



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 88 за 2016 г.



ISSN 2071-2898 (Print)  
ISSN 2071-2901 (Online)

Беклемишев Н.Д.

Оценка среднего  
параллакса  
стереоизображений

**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** Беклемишев Н.Д. Оценка среднего параллакса стереоизображений // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2016. № 88. 12 с. doi:[10.20948/prepr-2016-88](https://doi.org/10.20948/prepr-2016-88)  
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2016-88>

**Ордена Ленина  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ  
имени М.В.Келдыша  
Российской академии наук**

**Н.Д. Беклемишев**

**Оценка среднего параллакса  
стереоизображений**

**Москва — 2016**

**Беклемишев Н.Д.**

## **Оценка среднего параллакса стереоизображений**

Предлагается метод получения оценки среднего параллакса стереопары, основанный на сравнении значений сверток данных массивов яркостей с лапласианом гауссиана.

**Ключевые слова:** стерео зрение, обработка изображений, оконтуривание, БПФ

**Nikolai Dmitrievich Beklemishev**

## **Estimation of the mean disparity of stereo images**

The method of the estimation of the mean disparity of stereo images is considered. The method is based on the comparison of the Laplacian-Gaussian convolutions of the intensity arrays.

**Key words:** stereo vision, image processing, edge detection, FFT

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты 15-08-06431 и 16-08-01282.

## **Оглавление**

Введение .....	3
Оценка среднего параллакса .....	3
Частотная интерпретация .....	4
Схема вычислений с использованием БПФ.....	7
Поиск соответствующей точки по пирамидальной схеме .....	8
Подстройка по особенностям.....	10
Оценка качества соответствия .....	11
Библиографический список.....	12

## Введение

Вычисление параллакса является фундаментальной проблемой обработки изображений. Известно много методов такого вычисления. В частности, классической является оценка параллакса по максимуму корреляционной функции [1]. Известны также методы, основанные на совмещении предварительно выделенных деталей левого и правого изображений, в частности, контуров объектов. Многие данные говорят о том, что так устроено биологическое зрение [2], [3]. Один из способов получить контуры объектов – вычислить свертку массива яркости изображения с маской «лапласиан гауссиана»  $\Delta g_\sigma$ . Здесь  $\Delta$  – оператор Лапласа,

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2},$$

$$g_\sigma(x, y) = \exp(-(x^2 + y^2)/(2\sigma^2)).$$

При этом линии нулевого уровня свертки соответствуют контурам объектов, выделенным «с точностью до деталей размера меньше  $\sigma$ ». Третья группа методов основана на выделении в спектре левого и правого изображений некоторой полосы частот и оценке разности фаз в этой полосе [4].

Предлагаемый метод совмещает 1-й и 2-й подходы. Кроме того, мы рассмотрим его с точки зрения, принятой в третьей группе методов, т.е. в частотной области. Численная реализация, основанная на использовании быстрого преобразования Фурье (БПФ) [5], требует порядка  $O(N^2 \log N)$  операций. Здесь  $N$  – длина строки левого и правого изображений.

Полученная оценка параллакса может быть непосредственно или итеративно использована для вычисления матрицы высот, анализа движения (когда «левым» и «правым» изображениями являются, например, последовательные кадры видео), анализа текстур (когда сравниваются различные фрагменты одного и того же изображения [6]) и т.д.

Результаты настоящей работы были частично опубликованы в электронном виде в материалах конференции [7].

## Оценка среднего параллакса

Пусть функции  $f_1(\mathbf{x})$  и  $f_2(\mathbf{x})$  описывают данные массивы яркостей левого и правого изображений,  $\mathbf{x} = (x, y)$  – точка изображения. Положим

$$u_1 = f_1 * \Delta g_\sigma, \quad u_2 = f_2 * \Delta g_\sigma.$$

Здесь звездочкой обозначена свертка.

В качестве оценки среднего смещения правого изображения относительно левого мы принимаем значение вектора  $\mathbf{h}$ , при котором достигается максимум корреляционной функции

$$w(\mathbf{h}) = \int_{-\infty}^{+\infty} u_1(\mathbf{x})u_2(\mathbf{x} + \mathbf{h})d\mathbf{x} \rightarrow \max.$$

На рисунках 1 и 2 – пример изображений стереопары. На рис. 3 – использованная маска  $\Delta g_\sigma$ . На рис. 4 и 5 – соответствующие массивы  $u_1$  и  $u_2$ . Отрицательные значения показаны темным, положительные – светлым цветом. На рис. 6 – корреляционная функция  $w$ . Стрелочкой на рис. 6 обозначена точка максимума  $w$ . На рис. 1 стрелочка – в центре изображения, на рис. 2 – в точке, смещенной относительно центра на вычисленный вектор параллакса  $\mathbf{h}$ .



Рис. 1. Левое изображение

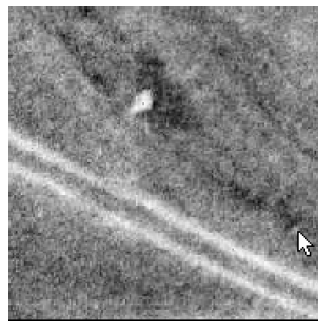


Рис. 2. Правое изображение

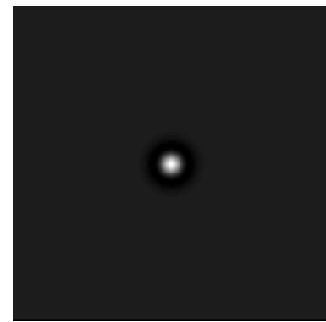


Рис. 3. Маска лапласиан гауссиана

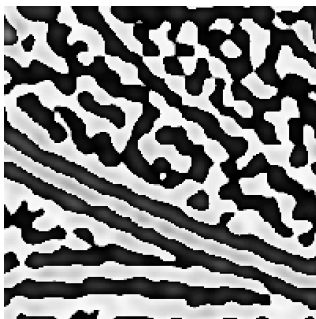


Рис. 4. Свертка левого изображения с маской

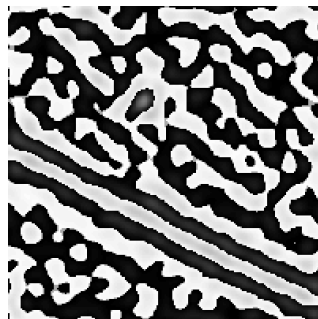


Рис. 5. Свертка правого изображения с маской

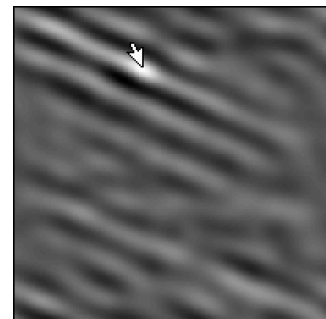


Рис. 6. Корреляционная функция сверток

## Частотная интерпретация

Мы обозначим

$$f^{\wedge}(\boldsymbol{\omega}) = F[f](\boldsymbol{\omega}) = (2\pi)^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-i\boldsymbol{\omega}\mathbf{x})f(\mathbf{x})d\mathbf{x} \quad (1)$$

двумерное преобразование Фурье функции  $f$ , и, соответственно,

$$f(\mathbf{x}) = F^{-1}[f^{\wedge}](\mathbf{x}) -$$

обратное преобразование Фурье. Тогда:

$$F[g_\sigma](\omega) = \sigma^2 g_{1/\sigma}(\omega), \quad F[\Delta g_\sigma](\omega) = -\sigma^2 \omega^2 g_{1/\sigma}(\omega).$$

Свертке функций соответствует произведение Фурье-образов:

$$F[f * h](\omega) = f^\wedge(\omega)h^\wedge(\omega), \quad F[f * \Delta g_\sigma](\omega) = -\sigma^2 \omega^2 g_{1/\sigma}(\omega)f^\wedge(\omega).$$

На рис. 7 и 8 показан вид центральной части графиков  $\Delta g_\sigma$  (рис. 7 соответствует рис. 3) и  $|F[\Delta g_\sigma]|$ . На рис. 9 и 10 представлен модуль Фурье-образа функции  $f_1$ . Точнее, показан график  $\ln(1 + |F[f_1](\omega)|)$ . По вертикали выбран логарифмический масштаб, чтобы поместился центральный максимум. На рис. 11 показан модуль произведения  $F[f_1]F[\Delta g_\sigma]$ , то есть модуль  $F[u_1]$ .

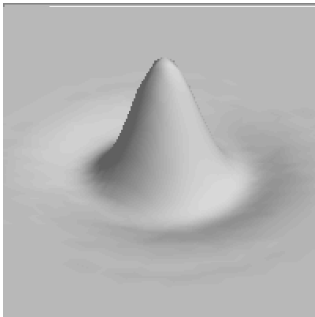


Рис. 7. Лапласиан гауссиана

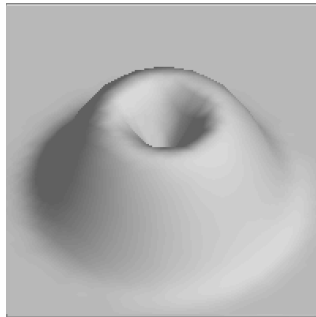


Рис. 8. Фурье-образ лапласиана гауссиана

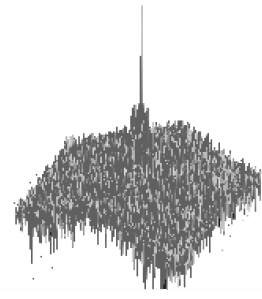


Рис. 9. Фурье-образ левого изображения

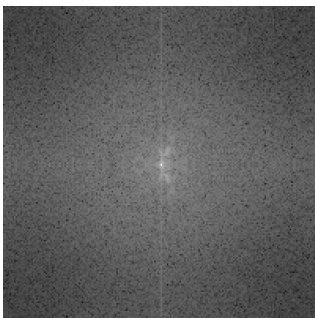


Рис. 10. Фурье-образ левого изображения

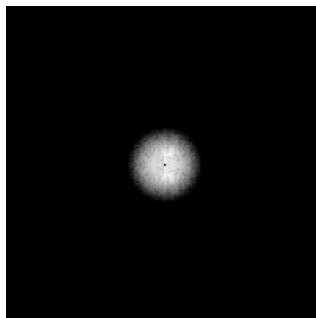


Рис. 11. Фурье-образ свертки левого изображения

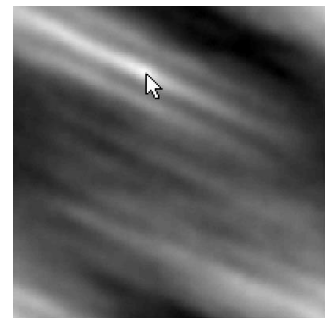


Рис. 12. Классическая корреляционная функция

Мы видим, что свертка с маской  $\Delta g_\sigma$  соответствует выделению некоторого диапазона частот в спектре изображения. Низкие и высокие частоты подавляются. Максимум  $|F[\Delta g_\sigma]|$  («середины полосы пропускания») соответствует  $|\omega| = 2^{1/2}\sigma^{-1}$ . Нас интересуют детали левого изображения, для которых имеются соответствующие на правом изображении. Подбирая

значение параметра  $\sigma$ , мы можем добиться того, что интересующие нас детали описываются гармониками с частотами по модулю близкими к значению  $2^{1/2}\sigma^{-1}$ . Такая фильтрация позволяет исключить из рассмотрения несущественные детали, соответствующие высокочастотной части спектра. Также исключаются различия в среднем тоне изображения, соответствующие низкочастотной части.

Для сравнения на рис. 12 показана корреляционная функция

$$c(\mathbf{h}) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_1(\mathbf{x})f_2(\mathbf{x} + \mathbf{h})d\mathbf{x}.$$

По сравнению с функцией  $c(\mathbf{h})$  функция  $w(\mathbf{h})$ , вычисленная по сверткам  $u_1$  и  $u_2$ , имеет более четко выраженный максимум.

Вычислим преобразование Фурье корреляционной функции  $F[w]$ . Имеем, поскольку  $u_1$  вещественно:

$$F[w] = (2\pi)u_1^{\wedge*}u_2^{\wedge} \quad (2)$$

где звездочкой обозначено комплексное сопряжение. Таким образом,

$$w(\mathbf{h}) = (2\pi)F^{-1}[u_1^{\wedge*}u_2^{\wedge}](\mathbf{h}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(i\boldsymbol{\omega}\mathbf{h})u_1^{\wedge*}(\boldsymbol{\omega})u_2^{\wedge}(\boldsymbol{\omega})d\boldsymbol{\omega}.$$

Следующая частотная интерпретация вектора  $\mathbf{h}$ , дающего максимум  $w(\mathbf{h})$ , приводится в [8]. Мы ищем значение «коррекции фазы»  $(\boldsymbol{\omega}\mathbf{h})$ , максимизирующее внутреннее произведение спектров функций  $u_1$  и  $u_2$ , то есть  $\arg[u_2^{\wedge}(\boldsymbol{\omega})]$  «подкручивается» так, чтобы сумма квадратов различий в спектрах после подкрутки стала минимальной.

Подставляя в (2) выражения  $u_1^{\wedge}$  и  $u_2^{\wedge}$  через  $f_1$  и  $f_2$ , получаем:

$$F[w] = (2\pi)\sigma^4|\boldsymbol{\omega}|^4(g_{1/\sigma}(\boldsymbol{\omega}))^2f_1^{\wedge*}(\boldsymbol{\omega})f_2^{\wedge}(\boldsymbol{\omega}) \quad (3)$$

Из (3) следует, что корреляционная функция  $w(\mathbf{h})$  полностью определяется корреляционной функцией  $c(\mathbf{h})$  и параметром маски  $\sigma$ . Действительно, аналогично (2) получаем, что  $F[c] = (2\pi)f_1^{\wedge*}f_2^{\wedge}$ , и, с точностью до постоянного множителя,  $w$  есть свертка  $c$  и Фурье-прообраза первого сомножителя в (3), то есть

$$w = c * ((\Delta g_{\sigma}) * (\Delta g_{\sigma})) = c * (\Delta^2 g_{\sigma\sqrt{2}}).$$

## Схема вычислений с использованием БПФ

Далее предполагаем, что данные массивы яркостей  $f_1$  и  $f_2$  – квадратные с длиной строки и длиной столбца, равной  $N$ , причем  $N$  является степенью двойки,  $N = 2^m$ . Дискретное преобразование Фурье одномерного массива  $a_k$ ,  $k = 0, \dots, N - 1$ , определяется как

$$b_s = N^{-1/2} \sum_{k=0}^{N-1} \exp(-2\pi i k s / N) a_k, s = 0, \dots, N - 1.$$

Мы будем писать  $b = D(a)$ . Обратное преобразование находится как

$$a = D^{-1}(b) = (D(b^*))^*.$$

Известна схема вычисления  $D(a)$  с числом операций порядка  $O(N \log N)$  (БПФ). Дискретное преобразование Фурье двумерного массива  $f(\mathbf{k})$  находится с помощью последовательного применения одномерного преобразования Фурье сначала ко всем строкам, а затем ко всем столбцам данного массива, то есть

$$f^{\wedge}(\mathbf{s}) = N^{-1} \sum \exp\left(-\frac{2\pi i \mathbf{k} \mathbf{s}}{N}\right) f(\mathbf{k}). \quad (4)$$

Здесь  $\mathbf{k}$  и  $\mathbf{s}$  – целочисленные точки из квадрата  $[0, N - 1] \times [0, N - 1]$ . Суммирование ведется по всем целочисленным точкам этого квадрата. Мы будем использовать (4) как приближение для (1) при  $\boldsymbol{\omega} = 2\pi \mathbf{s} / N$  (с точностью до постоянного множителя). Тогда, используя (3) и выражение  $\boldsymbol{\omega}$  через  $\mathbf{s}$ , получим, с точностью до положительного постоянного множителя:

$$F[w](\mathbf{s}) = |\mathbf{s}|^4 (g_{1/\sigma}(2\pi \mathbf{s} / N))^2 f_1^{\wedge*}(\mathbf{s}) f_2^{\wedge}(\mathbf{s}) \quad (5)$$

Отсюда следует такая схема для нахождения точки максимума корреляционной функции.

- А) Вычисляем БПФ массивов  $f_1(\mathbf{k})$  и  $f_2(\mathbf{k})$ . Получаем массивы  $f_1^{\wedge}(\mathbf{s})$  и  $f_2^{\wedge}(\mathbf{s})$ .
- Б) Вычисляем поэлементное произведение  $f_1^{\wedge}(\mathbf{s})$  и  $f_2^{\wedge}(\mathbf{s})$ .
- В) Умножаем поэлементно полученный в п. Б) массив на маску

$$|\mathbf{s}|^4 (g_{1/\sigma}(2\pi \mathbf{s} / N))^2 = |\mathbf{s}|^4 \exp(-4\pi^2 \sigma^2 |\mathbf{s}|^2 N^{-2}).$$

Получаем массив  $F[w](\mathbf{s})$ .

- Г) Вычисляем обратное БПФ полученного массива. Получаем искомый массив  $w(\mathbf{k})$ .
- Д) Находим точку максимума  $\mathbf{k}_0$  массива  $w(\mathbf{k})$ . Вектор  $\mathbf{k}_0$  – искомое значение параллакса, выраженное в пикселях массива.



Схема состоит из трех БПФ массива  $N \times N$ , двух поэлементных умножений и одного вычисления максимального элемента массива. Таким образом, вычислительные затраты составляют  $O(N^2 \log N)$ .

При дискретном преобразовании Фурье произведению Фурье-образов соответствует циклическая свертка массивов. Поэтому векторам параллаксов с отрицательными координатами в интервале  $[-N/2, -1]$  будут соответствовать точки максимума массива  $w(\mathbf{k})$ , с координатами в интервале  $[N/2, N - 1]$ . В частности, описанный метод позволяет однозначно определять средний параллакс только со значениями координат по модулю меньшими  $N/2$ .

### **Поиск соответствующей точки по пирамидальной схеме**

В качестве примера опишем использование метода для поиска соответствия для одной фиксированной точки, указанной на левом снимке стереопары.

Поиск точки состоит из некоторого числа однотипных итераций. Каждая итерация в качестве исходных данных получает приближенные значения координат соответствующей точки на правом снимке. Выходными данными являются уточненные координаты точки. Каждая следующая итерация на вход получает результат работы предыдущей итерации. Прогноз параллакса для первой итерации часто бывает известен. Например, в случае аэрофотосъемки бывает известно направление полета самолета относительно раstra и примерный процент перекрытия последовательных снимков. При отсутствии данных можно брать нулевой прогноз для параллакса, если ожидаемое значение меньше  $N/2$ . Результат работы последней итерации является ответом.

На каждой итерации формируются промежуточные левое и правое изображения. Эти изображения всегда квадратные с одинаковой длиной строки и столбца, равной  $M = 2^m$ . При этом  $M$  фиксировано (не меняется при переходе к новой итерации) и не очень велико, обычно  $32 \leq M \leq 256$ . В то же время размер основных растров стереопары  $N$  может быть достаточно большим, порядка десятков тысяч пикселей. Промежуточное изображение получается из некоторого прямоугольника на основном изображении с помощью прореживания. Центр прямоугольника на левом изображении выбирается в данной точке. Центр прямоугольника на правом изображении выбирается в точке, которая является приближением для соответствующей точки на входе итерации. Сторона прямоугольника одинакова для левого и для правого изображения. При переходе к следующей итерации сторона прямоугольника уменьшается в фиксированное число раз. Проще всего брать коэффициент, равный 2, хотя практически надежность работы увеличивается, если брать коэффициент уменьшения окрестности между итерациями, меньший 2, например, 1,5. На первой итерации сторона прямоугольника обычно выбирается равной стороне (например, строке) исходного раstra. Итерации

заканчиваются, когда сторона прямоугольника станет меньше некоторого фиксированного значения. Если приходится рассматривать прямоугольник со стороны, меньшей  $M$ , то вместо прореживания используется интерполяция.

Для промежуточных изображений вычисляется вектор среднего сдвига по схеме, описанной в п. 4. Далее этот вектор сдвига умножается на коэффициент масштабирования данной итерации, равный отношению (сторона прямоугольника) /  $M$ , и прибавляется к точке, являющейся прогнозом. Полученная точка является результатом работы итерации.

Параметр маски  $\sigma$ , выраженный в пикселях промежуточного изображения, не меняется между итерациями. Желательно выбрать этот параметр так, чтобы на стороне промежуточного изображения, равной  $M$ , укладывалось 4 – 5 волн, соответствующих середине полосы пропускания. Иначе говоря, в терминах изображений  $u_1$  и  $u_2$ , среднее расстояние между контурами должно быть порядка  $M/8 \sim M/10$ . Таким образом, подходящим значением  $\sigma$  является  $2^{1/2}M/4 \sim 2^{1/2}M/5$ . Отсюда следуют ограничения на  $M$ . При  $M < 32$  расстояние между контурами станет меньше 3 пикселей, и трудно ожидать хорошего результата. В то же время при значениях  $M > 256$  (среднее расстояние между контурами  $> 20$  пикселей) в полосе пропускания практически не прибавляется новых деталей по сравнению с  $M = 256$ .

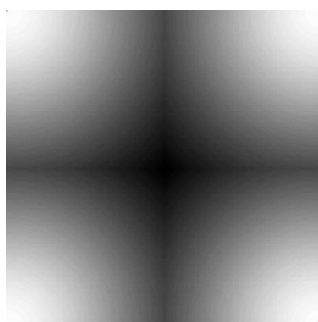
Может оказаться так, что на какой-то итерации пространственно-частотное окно [9], соответствующее выбранному прямоугольнику и параметру маски  $\sigma$ , окажется полностью закрыто помехой на одном из изображений. Максимум функции  $w(\mathbf{k})$  окажется в случайной точке. При этом желательно, чтобы среднее смещение промежуточных изображений оказывалось нулевым, а не равным какому-то случайному значению. Тогда есть возможность того, что на следующих итерациях помеха выйдет за пределы пространственно-частотного окна и при этом значение параллакса для промежуточных изображений еще не будет превосходить  $M/2$ .

Поэтому можно всякий раз искать не точку максимума  $w(\mathbf{k})$ , а точку максимума некоторой другой функции  $w_1(\mathbf{k}) = w(\mathbf{k})v(\mathbf{k})$ , где  $v(\mathbf{k})$  убывает с ростом расстояния от точки  $\mathbf{k}$  до ближайшего угла массива. Поскольку при отсутствии помех обычно  $w(\mathbf{k})$  имеет четко выраженный максимум, точка максимума  $w_1(\mathbf{k})$  в этом случае не сильно отличается от точки максимума  $w(\mathbf{k})$ .

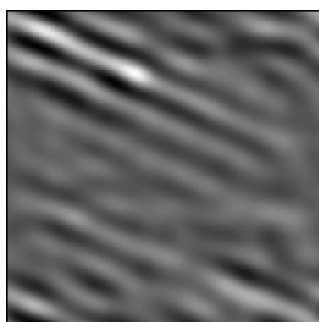
На рис.13 показан пример функции

$$v(k, l) = 1/(1 + 3(k_1^2 + l_1^2)/M^2), k_1 = \min(k, M - k), l_1 = \min(l, M - l).$$

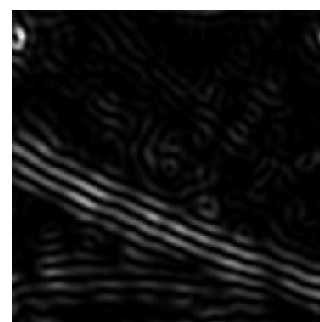
На рис.14 – функция  $w_1(\mathbf{k})$ , соответствующая такому выбору  $v(\mathbf{k})$  и функции  $w(\mathbf{k})$ , показанной на рис. 6.



*Рис. 13.*  
Стабилизирующая  
маска



*Рис. 14.*  
Корреляционная  
функция с наложенной  
стабилизирующей  
маской



*Рис. 15.* Квадрат модуля  
градиента свертки

## Подстройка по особенностям

Рассмотрим видоизменение предыдущего алгоритма для следующей задачи. Требуется на данной стереопаре найти пару соответствующих точек таким образом, чтобы левая точка лежала в заданной области левого изображения. Простейшим решением является такое. Надо зафиксировать левую точку в заданной области и применить алгоритм предыдущего параграфа для поиска правой точки. Это не всегда хорошо, так как левая точка может попасть на неинформативный участок изображения. Покажем, как изменить алгоритм таким образом, чтобы левая точка по возможности попадала на информативный участок, немного увеличив время работы.

Каждая итерация теперь будет получать на вход те же данные, что и раньше, положение точки на левом снимке и примерное положение соответствующей точки на правом снимке. На выходе, кроме уточненных координат соответствующей точки, будет выдаваться положение левой точки для следующей итерации. Оно не обязательно совпадает с тем, которое было на входе данной итерации. Примерное положение соответствующей правой точки для следующей итерации получается исходя из среднего параллакса, который был вычислен для данной итерации, и нового положения левой точки.

Новое положение левой точки предлагается вычислять исходя из максимума модуля градиента функции  $u_1$  (см. рис. 4). Максимум модуля градиента этой функции соответствует «наиболее четкому контуру», выделенному на левом изображении. Конечно, максимум нужно искать только по тем точкам промежуточного изображения, проекции которых на основной растр принадлежат заданной области допустимых положений для левой точки. Также лучше исключить из рассмотрения точки, лежащие ближе, чем на  $2\sigma$  к краю промежуточного изображения. На рис. 15 показан квадрат модуля градиента функции  $u_1$ .

В вычислительную схему А) – Д) добавится при этом вычисление функции  $u_1$  и вычисление градиента  $u_1$ . Вычисление функции  $u_1$  требует одного поэлементного умножения  $f_1(\mathbf{k})$  на маску  $F[\Delta g_\sigma](\boldsymbol{\omega}) = -\sigma^2 \boldsymbol{\omega}^2 g_{1/\sigma}(\boldsymbol{\omega})$  с получением массива  $F[u_1]$  и обратного преобразования Фурье массива  $F[u_1]$ . Порядок числа операций на каждой итерации остается равным  $O(N^2 \log N)$ .

## Оценка качества соответствия

Часто бывает полезно иметь какую-то численную оценку качества установленного соответствия между стереоизображениями. В качестве такой (эвристической) оценки предлагается взять отношение величины главного максимума корреляционной функции  $w$  ко второму по величине локальному максимуму  $w$ .

Практические результаты тестирования показывают, что в качестве порога можно выбирать значение этого отношения, равное или близкое к 2. Если отношение больше 2, то, как правило, изображения, совмещенные при помощи найденного вектора параллакса, действительно похожи с точки зрения человека.

Например, если левое и правое изображения априори могут быть развернуты друг относительно друга на некоторый угол и (или) иметь отличие в масштабах, то в такой ситуации изложенный выше метод непосредственно не применим: он служит только для оценки относительного сдвига изображений. Но можно последовательно провести сравнение по описанному алгоритму, например, выбранной окрестности на правом изображении и развернутой и отмасштабированной окрестности на левом изображении, для значений угла поворота и масштаба, выбираемых с некоторым шагом. После чего выбрать такие угол и масштаб, которые дают соответствие с наилучшим качеством.

Пределы изменения угла и масштаба в таком модифицированном алгоритме обычно выбираются на основании априорной информации. Например, относительный угол поворота по модулю может быть не больше  $30^\circ$ , а масштаб отличается не более чем на 10%. В то же время шаги изменения угла и масштаба определяются значением параметра  $\sigma$ , используемым в основном алгоритме, т.е. «средним расстоянием между контурами». Шаг следует выбирать таким, чтобы при повороте (соответственно растяжении) относительно центра изображения на один шаг контуры на его границе смещались не больше, чем на  $\sigma$ . То есть шаг изменения угла должен быть порядка  $d\alpha = (\pi/2)\sigma/N$ , шаг изменения масштаба порядка  $ds = \sigma/N$ .

\* \* \*

Мы рассмотрели способ вычисления среднего параллакса стереопары. Рассмотрено его применение для поиска соответствующей точки как при фиксированной точке левого изображения, так и в случае подстройки этой точки по особенностям изображения.

## Библиографический список

1. Mattocchia S., Tombari F., Di Stefano L. Fast full-search equivalent template matching by Enhanced Bounded Correlation // IEEE Transactions on Image Processing. 2008. V. 17(4). P. 528 – 538.
2. Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение. М.: Мир, 1990. 239 с.
3. Марр Д. Зрение. Информационный подход к изучению представления и обработки зрительных образов. М.: Радио и связь, 1987. 400 с.
4. Li-Dong Cai, Mayhew J.E.W. Estimating Mean Disparity of Stereo Images Using Shift-trials of Phase Differences // BMVC92: Proceedings of the British Machine Vision Conference / N.Y.: Springer, 1992. P. 237 – 247.
5. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М.: Наука, 1987. 600 с.
6. Chen P., Pavlidis T. Segmentation by Texture Using a Co-Occurrence Matrix and a Split-and Merge Algorithm // CGIP. 1979. V. 10. P. 172 – 182.
7. Kostin V. et al. Prompt Terrain Modelling for Navigation, Control and High-Precision Guidance by Aerospace Images // IFAC Workshop "Aerospace Guidance, Navigation and Flight Control Systems" / Samara: 2009. URL: <http://lib.physcon.ru/doc?id=97ac4b533ffd>
8. Calway A.D., Knutsson H., Wilson A. Multiresolution Estimation of 2-D Disparity Using a Frequency Domain Approach // BMVC92: Proceedings of the British Machine Vision Conference / N.Y.: Springer, 1992. P. 227 – 237.
9. Чуи К. Введение в вэйвлеты. М.: Мир, 2001. 412 с.