

**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**  
**RADIOELECTRONICS AND INSTRUMENT-MAKING**

УДК 004.932.72

Поступила в редакцию 04.05.2017  
Received 04.05.2017

**И. А. Борискевич, А. М. Толочко**

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Минск, Беларусь*

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНОГО  
КОВАРИАЦИОННОГО ДЕСКРИПТОРА МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ  
НА АЭРОИЗОБРАЖЕНИЯХ**

**Аннотация.** Дана оценка эффективности пространственно-частотного ковариационного дескриптора малоразмерных объектов на аэроизображениях в понятиях вычислительной сложности, объема используемой памяти, значений расстояния Римана между матрицами коэффициентов ковариации, **ROC- и DET-кривых, построенных для реальных видеопоследовательностей.** Предложен критерий выбора количества шагов QR-алгоритма для вычисления обобщенных собственных значений матриц коэффициентов ковариации, основанный на анализе гистограмм обобщенных собственных значений матриц коэффициентов ковариации, вероятности правильного обнаружения объекта на аэроизображении, влияния коэффициента масштабирования и угла вращения объекта на расстояние Римана. Дана оценка дискриминационной способности пространственно-частотного ковариационного дескриптора малоразмерных объектов с использованием характеристики **AUC ROC-кривой. Определены показатели выбора оптимального порогового значения для принятия решения об обнаружении объекта, основанные на индексе Йодена и уровне равной вероятности.** Анализ ROC- и DET-кривых, построенных для реальных видеопоследовательностей, позволил определить интервал значений порога для принятия решения об обнаружении объекта на аэроизображении, обеспечивающий высокую вероятность правильного обнаружения объекта при заданной вероятности его ложного обнаружения и оптимальное соотношение между вероятностью ошибки первого рода и вероятностью ошибки второго рода.

**Ключевые слова:** аэроизображение, пространственно-частотный ковариационный дескриптор, поиск малоразмерных объектов, интегральное изображение, обобщенные собственные значения, ошибки первого и второго рода

**Для цитирования.** Борискевич, И. А. Оценка эффективности пространственно-частотного ковариационного дескриптора малоразмерных объектов на аэроизображениях / И. А. Борискевич, А. М. Толочко // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 3. – С. 101–109.

**I. A. Baryskievic, A. M. Talochka**

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus*

**EFFICIENCY EVALUATION OF A SPATIAL-FREQUENCY COVARIANCE DESCRIPTOR  
OF SMALL OBJECTS ON AERIAL IMAGES**

**Abstract.** Efficiency estimation of a spatial-frequency covariance descriptor of small objects in aerial images is provided. It is based on analysis of computational complexity, storage capacity, Riemann distance values, ROC and DET curves for real video sequences. A criterion of QR-algorithm of choosing of number of steps to compute generalized eigenvalues of covariance matrices is proposed. It is based on analysis of generalized eigenvalues histograms, probability of object correct detection in an aerial image and influence of scale factor and rotation angle of object on Riemann distance value. An estimation of discrimination ability of the spatial-frequency covariance descriptor based on analysis of AUC of ROC-curve is given. A criterion to choose the optimal threshold of object detection based on the Youden's index and Equal Error Rate is defined. A range of threshold values to make decision of object detection based on the analysis of ROC- and DET-curves for real video sequences is determined. It provides a high probability of object correct detection at given probability of its false detection and optimal ratio between probabilities of type I errors and type II errors.

**Keywords:** aerial image, spatial-frequency covariance descriptor, search of small objects, integral image, generalized eigenvalues, false positives and false negatives

**For citation.** Baryskiev I. A., Talochka A. M. Efficiency evaluation of a spatial-frequency covariance descriptor of small objects on aerial images. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2017, no. 3, pp. 101–109 (in Russian).

**Введение.** В условиях интенсивного развития систем дистанционного видеомониторинга на базе беспилотных авиационных комплексов актуальной проблемой является разработка эффективных алгоритмов поиска объектов на кадрах видеопотока (аэроизображениях), передаваемого с борта легкого беспилотного летательного аппарата (БЛА). Основными ограничениями, которые накладываются на объект поиска, относящийся к классам транспортных средств (автобус, автомобиль, мотоцикл, велосипед и пр.), являются:

минимальный размер изображения объекта поиска равен  $3 \times 3$  пиксела, что обусловлено качеством аэроизображений с борта легкого БЛА и дискриминационной способностью дескриптора объекта;

динамический диапазон значений пикселей выделенного объекта должен быть не менее определенного количества уровней яркости, необходимого для установления связности пикселей в выделенной области;

скорость движения объекта не должна превышать скорость легкого БЛА;

максимальный размер объекта поиска ограничен производительностью вычислительной платформы и быстродействием алгоритма поиска.

Одним из эффективных подходов к решению проблемы поиска малоразмерных объектов на аэроизображениях является использование разработанного пространственно-частотного ковариационного дескриптора, основанного на вычислении коэффициентов ковариации между признаковыми матрицами объекта поиска, и функции вычисления расстояния Римана в качестве метрики сходства дескрипторов, что обеспечивает инвариантность к масштабированию, повороту и изменению формы объекта. Данный дескриптор позволяет эффективно описывать малоразмерные объекты на аэроизображениях, характеризующиеся малым количеством исходной визуальной информации, за счет расширения признакового пространства. По сравнению с существующими дескрипторами [1, 2] он обеспечивает оптимальный баланс между вероятностью правильного обнаружения малоразмерных объектов в различных условиях наблюдения и быстродействием их поиска [3, 4].

Вычисление пространственно-частотных ковариационных дескрипторов и их сравнение для поиска малоразмерного объекта на аэроизображениях осуществляется с помощью соотношений

$$C = \begin{bmatrix} c_{1,1} & \cdots & c_{1,D} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{D,1} & \cdots & c_{D,D} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\rho^2(C_E, C_k) = w \sum_{d=1}^D \log^2 \lambda_d(C_E, C_k), \quad (2)$$

где  $c_{i,j} = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (F_i(m,n) - \mu_i)(F_j(m,n) - \mu_j)$  –  $(i, j)$ -й коэффициент ковариации между двумя признаковыми матрицами объекта  $F_i$  и  $F_j$  (матрицы значений координат, яркости, первых и вторых частных производных пикселей по вертикали и горизонтали, поддиапазонов аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов одноуровневого прореженного и непрореженного лифтинга вейвлет-преобразования);  $F_{i(j)} = (F_{i(j)}(m,n))$  –  $i$ -е (или  $j$ -е) признаковое изображение размером  $M \times N$ ;  $\mu_i$  – среднее арифметическое значение элементов  $i$ -го признакового изображения;  $D$  – количество признаковых матриц объекта;  $\rho^2(C_E, C_k)$  – модифицированная функция вычисления расстояния Римана между матрицами определенного оператором объекта и  $k$ -го окна области его поиска  $C_k$ ;  $\lambda_d(C_E, C_k)$  –  $d$ -й компонент вектора обобщенных собственных значений

матриц  $C_E$  и  $C_k$  размером  $D \times D$ , вычисляемый с помощью соотношения  $C_k e = \lambda_d C_E e$ ;  $e$  – собственные векторы матриц  $C_k$  и  $C_E$ ;  $w$  – весовой коэффициент, учитывающий динамику движения объекта.

В качестве основных характеристик эффективности дескрипторов объектов на изображениях используется вычислительная сложность, объем памяти и дискриминационная способность. Для расширения области применения предложенного пространственно-частотного ковариационного дескриптора целесообразно произвести оценку эффективности данного дескриптора для различных условий наблюдения малоразмерных объектов с борта легкого БЛА.

**Оценка эффективности пространственно-частотного ковариационного дескриптора.** Специфика поиска малоразмерных объектов с борта легкого БЛА характеризуется ограниченными вычислительными ресурсами. В связи с этим для оценки вычислительной сложности и объема памяти разработанного дескриптора соответственно предложено использовать соотношения  $Complexity1 = (3D^2 + D) \cdot MN$  и  $Memory = Db(NM + D + 1)$ , где  $b$  – разрядность переменных. Из соотношений следует, что вычислительная сложность и объем памяти зависят от размеров матрицы  $C$  и признаковых матриц  $F$ , следовательно, данный дескриптор целесообразно использовать для малоразмерных объектов с учетом качества аэроизображений.

Для снижения вычислительной сложности разработанного дескриптора могут быть использованы следующие три способа, учитывающие свойства матрицы коэффициентов ковариации и степень перекрытия окон поиска объекта.

1. Использование симметрии матрицы коэффициентов ковариации относительно главной диагонали, что позволяет уменьшить количество арифметических операций. В этом случае вычислительная сложность разработанного дескриптора определяется с помощью соотношения  $Complexity2 = (3D^2 + 5D) / 2 \cdot MN$ .

Исключение операций вычисления средних арифметических значений элементов признаковых матриц при вычислении коэффициентов ковариации

$$c_{i,j} = \frac{1}{MN} \left( \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N F_i(m,n) F_j(m,n) - \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N F_i(m,n) \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N F_j(m,n) \right). \quad (3)$$

В этом случае вычислительная сложность разработанного дескриптора определяется с помощью соотношения  $Complexity3 = (D^2 + 3D) / 2 \cdot MN$ .

2. Использование свойства интегрального изображения [5] области поиска объекта. Поиск объекта требует многократного вычисления матриц коэффициентов ковариации для перекрывающихся фрагментов области поиска. Использование свойства интегрального изображения позволяет устранить избыточность в вычислениях, связанную с наличием области перекрытия между фрагментами области поиска (окон поиска). Для вычисления элемента матрицы коэффициентов ковариации на начальном этапе производится вычисление элементов трех интегральных изображений для области поиска размером  $U \times V$ :

$$Z = (Z(X, Y)), \quad S_i = (S_i(X, Y)), \quad S_j = (S_j(X, Y)), \quad (4)$$

где  $Z(X, Y) = \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y F_i(x, y) F_j(x, y)$  – элемент интегрального изображения, содержащий сумму поэлементных произведений признаковых матриц  $F_i$  и  $F_j$  в области  $[1 \dots X; 1 \dots Y]$ ;  $S_i(X, Y) = \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y F_i(x, y)$  – элемент интегрального изображения  $S_i$ , содержащий сумму элементов  $i$ -го признакового изображения в области  $[1 \dots X; 1 \dots Y]$ ;  $S_j(X, Y) = \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y F_j(x, y)$ , – элемент интегрального изображения  $S_j$ , содержащий сумму элементов  $j$ -го признакового изображения в области  $[1 \dots X; 1 \dots Y]$ ;  $X = \overline{N, U}$  и  $Y = \overline{M, V}$  – горизонтальный и вертикальный размеры фрагментов признаковых матриц для вычисления одного элемента интегрального изображения.

Коэффициенты ковариации для окна поиска размером  $M \times N$  с координатами нижнего правого угла  $(x, y)$  на области поиска на основе понятия интегрального изображения вычисляются с помощью соотношения

$$c_{i,j} = \frac{1}{MN} \left( \hat{Z}(x,y) - \frac{1}{MN} \hat{S}_i(x,y) \hat{S}_j(x,y) \right), \tag{5}$$

где  $\hat{Z}(x,y) = Z(x,y) + Z(x-N,y-M) - Z(x-N,y) - Z(x,y-M)$ ;  $\hat{S}_i(x,y) = S_i(x,y) + S_i(x-N,y-M) - S_i(x-N,y) - S_i(x,y-M)$ ;  $\hat{S}_j(x,y) = S_j(x,y) + S_j(x-N,y-M) - S_j(x-N,y) - S_j(x,y-M)$ .

Интегральное изображение области поиска может быть рассчитано за  $2UV$  арифметических операций. С учетом шага  $K$  между окнами поиска в пределах области поиска, свойства симметрии и соотношения (3), вычислительная сложность разработанного дескриптора на основе интегрального изображения определяется с помощью соотношения

$$Complexity_4 = \frac{2DUV + 3UV(D^2 + D)/2}{\lfloor (U-M)/K + 1 \rfloor \lfloor (V-N)/K + 1 \rfloor} + 15(D^2 + D)/2 + 11D, \tag{6}$$

где  $\lfloor \cdot \rfloor$  – операция округления до ближайшего меньшего целого числа.

Недостатком использования интегрального изображения является необходимость выделения дополнительной памяти, определяемой с помощью соотношения

$$UVb(D^2 + 3D)/2. \tag{7}$$

На рис. 1 представлена зависимость количества арифметических операций от количества окон поиска в пределах области поиска ( $D = 4, M \times N = 30 \times 30, K = 10$ ) для стандартного способа расчета матрицы коэффициентов ковариации (*Complexity1*) и трех способов со сниженной вычислительной сложностью (*Complexity2, Complexity3, Complexity4*).

Из рис. 1 следует, что выигрыш от использования способа снижения вычислительной сложности разработанного дескриптора на основе интегрального изображения составляет порядка 5,8 раза при количестве признаков матриц  $D = 4$ , размере окна поиска  $M \times N = 30 \times 30$ , сдвиге между окнами поиска  $K = 10$  и количестве окон поиска более 25.

Для вычисления обобщенных собственных значений  $\lambda$  используется QR-алгоритм, вычислительная сложность которого равна  $O(n^3)$  FLOPS [6]. При приведении матрицы  $C$  к форме Хессенберга сложность одного шага QR-алгоритма сводится к  $O(n^2)$  FLOPS [6].

Для оценки количества шагов QR-алгоритма предложено использовать гистограммы обобщенных собственных значений матриц коэффициентов ковариации, вероятность правильного обнаружения объекта и влияние коэффициента масштабирования и угла вращения объекта на расстояние Римана.

На рис. 2 представлены ненормированные гистограммы обобщенных собственных значений матриц коэффициентов ковариации для фрагментов аэроизображений, содержащих и не содер-

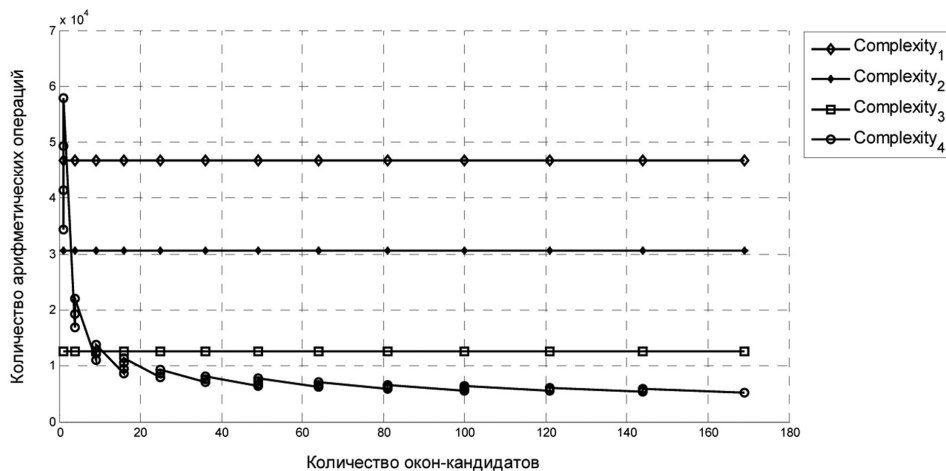


Рис. 1. Зависимость количества арифметических операций от количества окон поиска на аэроизображении для различных способов вычисления матрицы коэффициентов ковариации

Fig. 1. Dependence of arithmetic operations number on number of search windows in aerial images for different methods of covariance matrix calculating

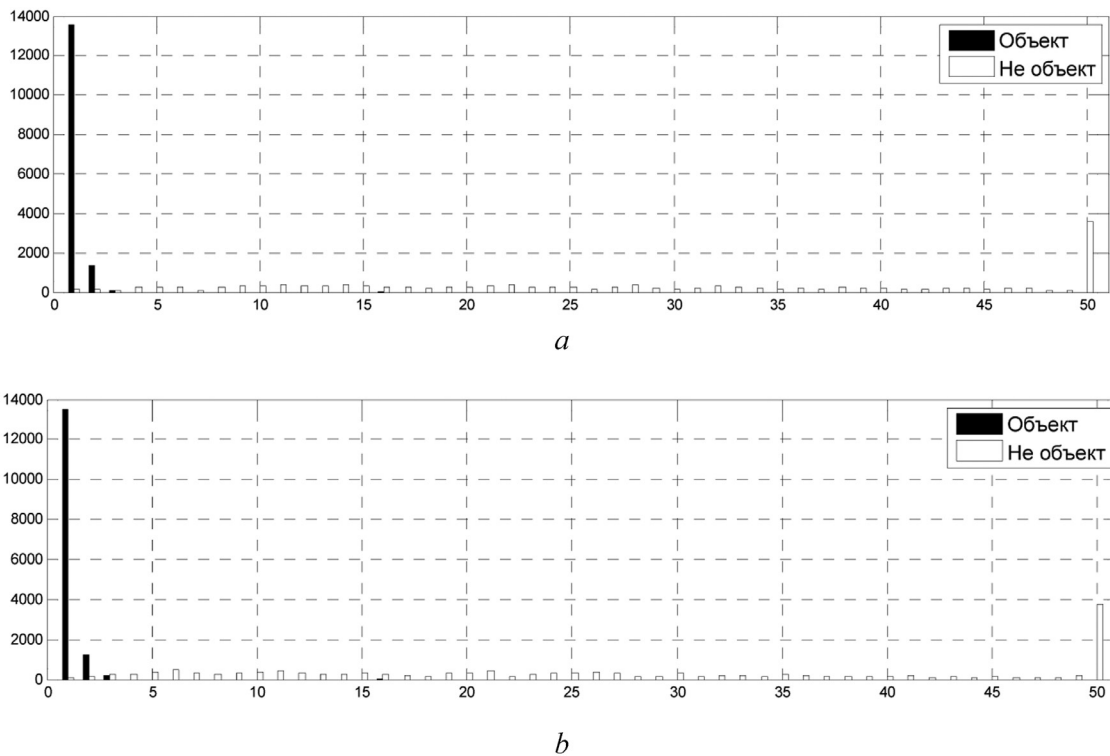


Рис. 2. Ненормированные гистограммы обобщенных собственных значений матриц коэффициентов ковариации для фрагментов аэроизображений, содержащих и не содержащих объект поиска, для различного числа шагов QR-алгоритма: *a* – один шаг QR-алгоритма, *b* – десять шагов QR-алгоритма

Fig. 2. Non-normalized histograms of generalized eigenvalues of covariance matrices for fragments of aerial images containing and not containing the search object for different number of QR algorithm steps: *a* – one step of QR algorithm, *b* – ten steps of QR algorithm

жащих объект поиска для одного и десяти шагов QR-алгоритма в случае использования четырех матриц изображений ( $D = 4$ ).

На рис. 3 показаны вероятности правильного обнаружения объекта для десяти реальных видеопоследовательностей, полученных с борта БЛА, для одного, пяти и десяти шагов QR-алгоритма.

В таблице отражена оценка средноквадратического отклонения расстояния Римана для различного числа шагов QR-алгоритма.

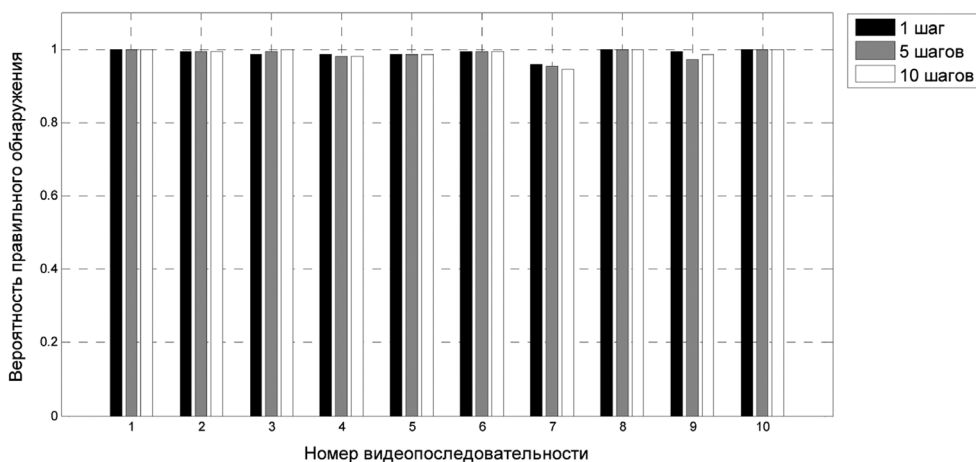


Рис. 3. Вероятности правильного обнаружения объекта для десяти видеопоследовательностей для различного числа шагов QR-алгоритма

Fig. 3. Probabilities of object correct detection for ten video sequences for different number of QR algorithm steps

**Среднеквадратическое отклонение расстояния Римана для различного числа шагов QR-алгоритма**  
**Standard deviation of Riemann distance for different number of QR algorithm steps**

Условие наблюдения объекта Condition of object observation	1 шаг QR-алгоритма 1 step of QR-algorithm	10 шагов QR-алгоритма 10 steps of QR-algorithm
Масштабирование Scaling	0,48	0,47
Вращение Rotation	1,35	1,33

Из рис. 2 и 3 и таблицы следует, что увеличение количества шагов QR-алгоритма не оказывает значительного влияния на обобщенные собственные значения матриц коэффициентов ковариации, вероятность правильного обнаружения объекта и среднее значение расстояния Римана. Поэтому для эффективной работы алгоритмов поиска малоразмерных объектов на основе пространственно-частотного ковариационного дескриптора достаточно одного шага QR-алгоритма с преобразованием Хаусхолдера.

Для оценки дискриминационной способности пространственно-частотного ковариационного дескриптора предложено использовать ROC-кривую (Receiver Operating Characteristic, рабочая характеристика приемника) [7], позволяющую осуществить выбор оптимального порогового значения  $\rho_{Th}^2$ , обеспечивающего максимальную вероятность правильного обнаружения объекта  $\max_l (TPR_l = 1 - FRR_l)$  при требуемой вероятности его ложного обнаружения  $FAR_l = \alpha$ ,  $0 \leq \alpha \leq 1$ .

Вычисление операционных характеристик чувствительности  $S_{el} = TPR_l$  и специфичности  $S_{pl} = 1 - FPR_l$  ROC-кривой ( $x = 1 - S_{pl}$ ,  $y = S_{el}$ ) для выбранного  $l$ -го значения порога (или  $\rho_{Th}^2$ ) осуществляется с помощью соотношений

$$S_{el} = TPR_l = (1 - FRR) = \frac{TP_l}{TP_l + FN_l}, \quad (8)$$

$$S_{pl} = (1 - FPR_l) = \frac{TN_l}{TN_l + FP_l}, \quad (9)$$

где  $TPR_l$  (True Positives Rate, вероятность правильного обнаружения) и  $FPR_l = (1 - S_{pl})$  (False Positives Rate, вероятность правильного необнаружения) – доли истинно положительных событий (вероятность правильного обнаружения объекта) и ложно положительных событий (вероятность ложного обнаружения объекта) для  $l$ -го значения порога соответственно.

Для выбора порогового значения целесообразно использовать ROC- и DET-кривые (Detection Error Trade-off). Индекс Йодена [8], позволяющий определить оптимальную операционную точку на ROC-кривой, которая имеет наибольшее значение чувствительности  $S_{el}$  при наименьшем значении доли ложно положительных событий  $FPR_l = (1 - S_{pl})$ , определяется с помощью соотношения

$$J_l = \max_l (S_{el} - (1 - S_{pl})). \quad (10)$$

Индекс Йодена равен максимальному вертикальному расстоянию от ROC-кривой до линии случайного обнаружения объекта (рис. 4) и соответствует точке на ROC-кривой, которая характеризуется ми-

нимальным расстоянием  $d_l = \sqrt{(1 - S_{el})^2 + (1 - S_{pl})^2}$ .

Дополнительным условием выбора порогового значения является оценка уровня равной вероятности

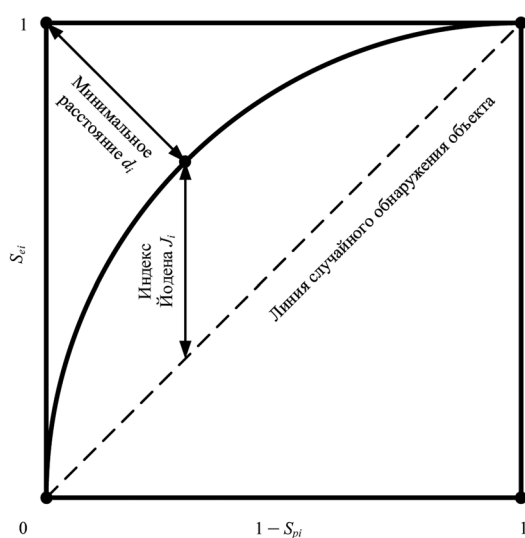


Рис. 4. Геометрическая интерпретация вычисления индекса Йодена на ROC-кривой

Fig. 4. Geometric interpretation of Youden's index calculation in the ROC curve

сти  $EER$  (Equal Error Rate), определяемого точкой на DET-кривой, в которой равны вероятности ошибок первого рода  $FRR$  (False Rejection Rate) и второго рода  $FAR$  (False Acceptance Rate). В этом случае пороговое значение для принятия решения об обнаружении объекта определяется с помощью соотношения

$$\rho^2 = \arg \min_{\rho^2} |FAR(\rho^2) - FRR(\rho^2)|. \quad (11)$$

Для оценки дискриминационной способности разработанного дескриптора на рис. 5, *a* представлены ненормированные гистограммы  $H = \{n_i | i = 0, 11\}$ , где  $n_i$  – количество аэроизображений с  $i$ -м значением расстояния Римана  $\rho^2$ , для аэроизображений с объектом и без объекта и ROC- и DET-кривые для реальных видеопоследовательностей (5000 кадров).

Из рис. 5, *b* следует, что для ROC-кривой разработанного дескриптора индекс Йодена  $J_i = 0,9$ . В этом случае оптимальной операционной точке на ROC-кривой соответствует пороговое значение для принятия решения об обнаружении объекта  $\rho_{Th}^2 = 5$ , обеспечивающее вероятность правильного обнаружения объекта 0,99 при вероятности его ложного обнаружения 0,09.

Из рис. 5, *c* следует, что для разработанного дескриптора пороговое значение для принятия решения об обнаружении объекта  $\rho^2 = 4$ , обеспечивающее минимизацию как вероятности ошибки первого рода (0,08), так и вероятность ошибки второго рода (0,04). Интервал для выбора порогового значения приведен в [4, 5].

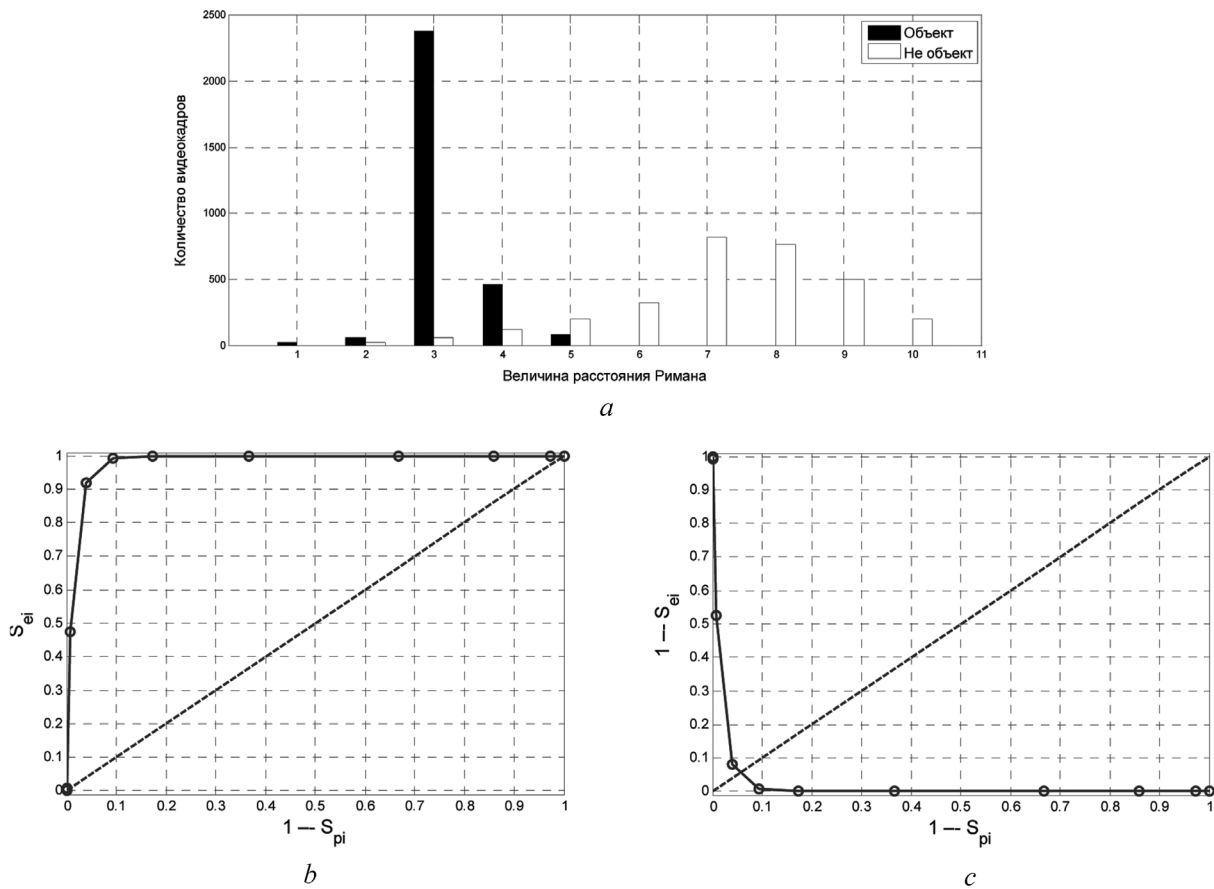


Рис. 5. Оценка дискриминационной способности разработанного дескриптора: *a* – ненормированные гистограммы расстояния Римана для аэроизображений с объектом и без объекта поиска, *b* – ROC-кривая, *c* – DET-кривая

Fig. 5. Estimation of discrimination ability for the developed descriptor: *a* – non-normalized histograms of Riemann distance for aerial images with and without the search object, *b* – ROC curve, *c* – DET curve

Интегральная оценка дискриминационной способности разработанного дескриптора осуществляется с помощью характеристики  $AUC$ , вычисляемой с помощью соотношения

$$AUC = \frac{1}{2} \sum_i (y_{i+1} + y_i)(x_{i+1} - x_i), \quad (12)$$

где  $y_i$  и  $x_i$  – доли верно ( $TPR_i$ ) и неверно ( $FPR_i$ ) обнаруженных объектов для  $i$ -го значения порога.

Для реальных видеопоследовательностей (5000 кадров) определено, что для разработанного дескриптора  $AUC = 0,98$ . В соответствии с экспертной 5-уровневой шкалой качественной оценки значений  $AUC$  [9] разработанный дескриптор обладает дискриминационной способностью, соответствующей уровню «высокий».

**Заключение.** Дана оценка эффективности пространственно-частотного ковариационного дескриптора для алгоритмов поиска малоразмерных объектов на аэроизображениях, основанная на оценке его вычислительной сложности и объема используемой памяти, анализе ROC- и DET-кривых. Определено, что выигрыш от использования способа снижения вычислительной сложности алгоритма формирования матрицы коэффициентов ковариации на основе интегрального изображения составляет порядка 5,8 раза при количестве признаков матриц  $D = 4$ , размере окна поиска  $M \times N = 30 \times 30$ , шаге между окнами поиска  $K = 10$  и количестве окон поиска более 25. Предложен критерий оценки количества шагов QR-алгоритма на основе оценки изменения среднего значения расстояния Римана по выборке кадров для различного количества шагов QR-алгоритма. Установлено, что достаточно одного шага QR-алгоритма с преобразованием Хаусхолдера. Для пространственно-частотного ковариационного дескриптора характеристика  $AUC$  ROC-кривой равна 0,98, что свидетельствует о его высокой дискриминационной способности. Определены критерии выбора оптимального значения порога для принятия решения об обнаружении объекта. На основе анализа ROC- и DET-кривых определены интервал значений порога для принятия решения об обнаружении объекта, обеспечивающий высокую вероятность правильного обнаружения объекта 0,99 при вероятности его ложного обнаружения 0,09, и оптимальное соотношение между вероятностью ошибки первого рода (0,08) и вероятностью ошибки второго рода (0,04).

### Список использованных источников

1. Single and multiple object tracking using Log-Euclidean Riemannian subspace and block-division appearance model / W. Hu [et al.] // *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 2012. – Vol. 34, N 12. – P. 2420–2440.
2. Yang, C. Efficient Mean-Shift tracking via a new similarity measure / C. Yang, R. Duraiswami, L. Davis // *IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – 2005. – P. 176–183.
3. Борискевич, И. А. Пространственно-частотный ковариационный поиск малоразмерных целей на основе непрореженного дискретного лифтинг вейвлет-преобразования Хаара / И. А. Борискевич, В. Ю. Цветков // *Докл. Нац. акад. наук Беларуси*. – 2014. – Т. 58, № 3. – С. 16–21.
4. Борискевич, И. А. Стабилизация видеопоследовательности с борта легкого БЛА на основе ковариационного поиска реперов и предсказания / И. А. Борискевич, В. Ю. Цветков // *Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук*. – 2015. – № 1. – С. 106–111.
5. Integral images: Efficient algorithms for their computation and storage in resource-constrained embedded vision systems / S. Ehsan [et al.] // *Sensors*. – 2015. – Vol. 15, N 7. – P. 16804–16830.
6. Golub, G. H. *Matrix Computations* / G. H. Golub, C. F. Van Loan. – London: The Johns Hopkins Univ. Press, 1996. – 694 p.
7. Fawcett, T. An introduction to ROC analysis // *Pattern Recognition Lett.* – 2006. – Vol. 27, N 8. – P. 861–874.
8. Optimal cut-point and its corresponding Youden index to discriminate individuals using pooled blood samples / E. Schisterman [et al.] // *Epidemiology*. – 2005. – Vol. 16, N 1. – P. 73–81.
9. Šimundić A.-M. Measures of diagnostic accuracy: basic definitions / A. Simundic // *Med. Biol. Sci.* – 2008. – Vol. 22. – P. 61–65.

### References

1. Hu W., Li X., Luo W., Zhang X., Maybank S., Zhang Z. Single and multiple object tracking using Log-Euclidean Riemannian subspace and block-division appearance model. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, vol. 34, no. 12, pp. 2420–2440. Doi: 10.1109/TPAMI.2012.42
2. Yang C., Duraiswami R., Davis L. Efficient Mean-Shift tracking via a new similarity measure. *IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2005, pp. 176–183. Doi: 10.1109/cvpr.2005.139



3. Baryskievic I., Tsvetkov V. Yu. Spatial-frequency covariance search for low-sized targets based on undecimated Haar lifting wavelet transform. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2014, vol. 58, no. 3, pp. 16–21 (in Russian).
4. Baryskievic I., Tsvetkov V. Yu. Stabilization of video sequence from board of a small UAV based on covariance search of reference points with prediction. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2015, no. 1, pp. 106–111 (in Russian).
5. Ehsan S., Clark A. F., Rehman N. U., McDonald-Maier K. D. Integral images: Efficient algorithms for their computation and storage in resource-constrained embedded vision systems. *Sensors*, 2015, vol. 15, no. 7, pp. 16804–16830. Doi: 10.3390/s150716804
6. Golub G. H., Van Loan C. F. *Matrix Computations*. London, Johns Hopkins University Press, 1996. 694 p.
7. Fawcett T. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 2006, vol. 27, no. 8, pp. 861–874. Doi: 10.1016/j.patrec.2005.10.010
8. Schisterman E. F., Perkins N. J., Liu A., Bondell H. Optimal cut-point and its corresponding Youden index to discriminate individuals using pooled blood samples. *Epidemiology*, 2005, vol. 16, no. 1, pp. 73–81. Doi: 10.1097/01.ede.0000147512.81966.ba
9. Šimundić A.-M. Measures of diagnostic accuracy: basic definitions. *Medical and Biological Sciences*, 2008, vol. 22, pp. 61–65.

### Информация об авторах

*Борискевич Илья Анатольевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры сетей и устройств телекоммуникаций? Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ilja.baryskievic@gmail.com

*Толочко Александр Михайлович* – магистр технических наук, ведущий инженер-программист, ООО «КомпЛИТех» (ул. Филимонова 25Г-503, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Aljaksandr@gmail.com

### Information about the authors

*Ilja A. Baryskievic* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor of Telecommunication Networks and Devices Chair, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ilja.baryskievic@gmail.com.

*Aliaksandr M. Talochka* – Master of Engineering, lead software engineer, LLC “ComplITech” (25G-503, Filimonov Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Aljaksandr@gmail.com