

УДК 004.932.2

АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ ГРУПП ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ФАЗОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Васильев С.В., к.т.н., докторант кафедры автоматизации управления летательных аппаратов (и вычислительных систем) Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», e-mail: stanislav-vas1986@mail.ru

Богословский А.В., Заслуженный деятель науки РФ, д.т.н., профессор, профессор кафедры радиоэлектроники Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», e-mail: p-digim@mail.ru

Жигулева И.В. к.т.н., доцент Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», e-mail: ira_zhigulina@mail.ru

ANALYSIS OF THE MOVEMENT OF GROUPS OF OBJECTS BASED ON PHASE ENERGY SPECTRUM OF THE VIDEO SEQUENCE

Vasilyev S.V., Bogoslovsky A.V., Zhigulina I.V.

The article presents the results of a study of the phase-energy functions of a video sequence in the presence of a moving point object, a group of objects, as well as an extended object. Special areas of the phase space are highlighted, within which the values of phase-energy functions can be determined regardless of the position and direction of the object. Analytical expressions are obtained that make it possible to represent the phase-energy functions of a video sequence with several moving point objects as the sum of phase-energy functions corresponding to these single objects. The possibility of identifying the movement of objects of arbitrary shape by analyzing the «additives» formed during the fragmentation of the original object into elementary components is shown.

Key words: phase energy function, point object, motion identification, group motion.

Ключевые слова: фазоэнергетическая функция, точечный объект, идентификация движения, групповое движение.

Введение

Обнаружение движущихся объектов и определение параметров их движения, особенно в случае одновременного перемещения нескольких объектов в разных направлениях, представляет собой сложную задачу [1-5]. Во многих случаях она должна решаться совместно различными методами с целью исключения ошибок как в обнаружении объектов, так в определении характеристик движения. К числу таких методов относят: методы вычитания фона [6-7], недостатком которого является возможная классификация фоновых пикселей как переднеплановых, латентность в обновлении модели фона и высокие требования к ресурсам вычислительных систем; вероятностные методы [8], позволяющие учитывать медленные изменения освещенности, но не описывающие быстрые изменения фона и освещенности сцены; методы временной разности [9], хорошо определяющие динамические изменения сцены, но не выделяющие целиком всех однородных пикселей одного объекта, и, кроме того, не позволяющие обнаружить остановившиеся объекты; перспективные, но ресурсоемкие и чрезвычайно чувствительные к шуму методы оптического потока [10]; искусственные нейронные сети [11-12], требующие некоторого времени для обучения, частотные (Фурье-) методы [13].

К числу последних можно отнести метод, основанный на применении фазоэнергетического спектра (Фспектра), объединяющего достоинства энергетического

Представлены результаты исследования фазоэнергетических функций видеопоследовательности при наличии движущегося точечного объекта, группы объектов, а также протяженного объекта. Выделены особые области фазового пространства, в пределах которых значения фазоэнергетических функций могут быть определены независимо от положения и направления объекта. Получены аналитические выражения, позволяющие представить фазоэнергетические функции видеопоследовательности с несколькими движущимися точечными объектами как суммы фазоэнергетических функций, соответствующих этим одиночным объектам. Показана возможность идентификации движения объектов произвольной формы путем анализа «добавок», формирующихся при фрагментации исходного объекта на элементарные составляющие.

и фазочастотного пространственного спектров видеосигнала. Эта вектор-функция (векторное поле) порождается кадром изображения, её аргументами являются пространственные частоты. В работе [14] показано, что Ф-спектр обладает крайне высокой чувствительностью на краях изображения, что делает его эффективным инструментом обнаружения движения в области периферийного зрения.

Вся информация, содержащаяся в Ф-спектре, сосредоточена в амплитудах пространственных гармоник - фазоэнергетических характеристиках (ФЭХ). Они, в свою очередь, представляют собой дискретное векторное поле [15].

Для определения движения и нахождения его параметров необходимо иметь как минимум два кадра. Разность ФЭХ двух кадров изображения называются фазоэнергетическими функциями (ФЭФ) [16].

В работе [17] было показано, что ФЭФ ΔI_x и ΔI_y – координаты разностного векторного поля ФЭХ – могут

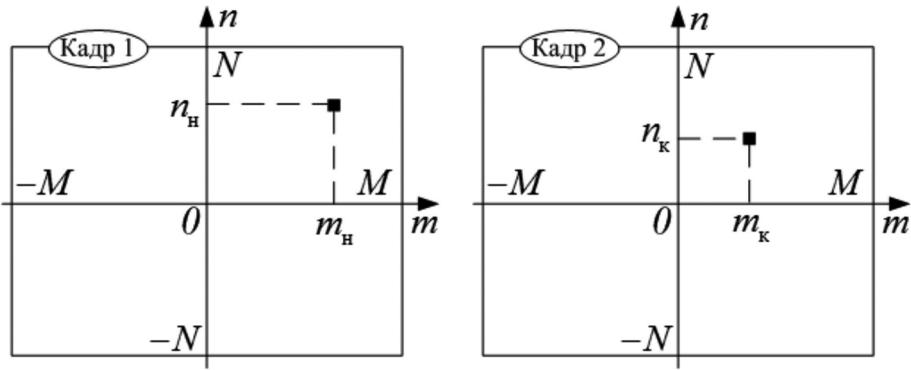


Рис. 1. Графическое представление движения точечного объекта в произвольном направлении

быть определены по формулам:

$$\Delta I_x(p_x, p_y) = \sum_{m=-M}^{M-p_x} \sum_n (2m + p_x)(f_{m,n}^{(2)} f_{m+p_x, n+p_y}^{(2)} - f_{m,n}^{(1)} f_{m+p_x, n+p_y}^{(1)}); \quad (1)$$

$$\Delta I_y(p_x, p_y) = \sum_{m=-M}^{M-p_x} \sum_n (2n + p_y)(f_{m,n}^{(2)} f_{m+p_x, n+p_y}^{(2)} - f_{m,n}^{(1)} f_{m+p_x, n+p_y}^{(1)}); \quad (2)$$

где $f_{m,n}^{(q)}$ - отсчет видеосигнала изображения q -го кадра, содержащего $(2M+1) \times (2N+1)$ пикселей; отсчет с номером $(0,0)$ находится в центре кадра; p_x, p_y - номера фаз, определяющие пространственную частоту гармоники $\cos(p_x \varphi_x + p_y \varphi_y)$ Ф-спектра;

$$\begin{aligned} \varphi_x, \varphi_y &\in [-\pi; \pi]; & p_x &\in [0, 2M], & p_y &\in [-2N, 2N]; \\ \begin{cases} -N \leq n \leq N - p_y & \text{при } p_y \geq 0, \\ -N - p_y \leq n \leq N & \text{при } p_y < 0. \end{cases} \end{aligned}$$

Возможности применения ФЭФ для определения

Подставим (3) в выражения (1)-(2):

$$\Delta I_x(p_x, p_y) = \sum_{m=-M}^{M-p_x} \sum_n (2m + p_x)[(f_\phi + c_{m,n}^{(2)}) (f_\phi + c_{m+p_x, n+p_y}^{(2)}) - (f_\phi + c_{m,n}^{(1)}) (f_\phi + c_{m+p_x, n+p_y}^{(1)})]. \quad (4)$$

$$\Delta I_y(p_x, p_y) = \sum_{m=-M}^{M-p_x} \sum_n (2n + p_y)[(f_\phi + c_{m,n}^{(2)}) (f_\phi + c_{m+p_x, n+p_y}^{(2)}) - (f_\phi + c_{m,n}^{(1)}) (f_\phi + c_{m+p_x, n+p_y}^{(1)})]. \quad (5)$$

Анализ выражений (4)-(5) после раскрытия квадратных скобок показывает, что необходимо рассмотреть два случая: $(p_x, p_y) = (0,0)$ и все остальные номера фаз.

В первом случае получим:

$$\begin{aligned} \Delta I_x(0,0) &= 2 \sum_{m=-M}^{M-p_x} \sum_n m (2f_\phi(c_{m,n}^{(2)} - c_{m,n}^{(1)}) + (c_{m,n}^{(2)})^2 - (c_{m,n}^{(1)})^2) = \\ &= 2[2f_\phi(m_k c_{m_k, n_k}^{(2)} - m_h c_{m_h, n_h}^{(1)}) + \end{aligned} \quad (6)$$

$$+ m_k (c_{m_k, n_k}^{(2)})^2 - m_h (c_{m_h, n_h}^{(1)})^2],$$

$$\Delta I_y(0,0) =$$

$$\begin{aligned} &= 2 \sum_{m=-M}^{M-p_x} \sum_n n (2f_\phi(c_{m,n}^{(2)} - c_{m,n}^{(1)}) + (c_{m,n}^{(2)})^2 - (c_{m,n}^{(1)})^2) = \\ &= 2[2f_\phi(n_k c_{m_k, n_k}^{(2)} - n_h c_{m_h, n_h}^{(1)}) + \\ &+ n_k (c_{m_k, n_k}^{(2)})^2 - n_h (c_{m_h, n_h}^{(1)})^2]. \end{aligned} \quad (7)$$

Цель статьи – подробный анализ формирования ФЭФ, в том числе при групповом перемещении объектов.

Сначала будет рассмотрена модель формирования ФЭФ для случая одиночного малоразмерного объекта, а затем результаты будут применены для анализа движения нескольких объектов.

Одиночный подвижный малоразмерный объект

Рассмотрим изображение объекта - одиночного контрастного пикселя - на равномерном фоне яркостью f_ϕ . В первом кадре координаты объекта (m_h, n_h) , а во втором - (m_k, n_k) (рис. 1). Отсчеты видеосигналов кадров определяются соотношением:

$$f_{m,n} = f_\phi + c_{m,n}, \quad (3)$$

где $c_{m,n}$ - контраст объекта,

$$\begin{cases} c_{m,n} \neq 0, & \text{если пиксель } (m, n) \text{ принадлежит объекту,} \\ c_{m,n} = 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Допуская неизменность контраста $c^{(2)} \approx c^{(1)} = c$ объекта между кадрами, можно получить более простые выражения:

$$\Delta I_x(0,0) \approx 2c(2f_\phi + c)(m_k - m_h), \quad (8)$$

$$\Delta I_y(0,0) \approx 2c(2f_\phi + c)(n_k - n_h). \quad (9)$$

Из (8)-(9) следует, что при постоянстве фона и контраста ФЭФ в начале координат определяются лишь величинами горизонтального и вертикального перемещений. Очевидно, что в случае равномерного прямолинейного движения объекта между кадрами видеопоследовательности значения ФЭФ в точке $(0,0)$ будут неизменными.

Во втором случае для произвольной двумерной фазы $(p_x, p_y) \neq (0,0)$ выражения (4) и (5) примут вид:

$$\begin{aligned} \Delta I_x(p_x, p_y) &= \\ &= f_\phi \sum_{m=-M}^{M-p_x} \sum_n (2m + p_x)(c_{m,n}^{(2)} - c_{m,n}^{(1)} + c_{m+p_x, n+p_y}^{(2)} - c_{m+p_x, n+p_y}^{(1)}), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\Delta I_y(p_x, p_y) = \quad (11)$$

$$= f_{\phi} \sum_{m=-M}^{M-p_x} \sum_n (2n + p_y)(c_{m,n}^{(2)} - c_{m,n}^{(1)} + c_{m+p_x, n+p_y}^{(2)} - c_{m+p_x, n+p_y}^{(1)}).$$

Формирование отсчетов ФЭФ достаточно рассмотреть на примере функции ΔI_x . Проанализируем каждое из четырех слагаемых в (10), а также установим границы областей фаз, в пределах которых эти слагаемые отличны от нуля:

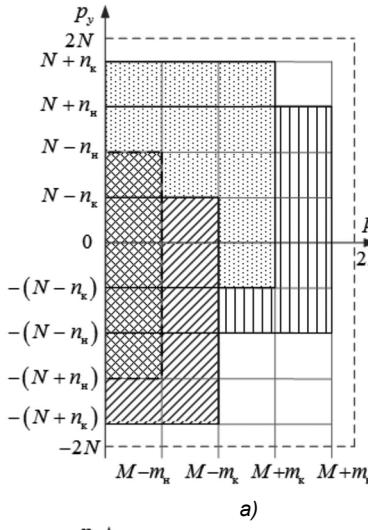
$$\sum_{m=-M}^{M-p_x} \sum_n (2m + p_x) c_{m,n}^{(2)} = c_{m_k, n_k}^{(2)} (2m_k + p_x), \quad (12)$$

$$\text{при } \begin{cases} 1 \leq p_x \leq M - m_k, \\ -(N + n_k) \leq p_y \leq N - n_k, \end{cases}$$

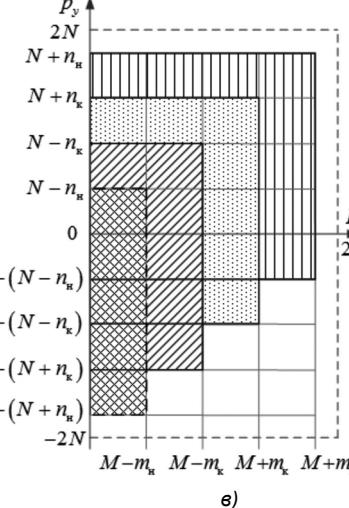
$$\sum_{m=-M}^{M-p_x} \sum_n (2m + p_x) c_{m,n}^{(1)} = c_{m_h, n_h}^{(1)} (2m_h + p_x), \quad (13)$$

$$\text{при } \begin{cases} 1 \leq p_x \leq M - m_h, \\ -(N + n_h) \leq p_y \leq N - n_h, \end{cases}$$

$$\sum_{m=-M}^{M-p_x} \sum_n (2m + p_x) c_{m+p_x, n+p_y}^{(2)} = c_{m_k, n_k}^{(2)} (2m_k - p_x), \quad (14)$$



а)



в)

$$\text{при } \begin{cases} 1 \leq p_x \leq M + m_h, \\ -(N - n_h) \leq p_y \leq N + n_h, \end{cases}$$

$$\sum_{m=-M}^{M-p_x} \sum_n (2m + p_x) c_{m+p_x, n+p_y}^{(1)} = c_{m_h, n_h}^{(1)} (2m_h - p_x), \quad (15)$$

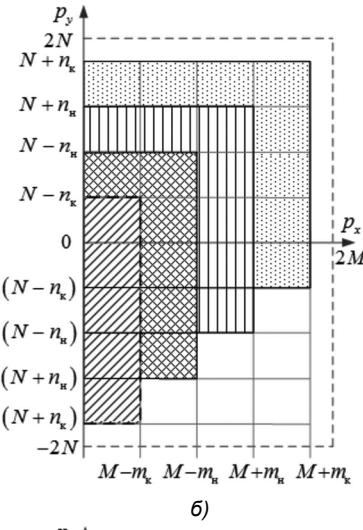
$$\text{при } \begin{cases} 1 \leq p_x \leq M + m_k, \\ -(N - n_k) \leq p_y \leq N + n_k, \end{cases}$$

Выражения (14)-(15) для третьего и четвертого слагаемых были получены при $m = m_k - p_x$, $n = n_k - p_y$ и $m = m_h - p_x$, $n = n_h - p_y$, соответственно.

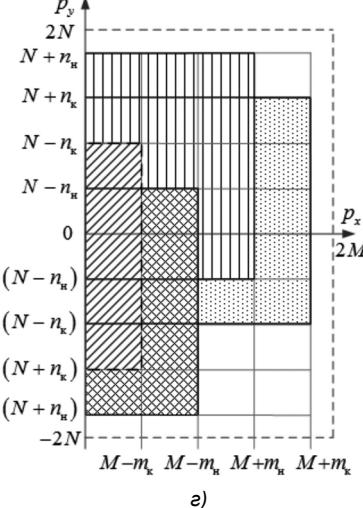
Границы фазовых областей в (12)-(15) определены в общем виде, т.е. для движения объекта в произвольном направлении.

Поскольку граничные фазы (а, следовательно, и их взаимное расположение на координатных осях) зависят от начального и конечного положения объекта, то конфигурация фазовых областей напрямую определяется направлением движения объекта.

Для случаев движения объекта в пределах первого квадранта в четырех направлениях на рис. 2 выделены области, в которых слагаемые функции (10) отличны от нуля.



б)



г)

Рис. 2. Фазовые области при формировании значений функции ΔI_x для случаев разнонаправленных движений объекта в I квадранте: влево-вверх (а), вправо-вверх (б), влево-вниз (в) и вправо-вниз (г). (диагональная штриховка – область, соответствующая первому слагаемому, перекрестная штриховка – второму, точечная штриховка – третьему, вертикальная штриховка – четвертому)

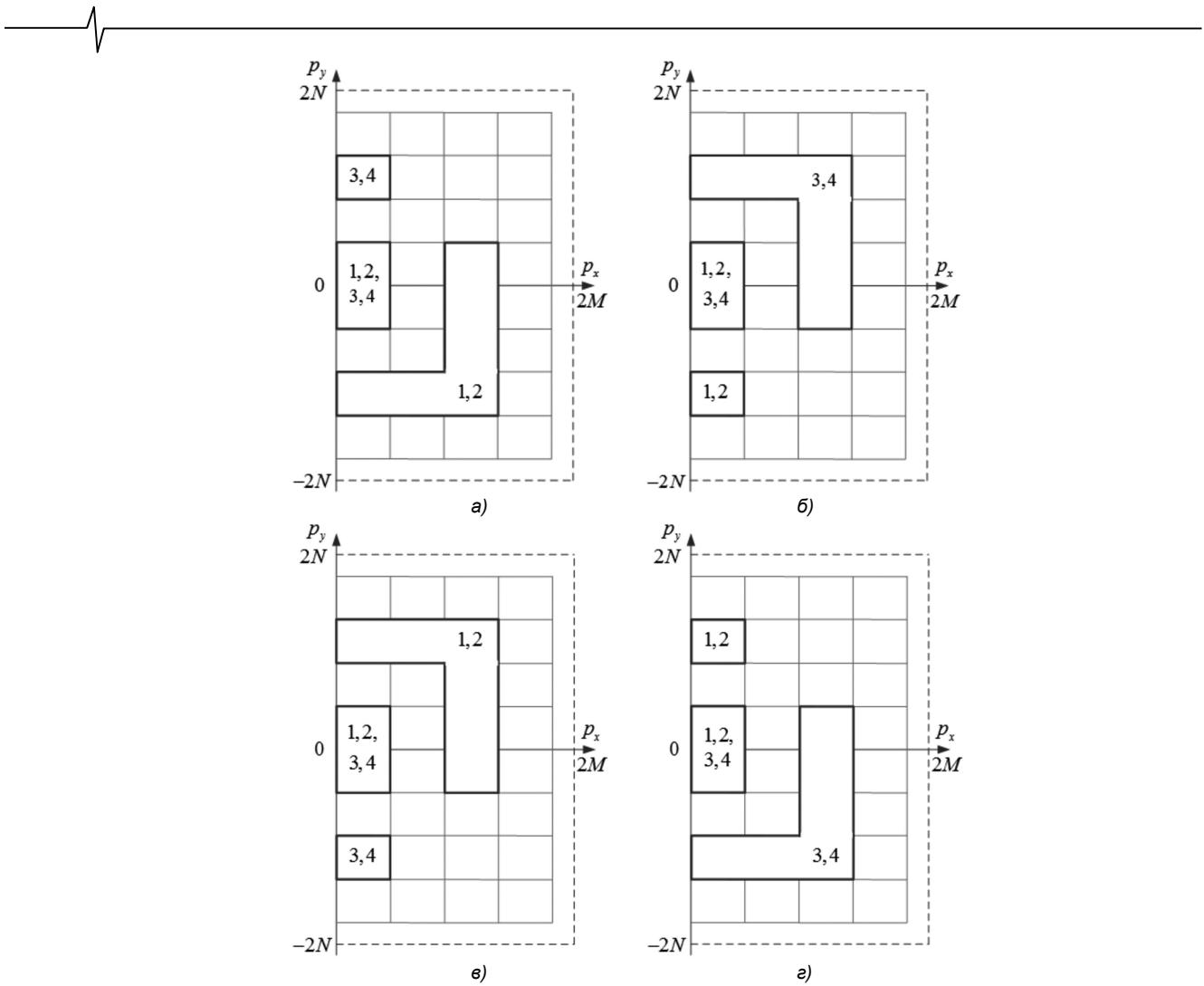


Рис. 3. Области, в которых состав слагаемых функции ΔI_x не зависит от направления движения:

а – движение во II квадранте, б – движение в I квадранте, в – движение в III квадранте, г – движение в IV квадранте

Анализ рис. 2 позволяет выделить некоторые области фаз, в границах которых состав слагаемых ΔI_x постоянен независимо от направления движения. На рис. 3, б показаны три таких области для случая движения объекта в пределах первого квадранта (в каждой области указаны номера слагаемых). Рис. 3 а, в, г соответствуют движению во втором, третьем и четвертом квадрантах.

Определив все возможные пересечения областей на рис. 3, получим области, в которых состав слагаемых постоянен в границах квадранта, но варьируется в зависимости от номера квадранта (рис. 4). Локализация таких областей, удаленных от начала координат, затруднена. Наибольший интерес представляет область, примыкающая к началу координат. Независимо от положения объекта и направления движения значения ΔI_x в этой области будут определяться суммой всех четырех слагаемых:

$$\begin{aligned} \Delta I_x &= f_\phi [c^{(2)}(2m_k + p_x) - c^{(1)}(2m_h + p_x) + \\ &+ c^{(2)}(2m_k - p_x) - c^{(1)}(2m_h - p_x)] = 4f_\phi(c^{(2)}m_k - c^{(1)}m_h), \end{aligned} \quad (16)$$

а при $c^{(2)} \approx c^{(1)} = c$ имеем:

$$\Delta I_x \approx 4f_\phi c(m_k - m_h). \quad (17)$$

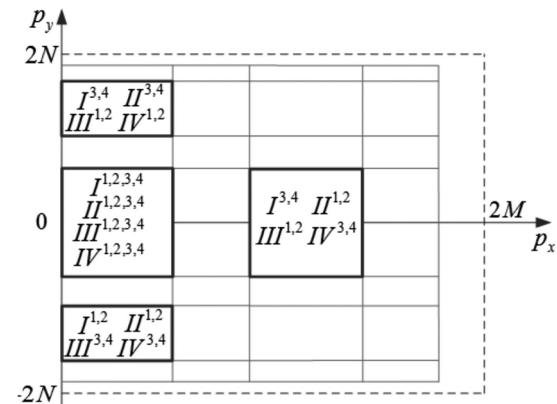


Рис. 4. Карта областей с постоянным составом слагаемых (арабскими цифрами отмечены номера слагаемых, римскими цифрами – номера квадрантов)

Величина $m_k - m_h$ «несет в себе» информацию о направлении горизонтального перемещения объекта, но в явном виде использоваться не может в силу наличия в выражении (17) множителя « c », принимающего как положительные, так и отрицательные значения. А вычитая из (8) функцию (17), получим результат, не зависящий от яркости фона:

$$2c(2f_\phi + c)(m_k - m_h) - 4f_\phi c(m_k - m_h) = 2c^2(m_k - m_h).$$

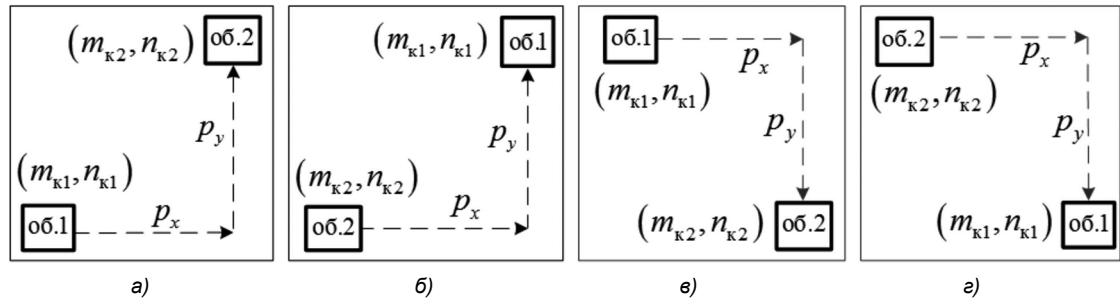


Рис. 5. Все возможные случаи взаимного расположения двух точечных объектов

Таким образом, если пренебречь изменением контраста между соседними кадрами, то в качестве указателя направления можно использовать разницу значений ΔI_x в точке $(0,0)$ и в центральной области, показанной на рис. 4.

Движение пары малоразмерных объектов

Рассмотрим простейший пример – движение двух точечных контрастных объектов на равномерном фоне. В первом кадре координаты объектов (m_{k1}, n_{k1}) и (m_{k2}, n_{k2}) , а во втором - (m_{k1}, n_{k1}) и (m_{k2}, n_{k2}) , соответственно. Тогда отсчеты видеосигналов кадров определяются соотношением:

$$f_{m,n} = f_\phi + {}_1c_{m,n} + {}_2c_{m,n},$$

где левый нижний индекс указывает на соответствующий объект.

Функции (1)-(2) в этом случае примут вид:

$$\begin{aligned} \Delta I_x = & \sum_{m=-M}^{M-p_x} \sum_n (2m+p_x) [f_\phi({}_1c_{m,n}^{(2)} - {}_1c_{m,n}^{(1)}) + \\ & + f_\phi({}_1c_{m+p_x,n+p_y}^{(2)} - {}_1c_{m+p_x,n+p_y}^{(1)}) + \\ & + f_\phi({}_2c_{m,n}^{(2)} - {}_2c_{m,n}^{(1)}) + f_\phi({}_2c_{m+p_x,n+p_y}^{(2)} - {}_2c_{m+p_x,n+p_y}^{(1)}) + \\ & + ({}_1c_{m,n}^{(2)} \cdot {}_2c_{m+p_x,n+p_y}^{(2)} + {}_2c_{m,n}^{(2)} \cdot {}_1c_{m+p_x,n+p_y}^{(2)}) - \\ & - ({}_1c_{m,n}^{(1)} \cdot {}_2c_{m+p_x,n+p_y}^{(1)} + {}_2c_{m,n}^{(1)} \cdot {}_1c_{m+p_x,n+p_y}^{(1)})], \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \Delta I_y = & \sum_{m=-M}^{M-p_x} \sum_n (2n+p_y) [f_\phi({}_1c_{m,n}^{(2)} - {}_1c_{m,n}^{(1)}) + \\ & + f_\phi({}_1c_{m+p_x,n+p_y}^{(2)} - {}_1c_{m+p_x,n+p_y}^{(1)}) + \\ & + f_\phi({}_2c_{m,n}^{(2)} - {}_2c_{m,n}^{(1)}) + f_\phi({}_2c_{m+p_x,n+p_y}^{(2)} - {}_2c_{m+p_x,n+p_y}^{(1)}) + \\ & + ({}_1c_{m,n}^{(2)} \cdot {}_2c_{m+p_x,n+p_y}^{(2)} + {}_2c_{m,n}^{(2)} \cdot {}_1c_{m+p_x,n+p_y}^{(2)}) - \\ & - ({}_1c_{m,n}^{(1)} \cdot {}_2c_{m+p_x,n+p_y}^{(1)} + {}_2c_{m,n}^{(1)} \cdot {}_1c_{m+p_x,n+p_y}^{(1)})]. \end{aligned} \quad (19)$$

С учетом соотношений (10)-(11) функции (18)-(19) можно представить следующим образом:

$$\Delta I_x = \Delta I_x^{(ob.1)} + \Delta I_x^{(ob.2)} + W_x, \quad (20)$$

$$\Delta I_y = \Delta I_y^{(ob.1)} + \Delta I_y^{(ob.2)} + W_y, \quad (21)$$

где $\{\Delta I_x^{(ob.1)}, \Delta I_y^{(ob.1)}\}$, $\{\Delta I_x^{(ob.2)}, \Delta I_y^{(ob.2)}\}$ – ФЭФ первого и второго объектов;

$$W_x = \sum_{m=-M}^{M-p_x} \sum_n (2m+p_x) ({}_1c_{m,n}^{(2)} \cdot {}_2c_{m+p_x,n+p_y}^{(2)} + {}_2c_{m,n}^{(2)} \cdot {}_1c_{m+p_x,n+p_y}^{(2)}) -$$

$$= \sum_{m=-M}^{M-p_x} \sum_n (2m+p_x) ({}_1c_{m,n}^{(2)} \cdot {}_2c_{m+p_x,n+p_y}^{(2)} + {}_2c_{m,n}^{(2)} \cdot {}_1c_{m+p_x,n+p_y}^{(2)}) -$$

$$\begin{aligned} & - \sum_{m=-M}^{M-p_x} \sum_n (2m+p_x) ({}_1c_{m,n}^{(1)} \cdot {}_2c_{m+p_x,n+p_y}^{(1)} + {}_2c_{m,n}^{(1)} \cdot {}_1c_{m+p_x,n+p_y}^{(1)}) = \\ & = W_{x1} - W_{x2}, \\ W_y = & \sum_{m=-M}^{M-p_x} \sum_n (2n+p_y) ({}_1c_{m,n}^{(2)} \cdot {}_2c_{m+p_x,n+p_y}^{(2)} + {}_2c_{m,n}^{(2)} \cdot {}_1c_{m+p_x,n+p_y}^{(2)}) - \\ & - \sum_{m=-M}^{M-p_x} \sum_n (2n+p_y) ({}_1c_{m,n}^{(1)} \cdot {}_2c_{m+p_x,n+p_y}^{(1)} + {}_2c_{m,n}^{(1)} \cdot {}_1c_{m+p_x,n+p_y}^{(1)}) = \\ & = W_{y1} - W_{y2}. \end{aligned} \quad (23)$$

ФЭФ одиночных объектов получены выше, поэтому наибольший интерес при анализе функций (20)-(21) представляют добавки W_x и W_y .

Рассмотрим подробно, как формируются компоненты в (22)-(23) на примере W_{x1} . При этом нужно учитывать взаимное расположение объектов (рис. 5). Рассмотрим фазы $p_y > 0$. Пусть второй объект находится правее первого, т.е. $m_{k2} > m_{k1}$ (рис. 5, а). Тогда в W_{x1} первое произведение ${}_1c_{m,n}^{(2)} \cdot {}_2c_{m+p_x,n+p_y}^{(2)} \neq 0$ только при $p_x = m_{k2} - m_{k1}$, $p_y = n_{k2} - n_{k1}$, а второе произведение ${}_2c_{m,n}^{(2)} \cdot {}_1c_{m+p_x,n+p_y}^{(2)} \equiv 0$, т.к. $p_x \geq 0$. В случае, когда второй объект располагается левее первого, т.е. $m_{k2} < m_{k1}$ (рис. 5, б), первое произведение в W_{x1} равно нулю, а второе отлично от нуля при $p_x = m_{k1} - m_{k2}$, $p_y = n_{k1} - n_{k2}$. Таким образом, W_{x1} не зависит от начального расположения объектов:

$$W_{x1} = (m_{k1} + m_{k2}) {}_1c_{m,n}^{(2)} {}_2c_{m,n}^{(2)}. \quad (24)$$

Рассмотрим фазы $p_y < 0$. Если $m_{k2} > m_{k1}$ (рис. 5, в), то W_{x1} будет определяться единственным ненулевым значением первого произведения при $p_x = m_{k2} - m_{k1}$, $p_y = n_{k2} - n_{k1}$. В случае $m_{k2} < m_{k1}$ (рис. 5, г) первое произведение равно нулю, а второе отлично от нуля при $p_x = m_{k1} - m_{k2}$, $p_y = n_{k1} - n_{k2}$.

Окончательно получаем, что величина W_{x1} на всем множестве фаз (p_x, p_y) принимает единственное ненулевое значение (24) при условии $p_x = |m_{k2} - m_{k1}|$,

$$\begin{cases} p_y = n_{k2} - n_{kl}, \text{ если } m_{k2} > m_{kl}, \\ p_y = n_{kl} - n_{k2}, \text{ если } m_{k2} < m_{kl}. \end{cases}$$

Аналогичными рассуждениями можно показать, что W_{x2} не зависит от конечного расположения объектов: $W_{x2} = (m_{h1} + m_{h2})_1 c^{(1)}_1 c^{(1)}_2$, где $p_x = |m_{h2} - m_{h1}|$,

$$\begin{cases} p_y = n_{h2} - n_{h1} \text{ при } m_{h2} > m_{h1}, \\ p_y = n_{h1} - n_{h2} \text{ при } m_{h2} < m_{h1}. \end{cases}$$

Добавка W_y анализируется подобным образом.

Соотношения (20)-(21) можно обобщить для любого количества k объектов.

Движение группы малоразмерных объектов

Рассмотрим движение трех точечных объектов (рис. 6, а). Пусть $(m_{h1}, n_{h1}), (m_{h2}, n_{h2}), (m_{h3}, n_{h3})$ – координаты объектов № 1, 2, 3 в первом кадре; $(m_{kl}, n_{kl}), (m_{k2}, n_{k2}), (m_{k3}, n_{k3})$ – координаты объектов во втором кадре; $_1c^{(1)}, _2c^{(1)}$ и $_3c^{(1)}$ – контрасты объектов в первом кадре; $_1c^{(2)}, _2c^{(2)}$ и $_3c^{(2)}$ – контрасты объектов во втором кадре.

Величины W_x и W_y для случая движения трех объектов можно представить суммой трех слагаемых, каж-

дое из которых соответствует попарному рассмотрению двух объектов из трех:

$$W_x = {}_{12}W_x + {}_{13}W_x + {}_{23}W_x; \quad W_y = {}_{12}W_y + {}_{13}W_y + {}_{23}W_y. \quad (25)$$

Значения W_x и W_y будут формироваться в шести точках, отмеченных на рис. 6, б. Символом «*» обозначены точки (p_x, p_y) , определяемые взаимным расположением объектов в первом кадре, а символом «○» – во втором. Наличие на фазовой плоскости группы точек «○» свидетельствует об изменении конфигурации группы объектов между кадрами.

Особый интерес представляет случай перемещения объектов с сохранением конфигурации группы (рис. 7, а), т.е. $m_{kl} - m_{h1} = m_{k2} - m_{h2} = m_{k3} - m_{h3}$, $n_{kl} - n_{h1} = n_{k2} - n_{h2} = n_{k3} - n_{h3}$.

При таком «согласованном» движении количество точек, формирующих отклики W_x и W_y , уменьшится вдвое (рис. 7, б):

$$\begin{aligned} W_x = & \delta_{12}[({m_{kl}} + {m_{k2}})_1 c^{(2)}_1 c^{(2)}_2 - ({m_{h1}} + {m_{h2}})_1 c^{(1)}_1 c^{(1)}_2] + \\ & + \delta_{13}[({m_{kl}} + {m_{k3}})_1 c^{(2)}_1 c^{(2)}_3 - ({m_{h1}} + {m_{h3}})_1 c^{(1)}_1 c^{(1)}_3] + \\ & + \delta_{23}[({m_{k2}} + {m_{k3}})_2 c^{(2)}_2 c^{(2)}_3 - ({m_{h2}} + {m_{h3}})_2 c^{(1)}_2 c^{(1)}_3], \end{aligned} \quad (26)$$

где $\delta_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если } (p_x, p_y) = (m_{ki} - m_{kj}, n_{ki} - n_{kj}), \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$,
 $i \in \{1;2\}, \quad j \in \{2;3\}, \quad i \neq j$.

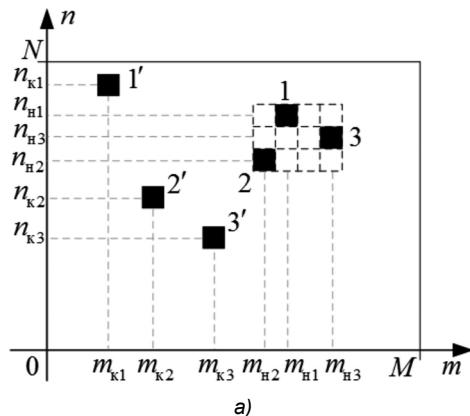


Рис. 6. Графическое представление перемещения трех точечных объектов (а) и точки, в которых формируются значения W_x и W_y (б)

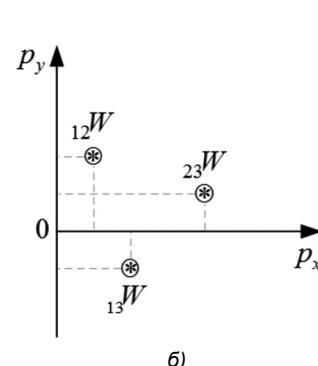
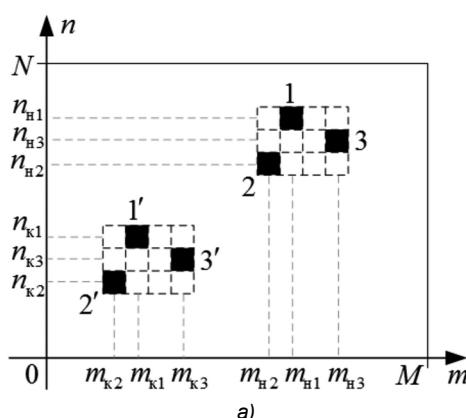
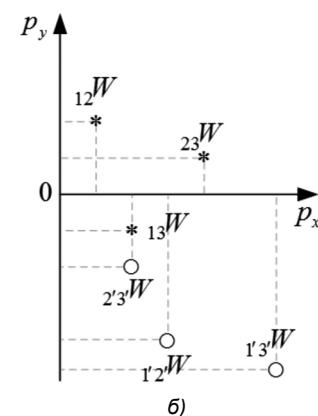


Рис. 7. Графическое представление группового перемещения трех точечных объектов (а) и точки, в которых формируются значения W_x и W_y (б)

Аналогичное соотношение можно получить и для W_y .

Сравнение рис. 6, б и рис. 7, б позволяет сформулировать критерий обнаружения группового движения. При организованном движении k объектов в группе количество точек на плоскости (p_x, p_y) будет равно числу сочетаний C_k^2 . При полностью рассогласованном движении группы количество точек будет увеличено до $2C_k^2$.

Движение протяженного объекта

При согласованном движении группы точечных объектов её можно рассматривать как движение одного протяженного объекта.

Пусть объект – это прямоугольник размерами 4×3 пикселя (рис. 8, а). Разработанным выше методом анализа движения точечных объектов можно определить компоненты всех добавок W_x и W_y . Например, для добавки ${}_1W_x$, соответствующей первому точечному объектом (левому верхнему пикслюю прямоугольника), имеем:

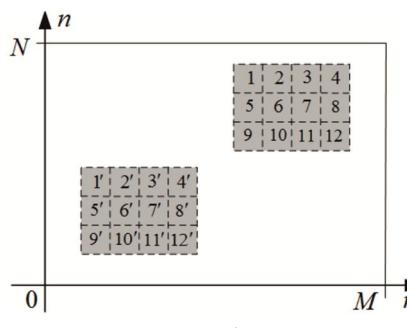
$$\delta_{12}[(2m_{k1}+1)_1c^{(2)}{}_2c^{(2)}-(2m_{k1}+1)_1c^{(1)}{}_2c^{(1)}],$$

где $\delta_{12} = \begin{cases} 1 & \text{при } p_x=1, p_y=0, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$

$$\delta_{13}[(2m_{k1}+2)_1c^{(2)}{}_3c^{(2)}-(2m_{k1}+2)_1c^{(1)}{}_3c^{(1)}],$$

где $\delta_{13} = \begin{cases} 1 & \text{при } p_x=2, p_y=0, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$

и т.д.



После нахождения всех добавок для остальных точечных объектов, получим дискретное множество на плоскости (p_x, p_y) (рис. 8б):

$$\begin{cases} 0 \leq p_x \leq m_{k4} - m_{k1}, \\ n_{k9} - n_{k1} \leq p_y \leq n_{k1} - n_{k9}. \end{cases}$$

Если перемещающийся объект равномерной яркости не претерпел изменения контраста между кадрами, то значения W_x и W_y будут определяться лишь квадратом контраста и величинами горизонтального d_h и вертикального d_v перемещений. В табл. 1 представлены выражения для W_x , соответствующие рис. 9, б. Для получения W_y в табл. 1 необходимо величину d_h заменить на d_v .

Таблица 1. Значения добавки $W_x(p_x, p_y)$ в случае движения объекта равномерной яркости

$p_x \backslash p_y$	0	1	2	3
2	$8d_h c^2$	$6d_h c^2$	$4d_h c^2$	$2d_h c^2$
1	$16d_h c^2$	$12d_h c^2$	$8d_h c^2$	$4d_h c^2$
0	0	$18d_h c^2$	$12d_h c^2$	$6d_h c^2$
-1	$16d_h c^2$	$12d_h c^2$	$8d_h c^2$	$4d_h c^2$
-2	$8d_h c^2$	$6d_h c^2$	$4d_h c^2$	$2d_h c^2$

Результаты моделирования

На рис. 9 представлены результаты моделирования для следующих исходных данных: размеры изображения

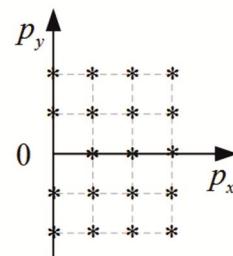


Рис. 8. Графическое представление перемещения объекта прямоугольной формы (а) и точки, в которых формируются значения W_x и W_y (б)

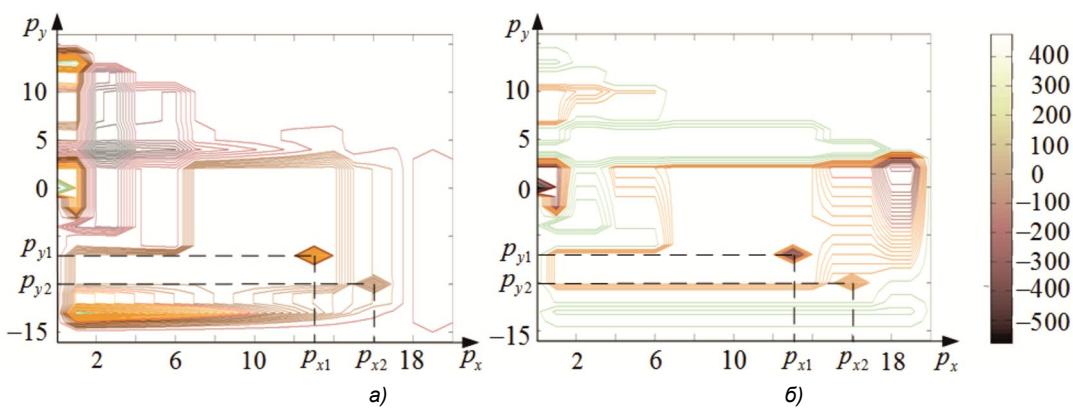
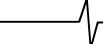


Рис. 9. Графическое представление скалярных полей фазоэнергетических функций ΔI_x (а) и ΔI_y (б) в виде проекций на координатную плоскость при помощи изолиний


21×17 пикселей, координаты объектов-точек в первом кадре: $m_{h1} = -9$, $n_{h1} = 6$, $m_{h2} = 7$, $n_{h2} = -4$, во втором: $m_{k1} = -4$, $n_{k1} = 2$, $m_{k2} = 9$, $n_{k2} = -5$, яркость фона $f_\phi = 5$, контраст объектов между кадрами не претерпел изменений и равен, соответственно, двум и трем градациям яркости.

На графиках с помощью линий уровня показаны участки изменения ΔI_x (рис. 9, а) и ΔI_y (рис. 9, б), а также расположение добавок W_x и W_y . Для принятых исходных данных величины W_x и W_y будут формироваться в точках (13, -7) и (16, -10), обозначенных как (p_{x1}, p_{y1}) и (p_{x2}, p_{y2}) , соответственно, причем W_{x1} и W_{x2} будут вносить положительный вклад (наблюдается образование локальных максимумов), а W_{y1} и W_{y2} – отрицательный (наблюдается образование локальных минимумов).

Наличие двух экстремумов в одних и тех же точках ФЭФ ΔI_x и ΔI_y позволяет судить о перемещении минимум двух точечных объектов. При этом численные значения координат добавок свидетельствуют о значительном относительно размеров изображения расстоянии между объектами, а их разница позволяет судить о скорости сближения либо удаления объектов друг с другом:

$$|\Delta p_{xi}| = |\Delta d_{hi}|.$$

Заключение

1. Рассмотрены особенности формирования компонент векторного поля ФЭФ видеопоследовательности при наличии движущегося малоразмерного объекта. Выделены области двумерных фаз, в которых удобно анализировать ФЭФ при любом положении и направлении движения объекта.

2. Разработан метод анализа ФЭФ для случая движения группы точечных объектов. Показано, что ФЭФ являются суммой компонентов, соответствующих одиночным объектам, и добавок, обусловленных пространственными соотношениями между объектами. Определен критерий, позволяющий установить согласованное групповое движение.

3. Разработанный метод применен для анализа движения протяженного объекта. Выделена область аргументов добавок ФЭФ, которая отражает внутреннюю структуру движущегося объекта и не зависит от направления движения объекта и его местоположения.

Литература

1. Fu C.Y. et al. Dssd: Deconvolutional single shot detector. arXiv preprint arXiv:1701.06659. 2017.
2. Girshick R. Fast r-cnn. Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 2015. P. 1440-1448.
3. Selective search for object recognition / Uijlings J.R., Van De Sande K.E., Gevers & Smeulders A.W. International journal of computer vision, (2013). 104(2), P. 154-171.
4. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Ершов М.Д. Подходы к обнаружению и оценке параметров движущихся объектов на видеопоследовательности применительно к транспортной аналитике. Компьютерная оптика. 2020. №5. С. 746-756.
5. Мареев А.В., Орлов А.А., Рыжкова М.Н. Методы локализации объектов в видеопотоке. Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2021. №3. С. 48-60.
6. Савостин А.А. Использование метода вычитания фона для обнаружения автотранспорта в видеопотоке. 11-я Международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2015». 2015. 160 с.
7. Заливин А.Н., Балабанова Н.С. Обнаружение движущихся объектов методом вычитания фона с использованием смеси гауссовых распределений. Автоматизированные технологии и производства. 2016. №3. С. 29-32.
8. Попов А.В., Васильева И.К., Угарова А.С. Алгоритм сопровождения объектов в видеопотоке, регистрируемом с беспилотного летательного аппарата. Авиационно-космическая техника и технология. 2015. №6 (123). С. 77-84.
9. Костенкова А.С., Грузман И.С. Выделение движущегося объекта в видеопотоке при помощи суперпиксельной сегментации и поля векторов движения. Современные проблемы радиоэлектроники. 2016. С. 20-23.
10. Форсайт Д., Понс Ж., Компьютерное зрение. Современный подход. М.: изд-во «Вильямс», 2004. 928 с.
11. Аксютина М.С., Гончарук С.Е. Распознавание объектов в видеопотоке при помощи алгоритма yolo и технологии openface. Научно-техническое творчество аспирантов и студентов. 2018. С. 208-211.
12. Ляшов М.В., Береза А.Н., Бабаев А.М., Коцюбинская С.А. Нейросетевая система отслеживания и распознавания объектов в видеопотоке. Современные научно-исследовательские технологии. 2018. №12. С. 102-107.
13. Нгуен В.Ш., Нгуен Т.Т. Обнаружение движений объектов в последовательности изображений. Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. Вып. 2. С. 133-138.
14. Богословский А.В., Жигулина И.В., Сухарев В.А. Векторное поле фазоэнергетического спектра изображения и видеопоследовательности. Радиотехника, 2018. №11. С. 11-16.
15. Богословский А.В., Сухарев В.А., Жигулина И.В., Панюхин М.А. Векторные поля, порождаемые преобразованием Фурье видеосигналом изображений. Радиотехника. 2021, №7. С. 127-139.
16. Васильев С.В., Жигулина И.В., Дербуш Д.А. Фазоэнергетические функции видеопоследовательности с движущимся объектом прямоугольной формы. Цифровая обработка сигналов. 2022. №4. С. 65-71.
17. Богословский А.В., Васильев С.В., Жигулина И.В. Двумерные фазоэнергетические характеристики. Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSP-2023): доклады XXV Междунар. науч. конф. Москва: РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2023. С. 256-259.
18. Богословский А.В., Васильев С.В., Жигулина И.В. Применение фазоэнергетического спектра для идентификации движения. Радиотехника. 2023. Т.87. №10. С. 96-107.