

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

УДК 004.932.72

И. А. БОРИСКЕВИЧ, В. Ю. ЦВЕТКОВ

**СТАБИЛИЗАЦИЯ ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ
С БОРТА ЛЕГКОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА
НА ОСНОВЕ КОВАРИАЦИОННОГО ПОИСКА РЕПЕРОВ И ПРЕДСКАЗАНИЯ***Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники**(Поступила в редакцию 19.12.2014)*

Введение. При сопровождении наземных целей с борта легкого беспилотного летательного аппарата (БЛА) актуальной задачей является оптическая компенсация смещения главной оптической оси видеокамеры. Вычисленные по реперам на соседних кадрах разностные углы ориентации могут быть использованы для уточнения данных телеметрии и повышения точности позиционирования БЛА. Для стабилизации видеокадров широко используются методы градиентной параметризации и идентификации реперов, такие как SIFT [1] и SURF [2]. Однако в случае обработки видеопоследовательности с борта легкого БЛА они не эффективны из-за высокой чувствительности градиентного дескриптора к шуму и изменению контрастно-яркостных характеристик видеокадров. Кроме того, данные методы обладают высокой вычислительной сложностью и не могут быть применены для обработки видеопоследовательности в реальном масштабе времени. Перспективным направлением является использование дескриптора на основе ковариационных вейвлет-признаков [3], обладающего меньшей чувствительностью к изменению контрастно-яркостных характеристик изображения и лучшим отношением сигнал/шум за счет концентрации энергии в ограниченном количестве вейвлет-коэффициентов. Кроме того, вейвлет-дескриптор учитывает как яркостные, так и текстурные свойства признаков (реперных) областей на соседних кадрах. Эти свойства обеспечивают эффективность вейвлет-дескриптора для обработки видеопотока не только с цифровой, но и с аналоговой видеокамер. Быстродействие идентификации реперных областей может быть увеличено за счет предсказания их местоположения.

Цель настоящей статьи – разработка метода стабилизации соседних видеокадров на основе ковариационных вейвлет-признаков и предсказания.

Ковариационные вейвлет-признаки. Для повышения устойчивости стабилизации видеокадров к зашумлению и изменению контрастно-яркостных характеристик видеопоследовательности предлагается применение ковариационных вейвлет-признаков. При использовании ковариационной матрицы в качестве дескриптора реперных областей обеспечивается объединение различных признаков без их нормирования или использования весовых коэффициентов; инвариантность к масштабированию и изменению среднего; пространственно-частотная локализация цели.

Ковариационный поиск реперов основан на вычислении ковариационных матриц реперной области на опорном видеокадре и реперных областей-кандидатов на следующем видеокадре [4]. Элементы ковариационной матрицы признаков $C_I = \|c_I(i, j)\|_{i, j=1, \overline{D}}$ изображения I вычисляются с помощью выражения

$$c_I(i, j) = \frac{1}{XY} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (f(x, y, i) - \mu(i))(f(x, y, j) - \mu(j)), \quad (1)$$

где $f(x, y, d) = \left(M(x) \quad M(y) \quad I(x, y) \quad |I_x(x, y)| \quad |I_y(x, y)| \quad |I_{xx}(x, y)| \quad |I_{yy}(x, y)| \right)$ – элемент признакового образа $F_I = \|f(x, y, d)\|_{x=1, \overline{X}, y=1, \overline{Y}, d=1, \overline{D}}$; $\mu(d)$ – покомпонентное среднее арифметиче-

ское элементов признакового образа; X, Y – количество пикселей изображения по горизонтали и вертикали; D – число признаковых изображений в признаковом образе F_j ; $M(x), M(y)$ – координатные матрицы, определяющие веса окон-кандидатов вблизи позиции цели на предыдущем кадре; $I_X(x, y), I_Y(x, y), I_{XX}(x, y), I_{YY}(x, y)$ – первые и вторые производные по вертикали и горизонтали от интенсивности пикселей изображения I .

Определение соответствия между реперными областями производится с помощью инвариантной римановой метрики в результате сравнения ковариационных матриц $C_E, C_I \in \text{Sym}_d^+$ (Sym_d^+ – связанное риманово многообразие, являющееся локально-евклидовым топологическим пространством):

$$\rho_I^2(C_E, C_I) = \sum_{i=1}^n \log^2 \lambda_i(C_E, C_I) = \text{tr}[\log^2(C_E^{-1/2} C_I C_E^{-1/2})], \quad (2)$$

где $\lambda_i(C_E, C_I)_{i=1\dots n}$ – i -е обобщенное собственное значение ковариационных матриц C_E и C_I , вычисленное из $(\lambda_i C_E x_E - C_I x_I = 0)_{i=1\dots d}$; $x_i \neq 0$ – обобщенные собственные векторы; $\text{tr}[A]$ – след матрицы A , представляющий собой сумму элементов главной диагонали матрицы $\text{tr}[A] = \sum_i a_{i,i}$.

Для формирования ковариационных дескрипторов особый интерес представляет дискретное лифтинг вейвлет-преобразование Хаара [5], достоинствами которого являются низкая вычислительная сложность и лучшее сохранение яркостных перепадов за счет формирования каждого вейвлет-коэффициента первого уровня разложения на основе только двух дискретов сигнала. Использование непрореженного дискретного лифтинг вейвлет-преобразования Хаара (UHLWT – undecimated Haar lifting wavelet transform) позволяет повысить точность локализации малоразмерных целей до 6,3 раз [3] по сравнению с прореженным дискретным лифтинг вейвлет-преобразованием Хаара (HLWT – Haar lifting wavelet transform). Однако дескриптор на основе HLWT характеризуется лучшим быстродействием, что обусловлено уменьшением размера признаковых изображений в 4 раза.

Постепенное уточнение смещения реперных областей. Ограничением на практическое применение ковариационных признаков для стабилизации видеокadres в реальном масштабе времени является высокая вычислительная сложность, связанная с размером ковариационной матрицы и признаковых образов. Один из способов повышения быстродействия заключается в уменьшении количества областей-кандидатов, для каждой из которых требуется вычисление ковариационной матрицы. Без ущерба для качества сопровождения это возможно за счет предсказания и минимизации размера области поиска на следующем видеокadre.

Количество реперов, соответствие между которыми требуется установить на опорном и следующем кадрах, определяется параметрами видеосъемки и требуемой точностью стабилизации. Для проективного преобразования, которое обладает максимально возможным числом степеней свободы, достаточно $R = 4$ реперам, что обеспечивает вычисление 8 коэффициентов матрицы гомографии:

$$H = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где h_i – коэффициент матрицы гомографии.

Однако приблизительная оценка пиксельных смещений следующего видеокadre относительно опорного возможна уже при установлении соответствия для одной реперной области ($r = 1$). Полученные значения пиксельных смещений $(\Delta x_1, \Delta y_1)$ позволяют найти координаты центрального пикселя области поиска на следующем видеокadre и уменьшить ее размер. Установление каждого последующего реперного соответствия увеличивает точность оценки смещения (рис. 1).

Таким образом, идея постепенного уточнения заключается в уменьшении количества областей-кандидатов и соответственно увеличении скорости стабилизации видеокadres за счет

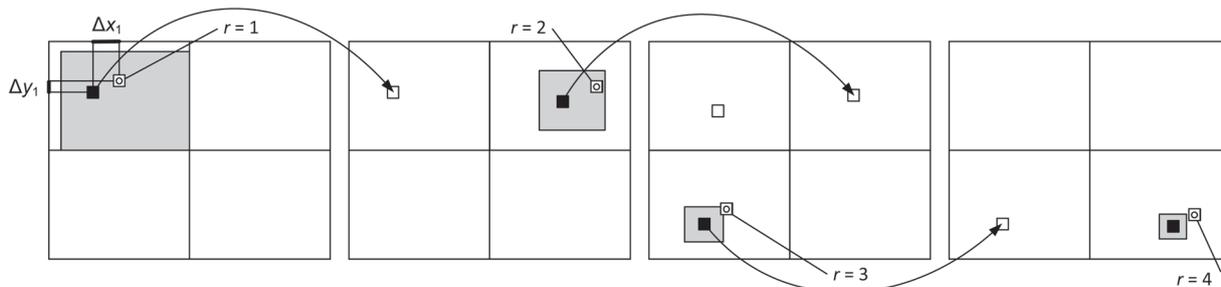


Рис. 1. Постепенное уточнение смещения реперных областей

предсказания позиции и размера области поиска текущего репера на следующем видеокадре на основании найденных соответствий для предыдущих реперов.

Метод ковариационной стабилизации соседних видеокадров с предсказанием. Предлагается метод ковариационной стабилизации соседних видеокадров с предсказанием, основанный на ковариационных вейвлет-признаках и постепенном уточнении местоположения реперов в процессе их идентификации. Предложенный метод по сравнению с известным методом на основе SURF [2] позволяет уменьшить время параметризации и идентификации реперов за счет использования более компактного представления пространственно-частотных свойств реперных областей и постепенного предсказания их местоположения.

Алгоритм ковариационной стабилизации соседних видеокадров с предсказанием включает следующие шаги:

1. Инициализация начальных параметров алгоритма.

1.1. Задание параметров стабилизации. Производится выбор числа реперных областей R и размера области поиска $S_{r=1} = f(L, P)$ для первого репера, где L – количество признаков окон, P – размер области перекрытия между ними.

1.2. Инициализация счетчиков кадров. Устанавливаются начальные значения счетчиков кадров видеопоследовательности $t = 1$.

2. Начало цикла обработки кадров видеопоследовательности. Переход к обработке очередного кадра видеопоследовательности. Значение счетчика кадров видеопоследовательности увеличивается на единицу: $t = t + 1$.

2.1. Формирование реперных областей $E(t) = \|E_r\|_{r=1, R}$ опорного видеокадра. Производится считывание кадра $I(t) = \|i(t, x, y)\|_{(x=1, X, y=1, Y)}$ размером $X \times Y$ видеопоследовательности $I = \|I(t)\|_{t=1, T}$, где $t = 1, T$ и T – номер и число кадров в видеопоследовательности соответственно. Выбирается R прямоугольных реперных областей размером $M \times N$ по одной на каждой из четырех четвертей опорного кадра видеопоследовательности. Между крайними пикселями реперных областей и границей видеокадра задается защитный интервал, равный удвоенному среднему сдвигу между видеокадрами. Устойчивую работу метода стабилизации обеспечивает выбор в качестве реперов контрастных объектов с замкнутыми контурами.

2.2. Формирование ковариационных матриц реперных областей опорного видеокадра. Для реперных областей $E(t) = \|E_r\|_{r=1, R}$ опорного видеокадра вычисляются ковариационные матрицы $C(t) = \|C_{r, E}\|_{r=1, R}$.

2.3. Считывание следующего видеокадра $I(t+1) = \|i(t, x, y)\|_{(x=1, X, y=1, Y)}$ размером $X \times Y$.

3. Начало цикла обработки реперных областей на следующем кадре.

3.1. Инициализация счетчика реперных областей: $r = 0$.

3.2. Начало цикла обработки областей-кандидатов.

3.2.1. Инициализация счетчика областей-кандидатов: $l = 0$.

3.2.2. Вычисление элементов пространственно-частотной ковариационной матрицы $C_{r, l} = \|c_{r, l}(i, j)\|_{i, j=1, D}$ для l -й области-кандидата r -й реперной области

$$c_{r,l}(i, j) = \frac{1}{XY} (F(i) - \mu(i))(F(j) - \mu(j)), \quad (4)$$

где $F = \|LL(x, y) \ HL(x, y) \ LH(x, y) \ HH(x, y)\|_{x=\overline{1, X}, y=\overline{1, Y}}$ – признаковый образ, состоящий из аппроксимирующих и детализирующих вертикальных, горизонтальных и диагональных коэффициентов дискретного лифтинг вейвлет-преобразования Хаара.

3.2.3. Вычисление весовой метрики сходства $\rho_{r,l}^2(C_{r,E}, C_{r,l})$ ковариационных матриц l -й области-кандидата $C_{r,l}$ и r -й реперной области $C_{r,E}$.

3.2.4. Значение счетчика областей-кандидатов увеличивается на единицу: $l = l + 1$.

3.2.5. Проверка условия окончания цикла обработки областей-кандидатов. Если $l < L$, то осуществляется переход на шаг 3.2.2, иначе – выход из цикла обработки областей-кандидатов.

3.3. Выбор лучшей области-кандидата для r -й реперной области. Номер лучшей области-кандидата $W_r \in [1, L]$ вычисляется с помощью выражения

$$W_r = \arg \max_{l \in \{1, L\}} (\rho_l^2(C_{r,E}, C_{r,l})), \quad (5)$$

где $\arg \max_x (f(x))$ – функция максимизации, вычисляющая аргумент, соответствующий максимальному значению функции.

3.4. Предсказание местоположения реперов.

3.4.1. Предсказание местоположения. Координаты $(\hat{x}_{r+1}, \hat{y}_{r+1})$ центрального пикселя области поиска $(r + 1)$ -го репера определяются с помощью выражения

$$(\hat{x}_{r+1}, \hat{y}_{r+1}) = f_p \left(\|W_g\|_{g=\overline{1, r}} \right). \quad (6)$$

Здесь f_p – функция определения координат центрального пикселя области поиска репера; $\|W_g\|_{g=\overline{1, r}}$ – найденные координаты реперных областей. Определение координат основано на предсказании смещений (рис. 1).

3.4.2. Предсказание области поиска. Размер S_{r+1} области поиска репера по горизонтали и вертикали вычисляется с помощью выражения

$$S_{r+1} = f_s(S_{r=1}, r) \quad (7)$$

(f_s – функция определения размера области поиска репера).

3.5. Значение счетчика реперных областей увеличивается на единицу: $r = r + 1$.

4. Проверка условия окончания цикла обработки кадров видеопоследовательности. Если обработка кадров не завершена ($t < T$), осуществляется переход на шаг 2, иначе – выход из алгоритма.

В результате выполнения данного алгоритма для каждого кадра видеопоследовательности определяются координаты реперных областей $W = \|W_r\|_{r=\overline{1, R}}$, устанавливающих соответствие через матрицу гомографии между опорным и следующим видеокадрами.

Оценка эффективности стабилизации видеоданных. Для оценки эффективности метода стабилизации с предсказанием использованы тестовые кадры видеопоследовательностей двух классов с разным количеством яркостных перепадов. Примеры кадров видеопоследовательностей, их яркостные и разностные гистограммы представлены на рис. 2.

Для оценки эффективности стабилизации в условиях зашумления кадров использовался аддитивный гауссовый шум с нулевым средним и дисперсией σ_n^2 . Установлено, что по сравнению с известным методом на основе SURF использование предложенного метода позволяет повысить устойчивость в случае сильного зашумления до 3,5 раз для видеокадров высококонтрастного класса и до 16 раз для видеокадров низкоконтрастного класса (рис. 3).

Для оценки эффективности стабилизации в условиях изменения контрастно-яркостных характеристик видеопоследовательности проводилось коррекция интенсивности пикселей в заданном диапазоне. Установлено, что по сравнению с известным методом на основе SURF использо-

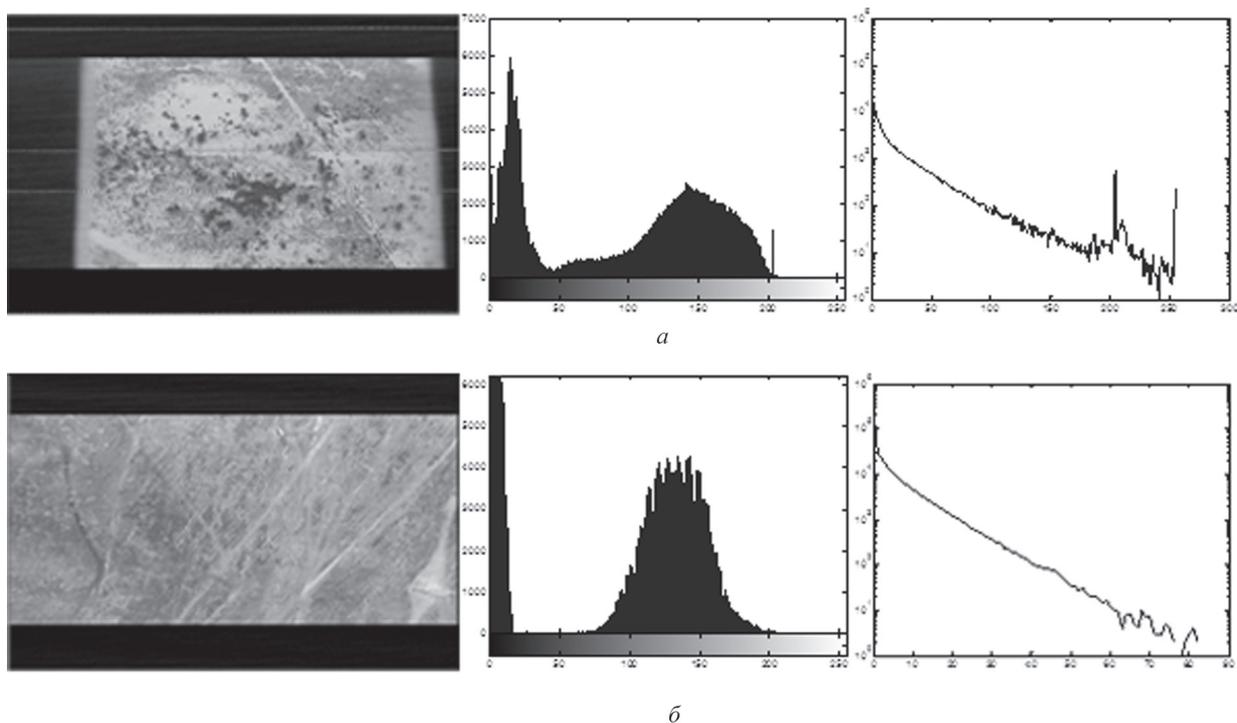


Рис. 2. Кадры тестовых видеопоследовательностей, их яркие и разностные гистограммы: *a* – высококонтрастный класс; *б* – низкоконтрастный класс

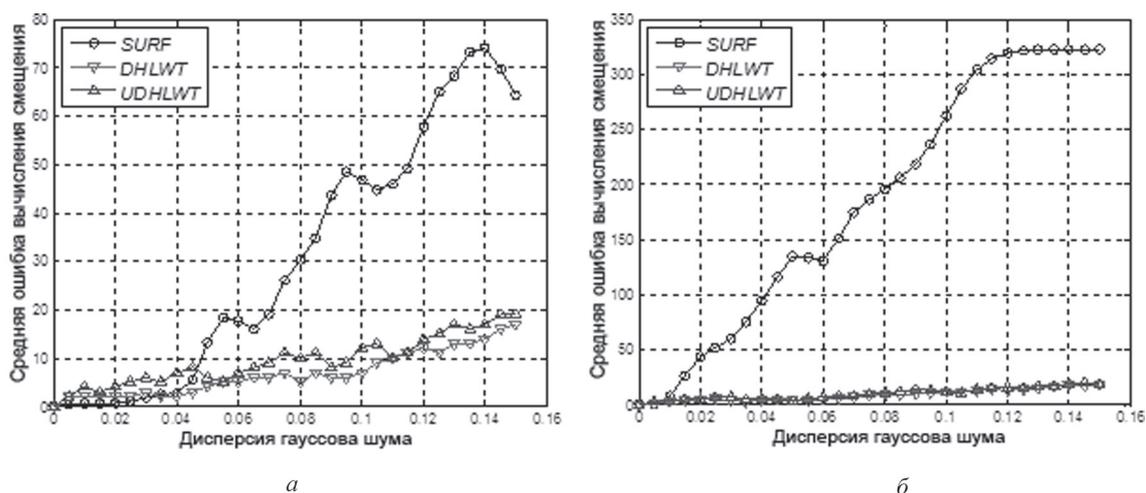


Рис. 3. Устойчивость методов стабилизации к шуму для разных классов видеок кадров: *a*, *б* – высококонтрастный и низкоконтрастный классы соответственно

вание предложенного метода позволяет повысить устойчивость в случае значительного изменения контрастно-яркостных характеристик до 10 раз для видеок кадров высококонтрастного класса и до 11,5 раз для видеок кадров низкоконтрастного класса (рис. 4).

Время параметризации и локализации реперов на одном кадре видеопоследовательности для дескриптора SURF и дескриптора на основе ковариационных вейвлет-признаков приведено в таблице.

Из таблицы видно, что использование дескриптора на основе прореженного дискретного лифтинг вейвлет-преобразования позволяет снизить время вычислений в 5,2 раза для высококонтрастного класса и в 2,8 раза для низкоконтрастного класса. В то же время использование дескриптора на основе непрореженного дискретного лифтинг вейвлет-преобразования приводит к снижению времени вычислений в 1,2 раза и увеличению в 1,5 раза соответственно.

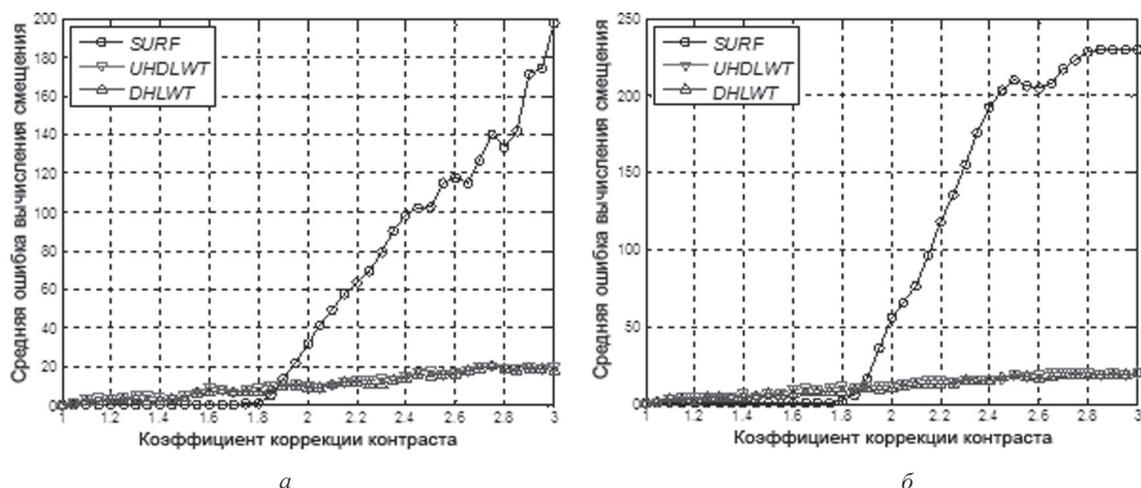


Рис. 4. Устойчивость методов стабилизации к изменению контрастно-яркостных характеристик видеопоследовательности: *а, б* – высококонтрастный и низкоконтрастный классы соответственно

Время параметризации и локализации реперов на кадре видеопоследовательности

Тип видеопоследовательности	Тип дескриптора		
	SURF, мс	Ковариационные вейвлет-признаки	
		HLWT, мс	UHLWT, мс
Высококонтрастная	162,2	31,1	131,3
Низкоконтрастная	149,6	52,7	218,0

Время параметризации и идентификации реперов оценивалось в среде программирования MATLAB R2013a на компьютере с процессором Intel Core i5 (2,6 ГГц) и ОЗУ 4 ГБ.

Заключение. Предложен метод ковариационной стабилизации видеопоследовательности с предсказанием, основанный на сопоставлении вейвлет-признаков и постепенном уточнении местоположения реперных областей.

Установлено, что по сравнению с методом SURF предложенный метод обеспечивает сокращение до 5,2 раз времени параметризации и локализации реперов; увеличение устойчивости до 16 раз в случае сильного зашумления и до 11,5 раз в случае значительного изменения контрастно-яркостных характеристик видеокadres. Это позволяет использовать предложенный метод для решения задачи стабилизации видеоданных с борта легкого БЛА в условиях высокой нестационарности видеокамеры и ограниченных вычислительных ресурсов.

Литература

1. Lowe D. G. // Intern. Journ. of Computer Vision. 2004. Vol. 60, N 2. P. 91–110.
2. Bay H. // Computer Vision and Image Understanding. 2008. Vol. 110, N 3. P. 346–359.
3. Борискевич И. А., Цветков В. Ю., Аль-Хелли Ф. А. М. // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных: Матер. Междунар. науч.-техн. семинара (Минск, апрель–декабрь 2013 года). Мн., 2014. С. 16–21.
4. Tuzel O., Porikli F., Meer P. // Proc. 9th European Conf. on Computer Vision. 2006. Vol. 2. P. 589–600.
5. Oren M., Papageorgiou C. // Proc. of IEEE International on Computer Vision and Pattern Recognition. 1997. Vol. 97. P. 193–199.

I. A. BARYSKIEVIC, V. Yu. TSVIATKOU

STABILIZATION OF VIDEO SEQUENCE FROM BOARD OF A SMALL UAV BASED ON COVARIANCE SEARCH FOR REFERENCE POINTS WITH PREDICTION

Summary

A covariance method of video sequence stabilization with prediction is proposed. It based on matching of covariance wavelet features and gradual refinement of reference areas locations. It allows usage of the proposed method for stabilization of video data from board of a small UAV under conditions of non-stationary video camera and computational constraints.