

УДК 004.932.2

## ФАЗОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ С ДВИЖУЩИМСЯ ОБЪЕКТОМ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ

*Васильев С.В., к.т.н., преподаватель кафедры автоматизации управления летательных аппаратов (и вычислительных систем) Военно-воздушной академии им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, e-mail: stanislav-vas1986@mail.ru*

*Жигулина И.В., к.т.н., доцент кафедры Военно-воздушной академии им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, e-mail: irazhigulina@gmail.com*

*Дербуш Д.А., курсант Военно-воздушной академии им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина*

### PHASE-ENERGY FUNCTIONS OF A VIDEO SEQUENCE WITH A RECTANGULAR MOVING OBJECT

*Vasilyev S.V., Zhigulina I.V., Derbush D.A.*

*Studies of phase-energy functions of a video sequence containing a moving object of the "rectangle" type have been carried out. The main characteristic areas of two-dimensional discrete fields generated by the phase-energy spectrum of the video sequence are determined. Analytical expressions are obtained for determining the components of these fields at any point in the frequency domain. The connection of one-dimensional and two-dimensional phase-energy functions is considered.*

**Key words:** video sequence, dynamic object, two-dimensional image, phase-energy characteristic, phase-energy function.

**Ключевые слова:** видеопоследовательность, динамический объект, двумерное изображение, фазоэнергетическая характеристика, фазоэнергетическая функция.

#### Введение

Проблема выделения движения является одной из центральных в обработке видеoinформации. Анализ публикаций по данной тематике указывает на наличие значительных успехов по отдельным направлениям, однако ее комплексное эффективное решение пока еще не найдено [1, 2].

Не случаен интерес к данной проблеме. Детектирование движущихся объектов выполняется в таких областях, как безопасность, контроль пространства, аэронавигация, транспортный и производственный контроль, мониторинг лесных пожаров и др. Несмотря на большое разнообразие разработанных методов обнаружения движений в кадре, применимость их существенно зависит от условий, в которых решается задача поиска. Недостаточная надежность работы соответствующих алгоритмов в пространстве всех возможных состояний фона и объектов является сдерживающим фактором на пути к созданию как универсальных многофункциональных систем обработки изображений и видеопоследовательностей, так и специализированных, включенных, например, в автоматический контур принятия решения критически важных объектов.

В работе [3] приведена классификация методов поиска движения в видеопоследовательностях. К группе статистических методов авторы относят корреляционные методы, статистическую сегментацию, пространственную и пространственно-временную фильтрацию. Методы сопоставления, отслеживания краевых точек, слежения за

*Проведены исследования фазоэнергетических функций видеопоследовательности, содержащей движущийся объект типа «прямоугольник». Определены основные характерные области двумерных дискретных полей, порождаемых фазоэнергетическим спектром видеопоследовательности. Получены аналитические выражения для определения компонент этих полей в любой точке частотной области. Рассмотрена связь одномерных и двумерных фазоэнергетических функций.*

точечными особенностями, а также методы, основанные на графовых моделях, относят к параметрическому подходу. Все указанные группы методов характеризуются в той или иной мере чувствительностью к однородности фона, отношению сигнал/шум, объему априорной информации, а также существенной вычислительной сложностью.

Мощным инструментом обнаружения движения в кадрах видеопоследовательности является спектральный анализ. Видеодатчик формирует изображение в форме упорядоченного множества дискретно-аналоговых отсчетов случайного двумерного пространственного поля. Спектр изображения описывается дискретизированным по пространственным координатам двумерным преобразованием Фурье. Оно содержит две случайные функции – амплитудно-частотный и фазочастотный пространственный спектры (АЧПС и ФЧПС). При линейной обработке изображений для уменьшения влияния случайности обычно используют квадрат модуля преобразования – энергетический спектр. Однако существует множество задач, где важно использование именно фазовой информации, содержащейся в ФЧПС, прежде всего, это определение местоположения объектов и идентификация движения.

Учитывать одновременно энергетическую и фазовую информацию позволяет рассматриваемый в статье математический аппарат. Предлагаемый подход является

развитием методов пространственно-временной фильтрации.

В работах [4-6] были исследованы энергетические характеристики видеопоследовательности, в частности, введено понятие фазоэнергетической функции  $\Delta\varphi(k)$  строки/столбца изображения, определяемой выражением:

$$\Delta\varphi(k) = \sum_{m=-M}^{M-k} (2m+k)(f_m''f_{m+k}'' - f_m'f_{m+k}'), \quad (1)$$

где  $f_m, f_{m+k}$  - отсчеты видеосигнала строки в пикселях с номерами  $m$  и  $m+k$ , соответственно (два штриха означают принадлежность к последующему кадру, а один - к предыдущему).

Приведенный в [4] анализ энергетических характеристик указал на возможность их использования для идентификации движения при обработке видеопоследовательностей. В частности, были определены десять характерных областей изменения фазы  $k$ , взаимосвязанных с пространственным положением объекта в соседних кадрах видеоряда. Результаты получены для одномерного случая, однако, авторами упомянута возможность обобщения для аналогичных функций двух переменных.

В работе [7] фазоэнергетическая характеристика изображения представлена в виде дискретного векторного поля  $\vec{I}(p_x, p_y) = \{I_x(p_x, p_y), I_y(p_x, p_y)\}$ , где  $p_x, p_y$  - одномерные номера фаз, а компоненты вектора находятся следующим образом:

$$I_x(p_x, p_y) = \sum_{i=-M}^{M-p_x} \sum_j (2i+p_x) f_{i,j} f_{i+p_x, j+p_y}, \quad (2)$$

$$I_y(p_x, p_y) = \sum_{i=-M}^{M-p_x} \sum_j (2j+p_y) f_{i,j} f_{i+p_x, j+p_y}, \quad (3)$$

где  $\begin{cases} j \in [-N; N-p_y], & \text{если } p_y \geq 0, \\ j \in [-N-p_y; N], & \text{если } p_y < 0. \end{cases}$

При решении задачи определения параметров движения представляет интерес анализ межкадровых изменений компонент  $I_x(p_x, p_y)$  и  $I_y(p_x, p_y)$ , т.н. *фазоэнергетических функций* (ФЭФ):

$$\Delta I_x(p_x, p_y) = I_x''(p_x, p_y) - I_x'(p_x, p_y), \quad (4)$$

$$\Delta I_y(p_x, p_y) = I_y''(p_x, p_y) - I_y'(p_x, p_y). \quad (5)$$

Переход к двумерному случаю демонстрирует более сложную картину зависимостей (4)-(5), поэтому в статье ставится и решается задача выявления особенностей характерных участков ФЭФ и их связи с пространственным положением объекта в кадре.

*Целью статьи* является исследование двумерных фазоэнергетических функций видеопоследовательности в рамках формирующегося научно-технического задела по разработке алгоритмического обеспечения бортовых систем технического зрения автономных объектов.

### 1. Движение объекта с нулевой вертикальной координатой

Рассмотрим видеопоследовательность, содержащую объект прямоугольной формы размерами  $8 \times 1$

пиксель, перемещающийся по горизонтали влево на  $d_h = 3$  пикселя (рис. 1). Координаты объекта в двух соседних кадрах:  $L=6, R=13$  - в первом кадре,  $L-d_h=3, R-d_h=10$  - во втором. Начало системы координат выбрано в центре изображения, т.е. объект расположен на оси абсцисс; размеры изображения  $(2M+1) \times (2N+1) = 27 \times 27$ . На рис. 2. построены графики двумерных ФЭФ (4), (5) для данного случая.

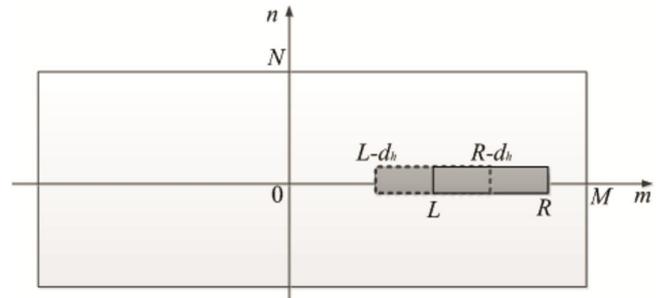
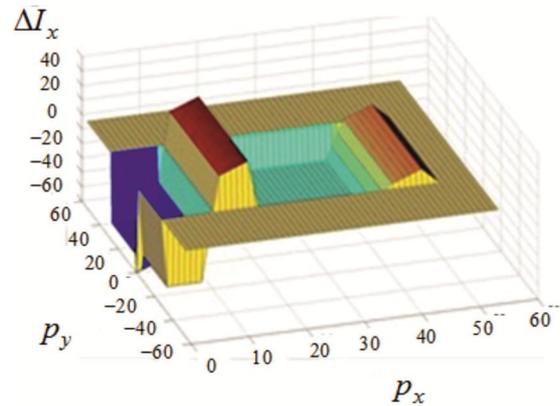
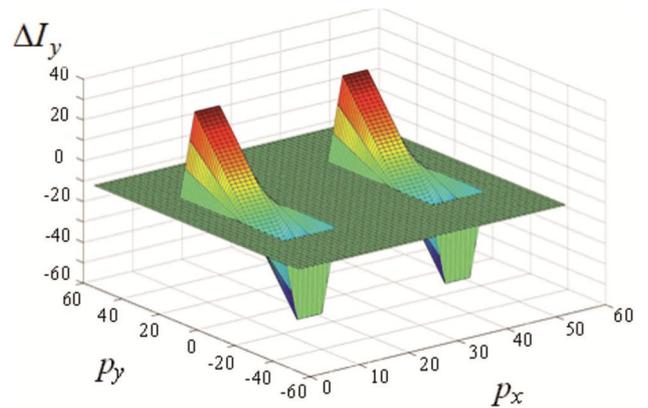


Рис. 1. Расположение объекта в двух соседних кадрах видеоряда



а)  $\Delta I_x(p_x, p_y)$ ;



б)  $\Delta I_y(p_x, p_y)$

Рис. 2. Фазоэнергетические функции для случая движения прямоугольного объекта по оси абсцисс

Для анализа фазоэнергетической функции  $\Delta I_x(p_x, p_y)$  рассмотрим два случая:  $p_y = 0$  и  $p_y \neq 0$ .

С учетом (2) соотношение (4) примет вид:

$$\Delta I_x(p_x, p_y) = \sum_{i=-M}^{M-p_x} \sum_j (2i+p_x) (f_{i,j}'' f_{i+p_x, j+p_y}'' - f_{i,j}' f_{i+p_x, j+p_y}'). \quad (6)$$

Из всего диапазона строк с номерами  $j \in [-N; N]$  вклад в  $\Delta I_x(p_x, p_y)$  вносит только одна нулевая строка, что соответствует одномерному случаю, рассмотренному в [5]. На рис. 3 сплошной линией показано сечение  $\Delta I_x(p_x, p_y)$  при  $p_y = 0$ , полностью совпадающее с графиком  $\Delta \varphi(k)$  в [5].

Если  $p_y \neq 0$ , то  $f''_{i,j} \neq f''_{i+p_x, j+p_y}$ ,  $f'_{i,j} \neq f'_{i+p_x, j+p_y}$ , и для отсчетов видеосигнала кадра возможны три соотношения:

1.  $f''_{i,j} = a$ ,  $f''_{i+p_x, j+p_y} = b$ , тогда

$$\Delta I_x(p_x, p_y) = \sum_{i=-M}^{M-p_x} \sum_j (2i + p_x)(a f''_{i+p_x, j+p_y} - a f'_{i+p_x, j+p_y}) = a \sum_{i=-M}^{M-p_x} \sum_j (2i + p_x) \Delta f_{i+p_x, j+p_y}. \quad (7)$$

2.  $f''_{i,j} = b$ ,  $f''_{i+p_x, j+p_y} = a$ , тогда

$$\Delta I_x(p_x, p_y) = \sum_{i=-M}^{M-p_x} \sum_j (2i + p_x)(a f''_{i,j} - a f'_{i,j}) = a \sum_{i=-M}^{M-p_x} \sum_j (2i + p_x) \Delta f_{i,j}. \quad (8)$$

3.  $f''_{i,j} = f''_{i+p_x, j+p_y} = a$ , тогда

$$\Delta I_x(p_x, p_y) = \sum_{i=-M}^{M-p_x} \sum_j (2i + p_x)(a^2 - a^2) = 0.$$

Значения  $\Delta I_x(p_x, p_y)$  в первых двух случаях будут определяться при  $p_{y\_min} \leq p_y \leq p_{y\_max}$ . Величины  $p_{y\_max}$  и  $p_{y\_min}$  можно получить из условий  $p_{y\_max} - N = j_{об}$  и  $p_{y\_min} + N = j_{об}$ , где  $j_{об}$  – номер строки, в которой расположен объект.

Для примера, представленного на рис. 1:  $p_{y\_max} = 27$  и  $p_{y\_min} = -27$ . Если  $p_y \in \{-2N, \dots, p_{y\_min} - 1\} \cup \{p_{y\_max} + 1, \dots, 2N\}$ , то  $\Delta I_x(p_x, p_y) = 0$ . Если объект шириной в один пиксель движется горизонтально, то  $\Delta I_x(p_x, p_y) = const$  при фиксированном  $p_x$  и  $p_y \in \{p_{y\_min}, \dots, p_{y\_max}\}$  (см. рис. 4).

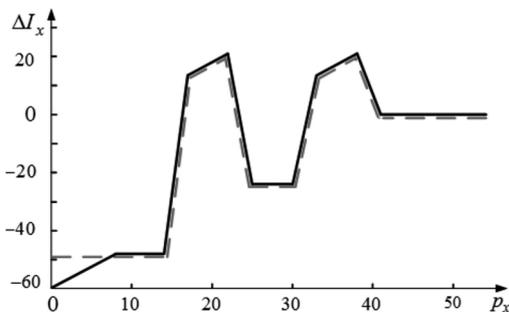


Рис. 3. Сечения фазоэнергетической функции: сплошная черная линия - график  $\Delta I_x(p_x, p_y = 0)$ ; штриховая серая линия - график  $\Delta I_x(p_x, p_y \neq 0, p_y \in \{p_{y\_min}, \dots, p_{y\_max}\})$

Отличия двух линий на рис. 3 возникают в области малых фаз  $p_x \in \{1, \dots, R - L\}$ , т.е. когда фаза  $p_x$  равна «длине» объекта и  $f_{i,j} = f_{i+p_x, j+p_y} = b$ . Следствием этого является рост абсолютной величины  $\Delta I_x(p_x, p_y)$ . Для  $p_y \neq 0, p_y \in \{p_{y\_min}, \dots, p_{y\_max}\}$  подобная ситуация исключена, и варьирование  $p_y$  никак не влияет на изменение  $\Delta I_x(p_x, p_y)$  при фиксированном  $p_x$ .

Проанализируем фазоэнергетическую функцию  $\Delta I_y(p_x, p_y)$ :

$$\Delta I_y(p_x, p_y) = \sum_{i=-M}^{M-p_x} \sum_j (2j + p_y)(f''_{i,j} f''_{i+p_x, j+p_y} - f'_{i,j} f'_{i+p_x, j+p_y}). \quad (9)$$

Для графика функции  $\Delta I_y(p_x, p_y)$  характерно наличие двух возвышенностей и двух низменностей, симметричных относительно  $p_x = (2M + 1)/2$ , причем  $\Delta I_y(p_x; p_y = 0) = 0$ .

Рассмотрим классификацию областей фазы  $p_x$ , аналогичную приведенной в работах [4, 5]: область верхних фаз, спуски, вершины и подъемы дальней (от начала координат) и ближней возвышенностей, а также седловину и область малых фаз.

Исследуем особенности функции  $\Delta I_y(p_x, p_y)$  отдельно в каждой из областей.

В области верхних фаз  $\Delta I_y(p_x > M + R; p_y) = 0$ , т.к.

$f_{i,j} = f_{i+p_x, j+p_y} = a$  в обоих кадрах. По величине  $p_{x\_max} = M + R$  можно найти правый край объекта  $R$ .

Область спуска дальней (от начала координат) возвышенности формируется при  $p_x \in \{M + R - d_h + 1, \dots, M + R\}$ . Тогда для  $i + p_x \in \{R - d_h + 1, \dots, R\}$ ,  $j + p_y = 0$  функцию (9) можно переписать в виде:

$$\Delta I_y(p_x, p_y) = -\frac{ac}{2}(2M - p_x + 1)(2N - p_y + 1)(2N - p_y), \quad (10)$$

где  $c = b - a$  – контраст объекта и фона.

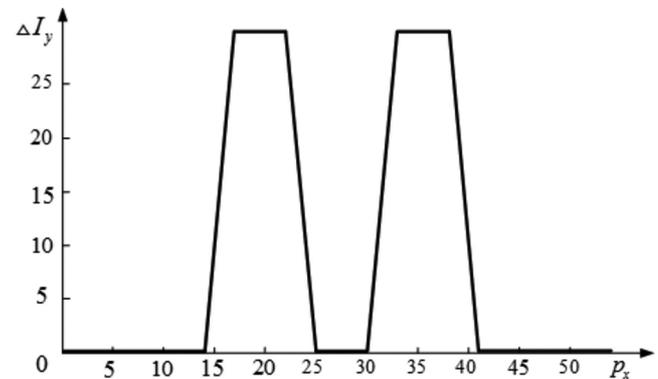
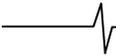


Рис. 4. Сечение  $\Delta I_y(p_x, p_y)$  при некотором фиксированном значении  $p_y$



В диапазоне фаз  $p_x \in \{M + L, \dots, M + R - d_h\}$  формируется *вершина дальней возвышенности*, которая, согласно (9), описывается выражением:

$$\Delta I_y(p_x, p_y) = -acd_h \sum_j (2j + p_y). \quad (11)$$

Измеряя протяженность области вершины дальней возвышенности на рис. 4, можно найти левую границу  $L$  объекта из выражения  $(M + R - d_h) - (M + L)$ . Величина смещения объекта  $d_h$  численно равна количеству отсчетов, формирующих спуск дальней возвышенности.

Представляет интерес поведение  $\Delta I_y(p_x, p_y)$  при некотором фиксированном  $p_x \in \{M + L, \dots, M + R - d_h\}$  (рис. 5). Определив границы  $p_{y\_min}$  и  $p_{y\_max}$  области, в которой  $\Delta I_y(p_x = const; p_y) \neq 0$ , можно найти номер строки  $j_{об}$ , в которой расположен объект, используя соотношения:  $p_{y\_max} - N = j_{об}$  или  $p_{y\_min} + N = j_{об}$ . При движении объекта по оси абсцисс (рис. 1)  $j_{об} = 0$ , поэтому  $|p_{y\_max}| = |p_{y\_min}|$ .

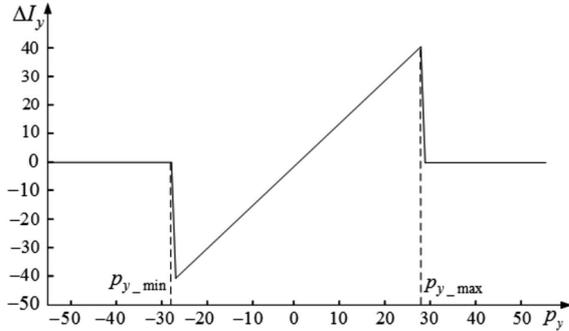


Рис. 5. Сечение  $\Delta I_y(p_x = const; p_y)$  для  $p_x \in \{M + L, \dots, M + R - d_h\}$

В области фаз  $p_x \in \{M + L - d_h, \dots, M + L - 1\}$  наблюдается подъем дальней возвышенности. Рассматривая три множества для  $i + p_x$ :  $\{L - d_h, \dots, L - 1\}$ ,  $\{L, \dots, R - d_h\}$  и  $\{R - d_h + 1, \dots, R\}$ , при условии  $j + p_y = 0$  получаем:

$$\Delta I_y(p_x, p_y) = ac(M + L - p_x - d_h) \sum_j (2j + p_y). \quad (12)$$

Положение левого края объекта во втором кадре  $L - d_h$  связано с границей фазы  $p_x \geq M - L + d_h + 1$ , при которой справедливо равенство  $f''_{i,j} = f'_{i,j} = a$ . Если  $p_x = M - L + d_h$ , то  $f''_{i,j} = a$  или  $f''_{i,j} = b$ .

Область фаз  $\{M - (L - d_h) + 1, \dots, M + (L - d_h) - 1\}$  «зажата» между ближней и дальней возвышенностями и может именоваться седловиной (по аналогии с межпульсной областью для одномерного случая [5]).

В диапазоне фаз  $p_x \in \{M - (L - 1), \dots, M - (L - d_h)\}$  наблюдается спуск ближней возвышенности. При этом ФЭФ определяется соотношением:

$$\Delta I_y(p_x, p_y) = ac(M - L - p_x + d_h + 1) \sum_j (2j + p_y). \quad (13)$$

При  $p_x \in \{M - (R - d_h), \dots, M - L\}$  формируется *вершина ближней возвышенности*. ФЭФ на данном участке задается выражением:

$$\Delta I_y(p_x, p_y) = -ac(M - R - p_x + d_h) \sum_j (2j + p_y). \quad (14)$$

Дальнейшее уменьшение фазы  $p_x$  от  $M - (R - d_h + 1)$  до  $M - R$  приводит к появлению очередной области – области *подъема ближней возвышенности*. Выражение ФЭФ для нее будет иметь вид:

$$\Delta I_y(p_x, p_y) = ac(R - L + 1) \sum_j (2j + p_y). \quad (15)$$

В области малых фаз  $p_x \in \{1, \dots, M - (R + 1)\}$  функция  $\Delta I_y(p_x, p_y)$  принимает нулевые значения.

## II. Движение объекта с ненулевой вертикальной координатой

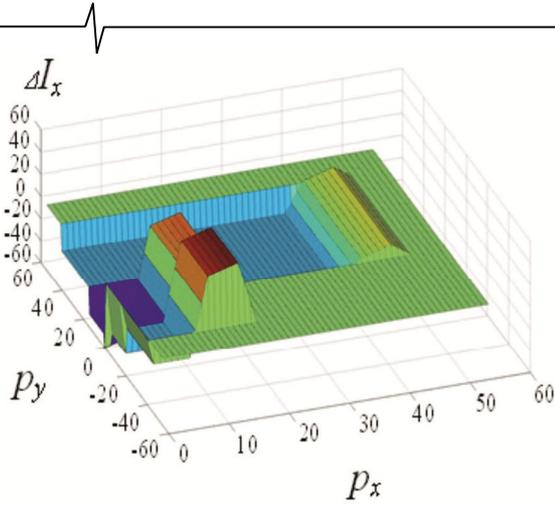
Рассмотрение движения объекта строго «по оси абсцисс» позволяет выявить главные особенности функций  $\Delta I_x(p_x, p_y)$  и  $\Delta I_y(p_x, p_y)$ . Исследуем ФЭФ для случая, когда объект имеет ненулевую вертикальную координату.

Будем рассматривать видеопоследовательность, содержащую объект прямоугольной формы, перемещающийся по горизонтали влево на  $d_h$  пикселей. Координаты объекта в первом кадре:  $R$  – правый край,  $L$  – левый край; во втором кадре:  $(R - d_h)$  и  $(L - d_h)$  соответственно. Вертикальная координата объекта остается неизменной  $V = const$ ; размеры объекта  $(R - L + 1) \times 1$  пиксель.

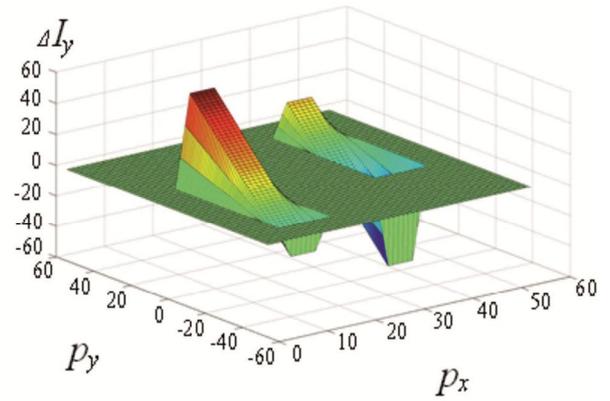
На рис. 6 представлены графики ФЭФ для данного случая. В качестве исходных данных при моделировании были приняты следующие значения:  $R = 20$ ,  $L = 13$ ,  $V = 13$ ,  $d_h = 3$ ,  $M = N = 27$ .

Сравнение поверхностей на рис. 2а и рис. 6а показывает, что «пространственное положение» дальней возвышенности изменилось относительно оси  $p_y$ , но не претерпела изменения ее форма, а у ближней возвышенности изменились как положение, так и форма. Поскольку координаты объекта в соседних кадрах и величина перемещения  $d_h$  в обоих случаях были одинаковыми, области, формирующие дальнюю возвышенность на оси  $p_x$ , остались неизменными.

Анализ рис. 6а показывает, что наибольшие изменения функции  $\Delta I_x(p_x, p_y)$  произошли в области ближней возвышенности: несмотря на сохранение горизонтальных границ  $p_x \in \{M - R, \dots, M - (L - d_h)\}$ , возвышенность сегментирована по оси  $p_y$  на два участка. На рис. 7 представлены сечения этих участков при  $p_y = 0$  и некотором  $p_y \in \{-(N + V), \dots, -(N - V + 1)\}$ , причем график  $\Delta I_x(p_x; p_y = 0)$  полностью совпадает с соответствующей зависимостью при движении с нулевой вертикальной координатой.



а)  $\Delta I_x(p_x, p_y)$



б)  $\Delta I_y(p_x, p_y)$

Рис. 6. Фазоэнергетические функции для случая горизонтального движения прямоугольного объекта

Поясним изменения  $\Delta I_x(p_x, p_y)$  в области ближней возвышенности с помощью рис. 8, на котором представлены сечения фазоэнергетической функции  $\Delta I_x$  при  $p_x = const$  для случая  $V = 0$  (серая пунктирная линия) и  $V \neq 0$  (черная сплошная линия) соответственно.

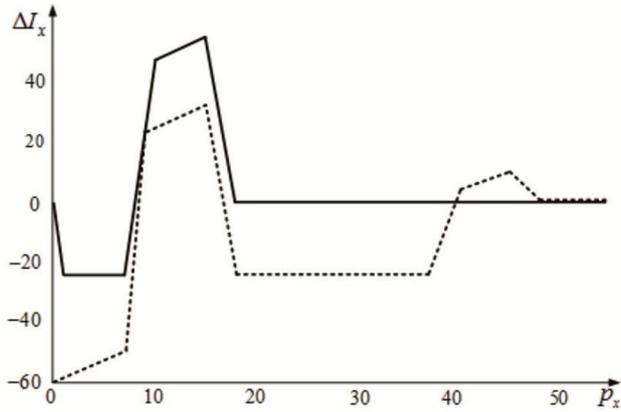


Рис. 7. Сечения  $\Delta I_x(p_x, p_y)$  при  $p_y = 0$  (серая пунктирная линия)

и при  $p_y \in \{-(N+V), \dots, -(N-V+1)\}$  (черная сплошная линия)

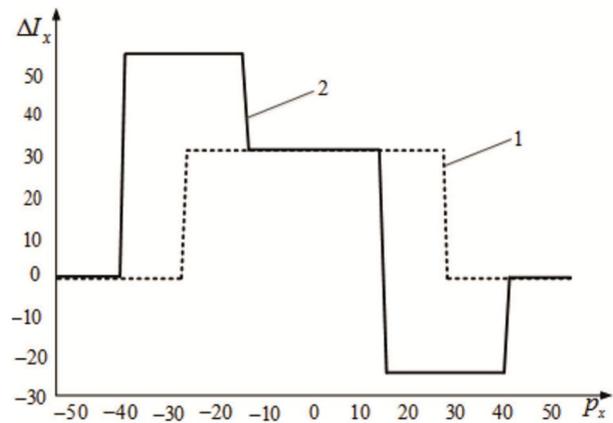


Рис. 8. Сечения  $\Delta I_x$  для  $p_x \in [M-(R-d_h); M-L]$ : пунктирная черная линия – при  $V = 0$ , сплошная серая линия – при  $V \neq 0$

Рассмотрим формирование  $\Delta I_x(p_x, p_y)$  при  $V \neq 0$ .

В области фаз  $p_y > N+V$  все пиксели, участвующие

в формировании ФЭФ, будут принадлежать фону, следовательно,  $\Delta I_x(p_x, p_y) = 0$ . При значениях фазы  $p_y \in \{N-V+1, \dots, N+V\}$  имеет место равенство  $f''_{i,j} = f'_{i,j} = a$ , но отсчеты  $f''_{i+p_x, j+p_y}$  и  $f'_{i+p_x, j+p_y}$  могут принимать значения яркости как объекта, так и фона. Поскольку объект имеет единичную «толщину», то отсчеты фазоэнергетической функции будут формироваться только при  $j = V - p_y$ . Тогда:

$$\Delta I_x(p_x, p_y) = 2acd_h(L-R-1). \quad (16)$$

В диапазоне  $p_x \in \{M-(R-d_h), \dots, M-L\}$ , соответствующему вершине ближней возвышенности, величины  $f''_{i,j}$  и  $f'_{i,j}$  могут принимать значения яркости объекта  $b$  при  $i \in \{L-d_h, \dots, L-1\} \cup \{L, \dots, R-d_h\}$ . В области положительных фаз  $p_y \in \{1, \dots, N-V\}$  ФЭФ имеет «дополнительные» слагаемые

$$\Delta I_x^* = \sum_{i=L-d_h}^{L-1} \sum_{j=-N}^{N-p_y} (2i+p_x)(ba-a^2), \text{ определяемые усло-}$$

вием:

$$\begin{cases} L-d_h \leq i \leq M-p_x^* \\ j = V, \end{cases} \quad (17)$$

где  $p_x^* = M-(R-d_h)$  – минимальное значение фазы для вершины ближней возвышенности.

Таким образом, ФЭФ для  $p_y \in \{1, \dots, N-V\}$  будет иметь вид:

$$\Delta I_x(p_x, p_y) = \Delta I_x^* + 2acd_h(L-R-1) = acd_h(4L-2R-d_h+p_x-3). \quad (18)$$

Формирование значения  $\Delta I_x$  при  $p_y = 0$  инвариантно к изменению вертикальной координаты объекта и рассмотрено выше.

В диапазоне фаз  $p_y \in \{-(N+V), \dots, -(N-V+1)\}$  необходимо рассмотреть лишь область  $i \in \{L-d_h, \dots, L-1\}$ ,  $j = V$ . В этом случае:

$$\Delta I_x \Big|_{p_x \in \{M-(R-d_h), \dots, M-L\}} = acd_h(2L-d_h-1+p_x). \quad (19)$$

Очевидно, что  $\Delta I_x(p_x; p_y < -(N+V)) = 0$ .

Определяя по функции  $\Delta I_x$  значения максимальной и минимальной фаз  $p_{y\_max} = N+V$  и  $p_{y\_min} = -(N+V)$ , можно найти вертикальную координату  $V$  объекта.

В общем случае величина горизонтального перемещения объекта между кадрами может принимать значения  $0 \leq d_h \leq R-L$  или  $d_h > R-L$ . В первом случае объекты в соседних кадрах попадают в одну и ту же область от  $L$ -го пикселя до  $R-L+1-d_h$  пикселя. Во втором случае, если  $f''_{k,l} = f'_{s,t} = b$ , то  $(k,l) \neq (s,t)$ . Определение величины перемещения  $d_h$  имеет исключительно важную практическую ценность и может использоваться, например, при оценке скорости перемещения объекта при известной частоте следования кадров.

На рис. 9 приведены результаты моделирования для нескольких значений величины перемещения  $d_h = 1, 2, 3, 5, 7$  и  $9$  пикселей (соответственно, линии № 1, 2, 3, 4 и 5).

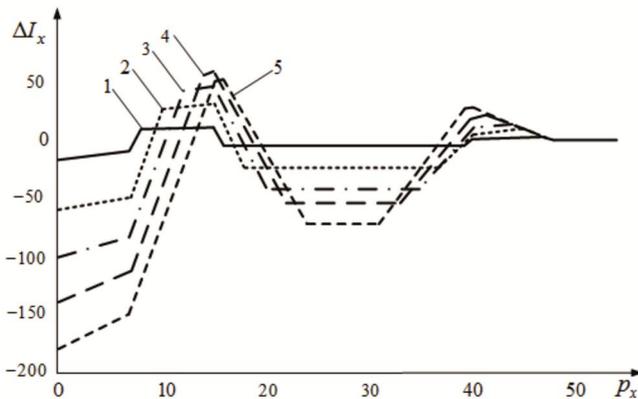


Рис. 9. Зависимости  $\Delta I_x(p_x, p_y)$ , полученные при различных значениях  $d_h$

Графики на рис. 9 имеют более заметные изменения в области ближней возвышенности, чем изменения в области дальней возвышенности. В частности, наблюдается расширение зон подъема и спуска, сокращение области вершины ближней возвышенности при увеличении  $d_h$ . Для всех линий сохраняется левая граница подъема ближней возвышенности  $p_x = M - R$ . Левая граница области спуска для линии № 5 отличается от границ первых четырех линий, что можно объяснить тем, что величина перемещения объекта в двух соседних кадрах равна длине объекта  $R-L+1$  или превышает ее, т.е. «перекрытие» объекта в соседних кадрах отсутствует.

Анализ рис. 6 б показывает, что движение объекта с  $V \neq 0$  приводит к существенному изменению отсчетов  $\Delta I_y(p_x, p_y)$  в областях ближней и дальней возвышенностей. Кроме того, нарушается симметрия расположения «положительных» и «отрицательных» участков ближней и дальней возвышенностей относительно  $p_y = 0$ . Выше было показано, что в случае движения объекта с нулевой вертикальной координатой ФЭФ будет нулевой при  $p_y = 0$  и любом  $p_x$ . Очевидно, что при  $V \neq 0$  это не выполняется:

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

$$= \begin{cases} 2V \sum_{i=-M}^{M-p_x} (f''_{i,j} f''_{i+p_x, j+p_y} - f'_{i,j} f'_{i+p_x, j+p_y}), & \text{при } j = V; \\ 0, & \text{при } j \neq V. \end{cases}$$

На практике анализ двух возвышенностей поверхности  $\Delta I_y(p_x, p_y)$  затруднителен в силу высоких вычислительных затрат, поэтому представляется целесообразным и обоснованным проводить анализ функции  $\Delta I_y$  по сечению  $p_y = 0$  (рис. 10). Аналитические выражения для сечений фазоэнергетической функции  $\Delta I_y(p_x, p_y)$  при  $p_y = 0$  и  $V \neq 0$  приведены в табл. 1, где диапазоны фаз именуется так же как и в одномерном случае [5].

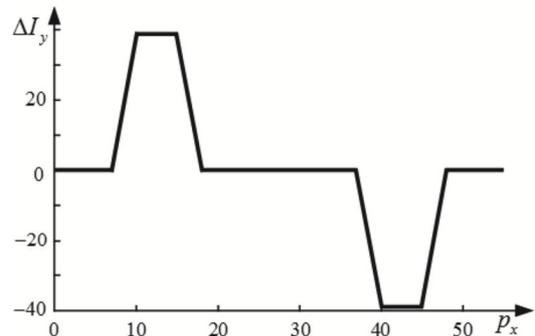


Рис. 10. Сечение  $\Delta I_y$  при  $p_y = 0$

Таблица 1. Аналитические выражения для сечений фазоэнергетической функции  $\Delta I_y$

№	Область фаз $p_x$	Сечения фазоэнергетической функции $\Delta I_y(p_x, p_y = 0)$
1.	Область верхних фаз $\{M+R+1; 2M\}$	0
2.	Область среза дальнего импульса $\{M+R-d_h+1; M+R\}$	$-2aVc(M+R-p_x+1)$
3.	Область вершин дальнего импульса $\{M+L; M+R-d_h\}$	$-2aVcd_h$
4.	Область фронтов дальнего импульса $\{M+L-d_h; M+L-1\}$	$2aVc(M+L-d_h-p_x)$
5.	Межимпульсная область $\{M-L+d_h+1; M+L-d_h-1\}$	0
6.	Область срезов ближнего импульса $\{M-L+1; M-L+d_h\}$	$2aVc(M-L+d_h-p_x+1)$
7.	Область вершин ближнего импульса $\{M-R+d_h; M-L\}$	$2aVcd_h$
8.	Область фронтов ближнего импульса $\{M-R; M-R+d_h-1\}$	$2aVc(R-M+p_x)$
9.	Область малых фаз	Определяется с учетом дополнительных условий

Наличие двух разнополярных импульсов на графиках сечений (рис. 10) свидетельствует о движении объекта с ненулевой вертикальной координатой. Если  $V > 0$ , то «ближний» от начала координат импульс имеет положительный знак, а дальний – отрицательный; если  $V < 0$  – наблюдается противоположная картина.

### Заключение

В работе приведены результаты исследования фазоэнергетических функций  $\Delta I_x(p_x, p_y)$  и  $\Delta I_y(p_x, p_y)$  для тестовых видеопоследовательностей, содержащих движущийся строго горизонтально объект типа «прямоугольник». Получены аналитические выражения для указанных функций и выполнен их подробный анализ по характерным областям фаз. Выявлены особенности фазоэнергетических функций для случая движения объекта с ненулевой вертикальной координатой. Показана возможность определения положения динамического объекта в кадрах видеоряда путем анализа особенностей графиков фазоэнергетических функций, что может быть использовано бортовой вычислительной системой носителя при решении задач идентификации движения.

### Литература

1. Мареев А.В., Орлов А.А., Рыжкова М.Н. Методы локализации объектов в видеопотоке. Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2021. № 3. С. 48-60.

2. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Ершов М.Д. Подходы к обнаружению и оценке параметров движущихся объектов на видеопоследовательности применительно к транспортно-аналитике. Компьютерная оптика. 2020. № 5. С. 746-756.

3. Фаворская М.Н., Пахирка А.И., Шилов А.С., Дамов М.В. Методы поиска движения в видеопоследовательностях. Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2009. № 1-2. С. 69-73.

4. Богословский А.В., Жигулина И.В., Сухарев В.А. Векторное поле фазоэнергетического спектра изображения и видеопоследовательности. Радиотехника. 2018. № 12. С. 13-17.

5. Жигулина И.В. Энергетические характеристики изображений и видеопоследовательностей. Телевидение: передача и обработка изображений: материалы 13-й Международной конференции. Санкт-Петербург: С.-Пб. ГЭУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 2016. С. 128-131.

6. Пономарев А.В., Богословский А.В., Жигулина И.В., Сухарев В.А. Особенности корреляционного анализа изображений и видеопоследовательностей. Журнал СВУ. Техника и технологии. 2018. № 11/7. С. 811-822.

7. Богословский А.В., Сухарев В.А., Жигулина И.В., Пантюхин М.А. Векторные поля, порождаемые преобразованием Фурье видеосигналов изображений. Радиотехника. 2021. Т. 85. № 7. С. 127-139.

## НОВЫЕ КНИГИ



**Косичкина Т.П., Сперанский В.С.**

**Цифровые сигнальные процессоры и их применение в системах телекоммуникаций и электроники: Учебное пособие для вузов - М.: Изд-во «Горячая линия-Телеком», 2022 г. 316 с.: ил.**

Рассмотрены вопросы теории и практики использования цифровых сигнальных процессоров. Описаны основные операции цифровой обработки сигналов, структура, архитектура, классификация и характеристики современных процессоров. Представлен обзор процессоров ведущих фирм-производителей: Analog Devices, Ceva, Feccsale, Texas Instruments. Отдельная глава посвящена российским цифровым процессорам. Существенное внимание уделено многоядерным процессорам и их характеристикам. В разделе, связанном с программируемыми логическими микросхемами и системами на кристалле показаны возможности их использования в качестве сигнальных процессоров. Даны примеры реализации цифровых устройств с помощью САПР на языке программирования VHDL, рассмотрены его элементы. В приложениях даны примеры реализации формирователей двоичных последовательностей, генераторов сигналов и медианных фильтров.

Для студентов радиотехнических и инфокоммуникационных специальностей, будет полезна аспирантам и специалистам.



**Брюханов Ю.А.**

**Динамика цифровых колебательных систем: Учебное пособие для вузов, 3-е изд. перераб. и доп. М.: Изд-во «Горячая линия-Телеком», 2020 г. 142 с.: ил.**

Изложена теория колебаний цифровых систем первого и второго порядков. Приведен математический аппарат, основанный на теории точечных отображений. Рассмотрены линейные и обусловленные переполнением и квантованием нелинейные свободные колебания и колебания при постоянном и гармоническом входных воздействиях. В третьем издании первый раздел дополнен разработанным автором методом анализа вынужденных колебаний в цифровых динамических системах при периодических входных воздействиях, а второй, четвертый и пятый разделы расширены вопросами, посвященными нелинейным искажениям гармонических сигналов в рекурсивных динамических системах с переполнением и квантованием. Результаты анализа проиллюстрированы траекториями движений, бифуркационными и вероятностными диаграммами.

Для студентов, обучающихся по направлению подготовки «Радиофизика», будет полезна студентам, обучающимся по укрупненной группе направлений подготовки 11.00.00 – «Электронная техника, радиотехника и связь».