP Lambert Academic Publishing, 2017, 292 p.
11. Gorelik A.L., Skripkin V.A. *Metody raspoznavaniya* (Methods of recognition), Moscow, Vysshaya shkola, 1984, 208 p.
12. Tu Dzh., Gonsales R. *Printsiipy raspoznavaniya obrazov* (Principles of pattern recognition), Moscow, Mir, 1978, 411 p.
13. Vorob'ev S.N. *Tsifrovaya obrabotka signalov* (Digital processing of signals), Moscow, Izdatel'skii tsentr "Akademiya", 2013, 213 p.

14. Fomin Ya.A. *Raspoznavaniya obrazov: teoriya i primenenie* (Pattern recognition: theory and application), Moscow, Fazis, 2014, 670 p.
15. Merkov A.B. *Raspoznavanie obrazov. Postroenie i obuchenie veroyatnostnykh modelei* (Pattern recognition. Building and training of probabilistic models), Moscow, Lenand, 2014, 240 p.
16. Tikhonov V.I. *Statisticheskaya radiotekhnika* (Statistical radio engineering), Moscow, Izd-vo Media, 2012, 678 p.
17. Tabarin G.T. *Metody matematicheskoi fiziki* (Methods of mathematical physics), Moscow, Izd-vo ACB, 2009, 208 p.
18. Mazurov V.D. *Matematicheskie metody raspoznavaniya obrazov* (Mathematical methods of pattern recognition), Sverdlovsk, Izd-vo UrGU, 2010, 101 p.
19. Sutyurin A.A. *Trudy MAI*, 2012, no. 51. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=29228>
20. *OST 92-1152-2014. Podgotovka poverkhnosti detalei pod svarku i paiku i obrabotka sborochnykh edinits posle svarki i paiki. Osnovnye trebovaniya* (Industry Standard T 92-1152-2014. of Parts surfaces preparation for welding and soldering, and assemblies processing after welding and soldering. Basic requirements), Moscow, Kompozit, 2014, 35 p.
21. Mikhaylenko A.V. Lebedev E.L., Lebedev A.S. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli*, 2018, vol. 10, no. 2, pp. 4 - 12.

22. Mitra Sanjit K. *Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach*, Mcgraw Hill, 1997, 864 p.

23. Lebedev A.S., Dobrolyubov A.N., Lebedev E.L., Bezrukov A.V. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2017, no. 2, pp. 36 - 40.