

# Алгоритмы установления соответствия при обработке изображений для решения задач управления посадкой летательных аппаратов<sup>1</sup>

В.А. Гришин, И.М. Книжный, К.Е. Хрекин

*Институт космических исследований РАН*

*117997 Москва, Профсоюзная, 84/32*

*E-mails: vgrishin@iki.rssi.ru, kim@mx.iki.rssi.ru, hke@iki.rssi.ru*

Одним из наиболее критичных вопросов при разработке бортовых систем технического зрения, предназначенных для управления движением летательных аппаратов, являются алгоритмы установления соответствия изображений точек поверхности на различных кадрах. Для решения задачи установления соответствия авторами предлагается использовать подход, базирующийся на использовании быстрых методов компенсации движения в яркостной области в сочетании с применением различных частотных преобразований для уменьшения погрешности при поиске соответствия.

## Введение

Для решения задач навигации и управления посадкой в беспилотных летательных аппаратах, в частности рамках проекта “Фобос-грунт”, представляется целесообразным совместное использование радиотехнической системы обеспечения посадки с системой технического зрения (СТЗ), что позволяет существенно повысить устойчивость управления к отказам и точность измерения за счет комплексирования измерительных систем [1]. Одной из важнейших задач, решаемых в рамках подобных проектов, является разработка методов установления соответствия в стереопарах и парах изображений, получаемых в монокулярном режиме. Существующие подходы к решению задачи установления соответствия требуют значительных вычислительных затрат, что затрудняет их практическую реализацию на базе бортового вычислительного комплекса ограниченной технической оснащенности. Для решения задачи авторами предлагается использовать подход, базирующийся на использовании быстрых методов компенсации движения в яркостной области в сочетании с применением различных частотных преобразований для уменьшения погрешности при поиске соответствия [2, 3].

## Методы установления соответствия

Все методы установления соответствия можно разделить на две большие группы. Во-первых, это feature-based методы. Их суть заключается в том, что на изображениях выделяется множество особенностей (края, угловые точки и т.п.). Затем производится установление соответствия этих особенностей на разных изображениях. Выделение особенностей существенно затрудняется в случае малого отношения сигнал/шум. Для установления соответствия часто приходится использовать достаточно сложные в вычислительном плане методы (динамическое программирование и др.).

Во вторую группу входят area-based методы установления соответствия. Они более надежны в условиях больших шумов и задача установления соответствия решается несколько проще. Проблема заключается в том, что слишком малая окрестность точки, для которой ищется соответствие (например, окрестность 4\*4), обеспечивает низкую точность установления соответствия и высокий уровень аномальных ошибок. При увеличении размера использованных окрестностей улучшается точность установления соответствия и уменьшается уровень аномальных ошибок. Но происходит это до определенного предела, обусловленного уровнем проективных искажений. Та-

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 06-08-01497-а.

кие искажения проявляются в наибольшей степени на периферии окрестности точки, для которой устанавливается соответствие. Таким образом, на высоких пространственных частотах в зависимости от величины искажений происходит не только уменьшение функции близости (или взаимной корреляции) но даже и смена ее знака. При значительных проективных искажениях подавление высоких частот на периферии окрестности улучшает точность установления соответствия и уменьшает вероятность аномальных ошибок. Используется также введение весовой функции, спадающей к краям области. Другими способами уменьшения влияния этого эффекта является адаптивная оптимизация размера окрестности, а также коррекция проективных искажений, для чего они аппроксимируются аффинным преобразованием. Оценка параметров аффинного преобразования осуществляется по оценкам дальности и ориентации вектора нормали к поверхности для точки, для которой устанавливается соответствие. В некоторых случаях параметры аффинного преобразования определяются исходя из решения оптимизационной задачи, где оптимизируется функция близости (сходства) окрестностей [4-6].

Такие методы характеризуются сравнительно большой вычислительной сложностью и используются, как правило, в тех случаях, когда необходимо получить плотное "облако" отсчетов профиля наблюдаемой поверхности. Обработать большое количество точек в реальном времени не представляется возможным. Для решения задач управления движением это часто и не является необходимым. При обработке ограниченного количества точек целесообразно провести предварительную их селекцию по признаку частичной инвариантности к проективным искажениям.

Для экспериментальной проверки и сравнения были выбраны два метода. Во-первых, это модифицированный area-based метод. Во-вторых, метод с использованием частотных преобразований.

### Area-based метод установления соответствия

Для уменьшения погрешности установления соответствия представляется целесообразным отказ от поиска соответствия в случае, если искомый блок не содержит заметных особенностей (т.е. является малоконтрастным). В экспериментах в качестве критерия «контрастности» блока использовался эмпирический параметр  $\tau$ , вычисляемый как

$$\tau = (b_{\max} - b_{\min}) / \bar{b},$$

где  $b_{\max}$ ,  $b_{\min}$  и  $\bar{b}$  соответственно максимальная, минимальная и средняя яркости пикселей искомого блока. Поиск соответствия осуществлялся лишь в тех случаях, когда вычисленное значение  $\tau$  превышало заданный пороговый уровень.

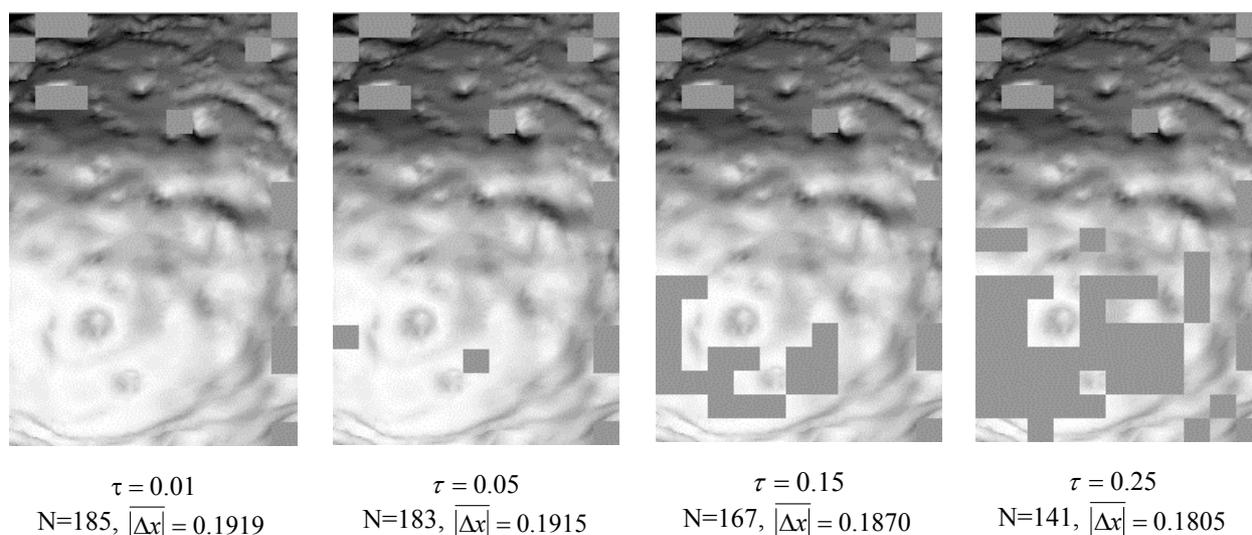


Рис.1. Установление соответствия в области перекрытия изображений стереопары

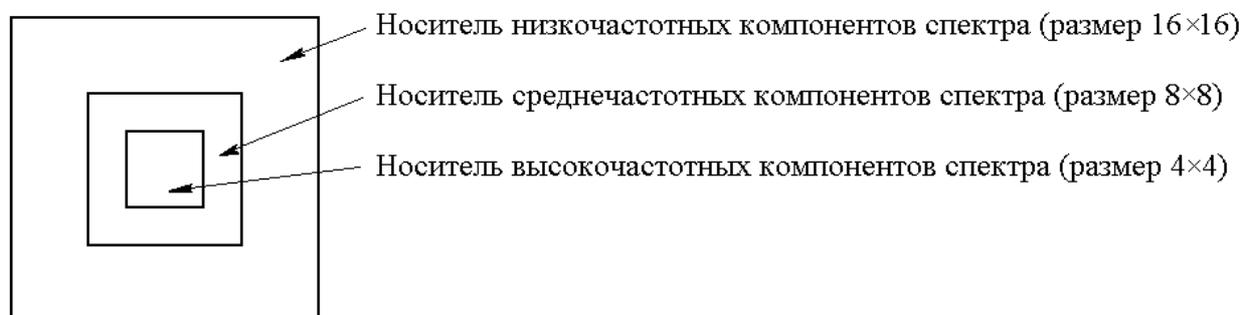
На рис. 1 приведены области перекрытия изображений стереопары с установленным соответствием между областями обоих изображений для различных значений порогового уровня параметра  $\tau$  (0.01, 0.05, 0.15 и 0.25). Полное число блоков  $N$  в области перекрытия равно 198. Блоки, для которых поиск соответствия не проводился или дал отрицательные результаты, на рис. 1 закрашены серым цветом. Использование селекции «малоконтрастных» блоков позволило уменьшить средний модуль погрешности  $|\overline{\Delta x}|$  при вычислении соответствия с 0.1919 ( $\tau = 0.01$ ) до 0.1805 ( $\tau = 0.25$ ) пикселя и уменьшить вероятность аномальных ошибок. Заметим, что на максимальное значение модуля погрешности  $|\overline{\Delta x}|_{\max}$ , определяемое достаточно высоким уровнем проективных искажений, использование процедуры селекции не повлияло. Для использованной стереопары,  $|\overline{\Delta x}|_{\max}$  составило 0.3168 пикселя.

Для сокращения вычислительных затрат предлагается функцию близости (в качестве которой в случае поиска в пиксельной области в данном случае используется сумма модулей разностей) рассчитывать с шагом, большим 1, и прекращать расчёт для текущего положения блока в случае, если накопленная сумма превосходит сумму, вычисленную на предыдущем шаге. В окрестностях точки поиска, соответствующей экстремальному значению вычисленной суммы модулей разностей, в случае субпиксельного поиска необходимо провести полный (уточняющий) расчёт функции близости для найденного и двух соседних положений блока.

### **Метод установления соответствия с вложением носителей различных пространственных частот**

Для улучшения устойчивости процесса установления соответствия к проективным искажениям предлагается специальное спектральное представление окрестности точки при несовпадающих областях, по которым рассчитываются коэффициенты для различных пространственных частот. А именно, носитель (окрестность) по которой рассчитываются высокочастотные компоненты, вложена в окрестность, по которой рассчитываются среднечастотные компоненты, а та в свою очередь вложена в окрестность, по которой рассчитываются низкочастотные компоненты (рис. 2). В экспериментах использовались три окрестности  $16 \times 16$ ,  $8 \times 8$ ,  $4 \times 4$ . По каждой из окрестностей рассчитывалось по 4 коэффициента. Отбрасывание среднечастотных и высокочастотных компонентов спектра позволило резко сократить вычислительную сложность метода.

Для установления соответствия отрабатывалась базисная система Уолша и косинус-преобразования с учетом возможности реализации в рамках целочисленной арифметики.



*Рис. 2. Вложение носителей пространственных частот*

На рис. 3 приведены спектры дискретного косинус-преобразования, а также взаимная корреляционная функция коэффициентов разложения соответствующих точек левого и правого изображений стереопары. Спектры по функциям Уолша и взаимные корреляционные функции коэффициентов разложения приведены на рис. 4.

Приведенные спектры показывают, что основная мощность сосредоточена в области нижних частот. Именно они и являются наиболее информативными. Для базисных функций с большими номерами коэффициент корреляции падает вследствие проективных искажений. Это свидетельствует не только об уменьшении экстремума функции близости (сходства) двух окрестностей, но и увеличении паразитных экстремумов, порождающих аномальные ошибки установления соответствия. Выбор коэффициентов по функциям базиса с малыми номерами по последовательности вложенных окрестностей  $16 \times 16$ ,  $8 \times 8$ ,  $4 \times 4$  обеспечивает уменьшение влияния проективных искажений на величину функции сходства. Можно также отметить, что основные закономерности для спектров дискретного косинус-преобразования такие же, как и для спектров Уолша. Отличие в том, что спектральные коэффициенты дискретного косинус-преобразования затухают быстрее с ростом пространственных частот.

Использование малого числа коэффициентов возможно по той причине, что не ставится задача точного воспроизведения изображения. А фактически ставится задача построения такого пространства признаков, которое позволяет эффективно устанавливать соответствие между изображениями окрестностей точек. При этом компоненты спектра пространственных частот вдоль оси, параллельной стереобазе, отвечают за точность совмещения, а компоненты спектра, перпендикулярные стереобазе, используются главным образом для уменьшения вероятности аномальных ошибок.

Собственно, такой подход не является принципиально новым. В работе [7] показаны преимущества представления фрагментов изображения в вейвлет-базисе. При этом при малом количестве используемых коэффициентов получается метод установления соответствия, близкий к feature-based методам. При большом числе используемых коэффициентов получается метод установления соответствия, близкий к area-based методам. Варьируя число используемых коэффициентов, можно получить широкий спектр методов установления соответствия, отвечающих заданным требованиям. Идея мультиразрешения и вложения носителей, характерная для вейвлет-анализа, представляется весьма перспективной для уменьшения влияния проективных искажений при обработке стереопар и последовательностей монокулярных изображений.

Следует отметить, что принцип вариации разрешения по полю зрения широко используется в зрительных системах высших животных, в частности человека. А именно – разрешение максимально в области так называемого fovea-центра, и очень резко падает при удалении от него.

Наиболее перспективным представляется использование преобразования Карунена-Лоэва (преобразование Хотеллинга, МСА - Main Component Analysis, PCA - Principle Component Analysis), обеспечивающего некоррелированность коэффициентов разложения и минимальную размерность пространства, при которых достигается достаточно хорошее разделение [8-12].

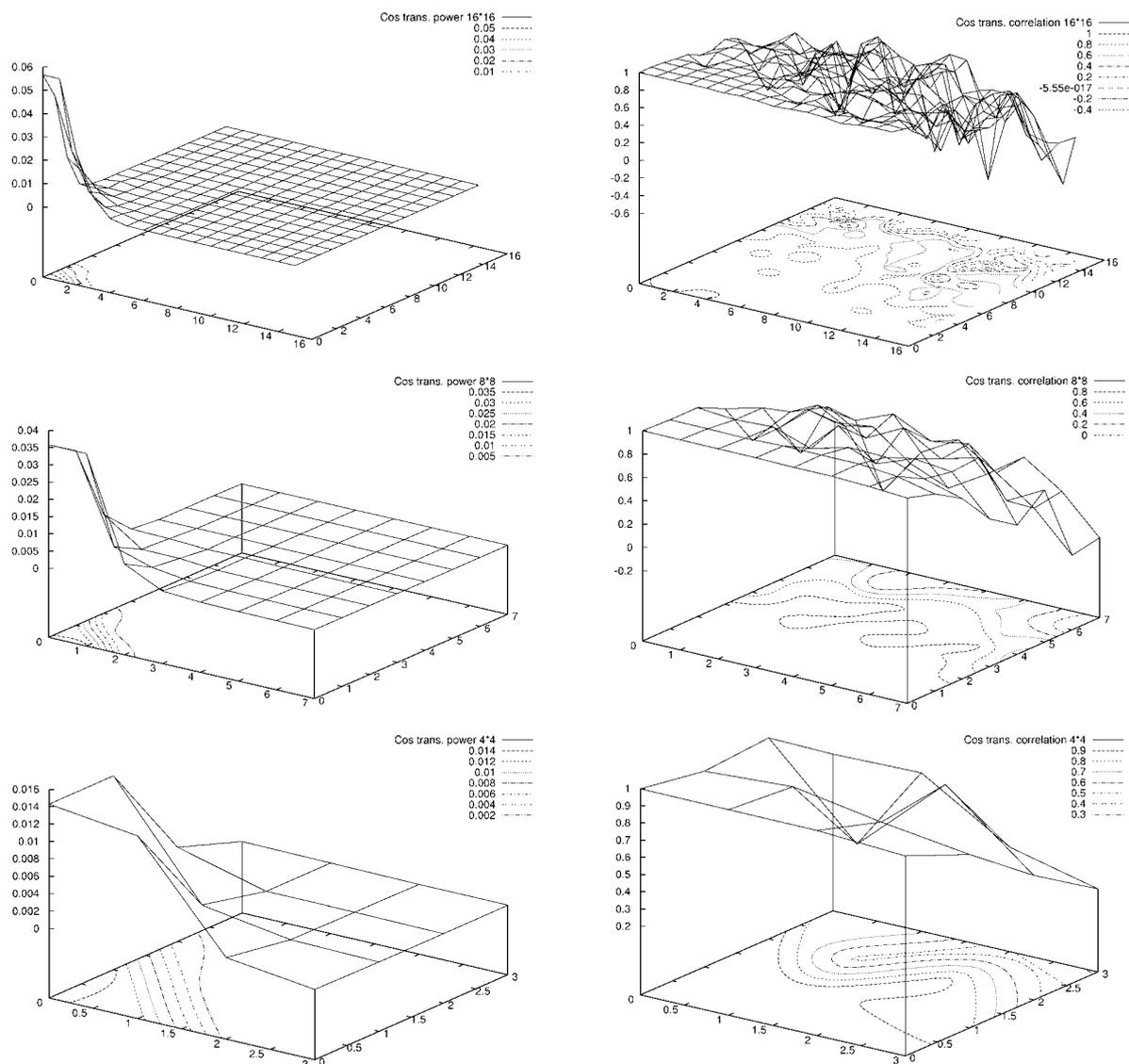


Рис. 3. Разложение трех вложенных окрестностей точек, выбранных в качестве особенностей, по базису дискретного косинус-преобразования. На левых графиках представлена мощность компонентов спектра. На правых графиках представлена взаимная корреляционная функция коэффициентов разложения окрестностей соответствующих точек левого и правого изображений стереопары

Однако данное преобразование учитывает структуру изображения и обладает большой вычислительной сложностью. Широкое распространение дискретного косинусного преобразования обусловлено тем, что оно дает результаты, близкие к результатам преобразования Карунена-Лоэва. Использование преобразования Уолша обусловлено его малой вычислительной сложностью (для вычисления коэффициентов преобразования требуются только операции изменения знака и сложения).

На рис. 5 представлено несколько графиков функции близости (сходства) окрестностей точек на стереопарах в спектральной и яркостной областях. Для получения сопоставимых результатов функции близости пронормированы по амплитуде к отрезку  $[0,1]$ . Из графиков следует, что эти функции достаточно близки.

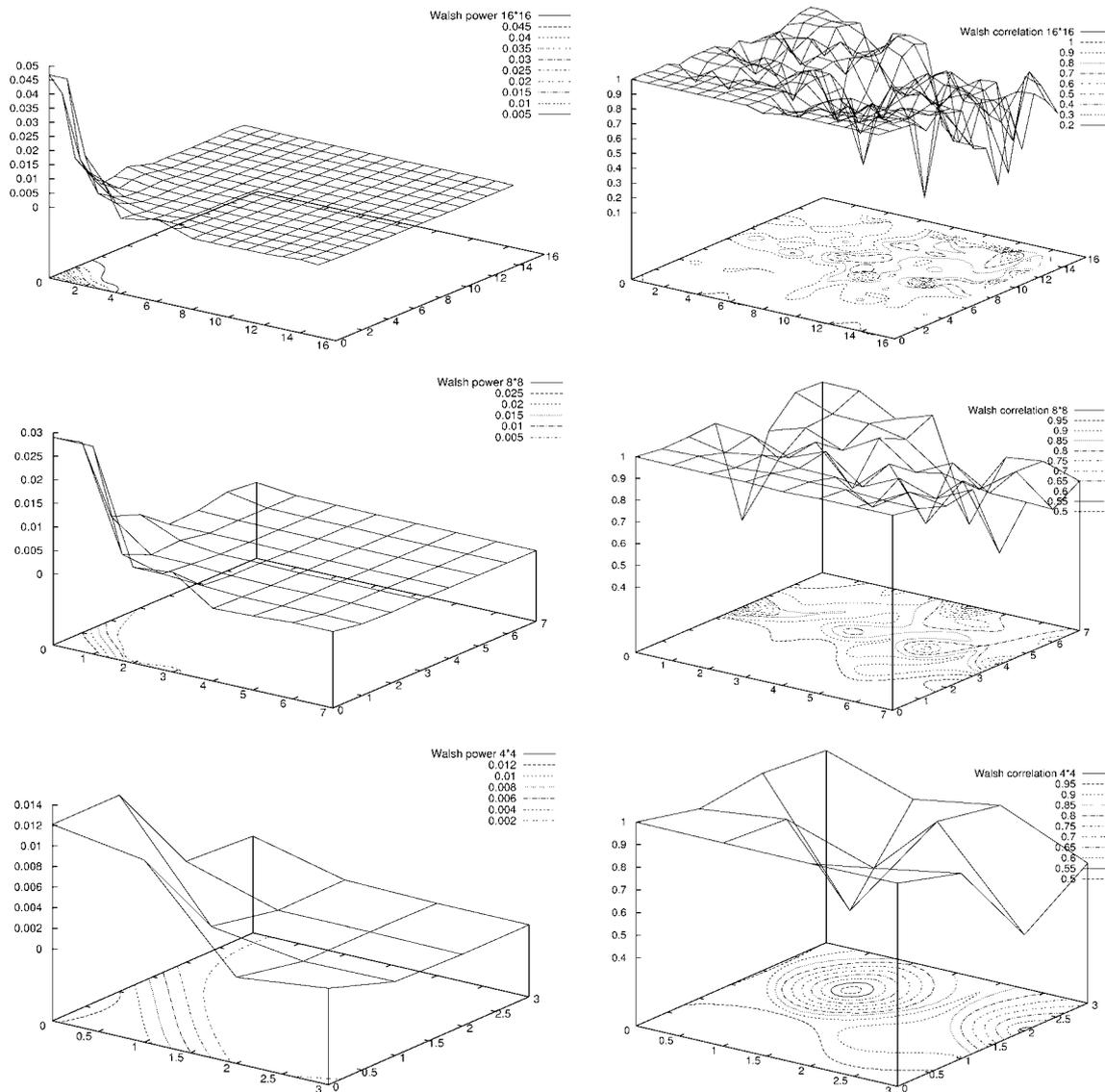
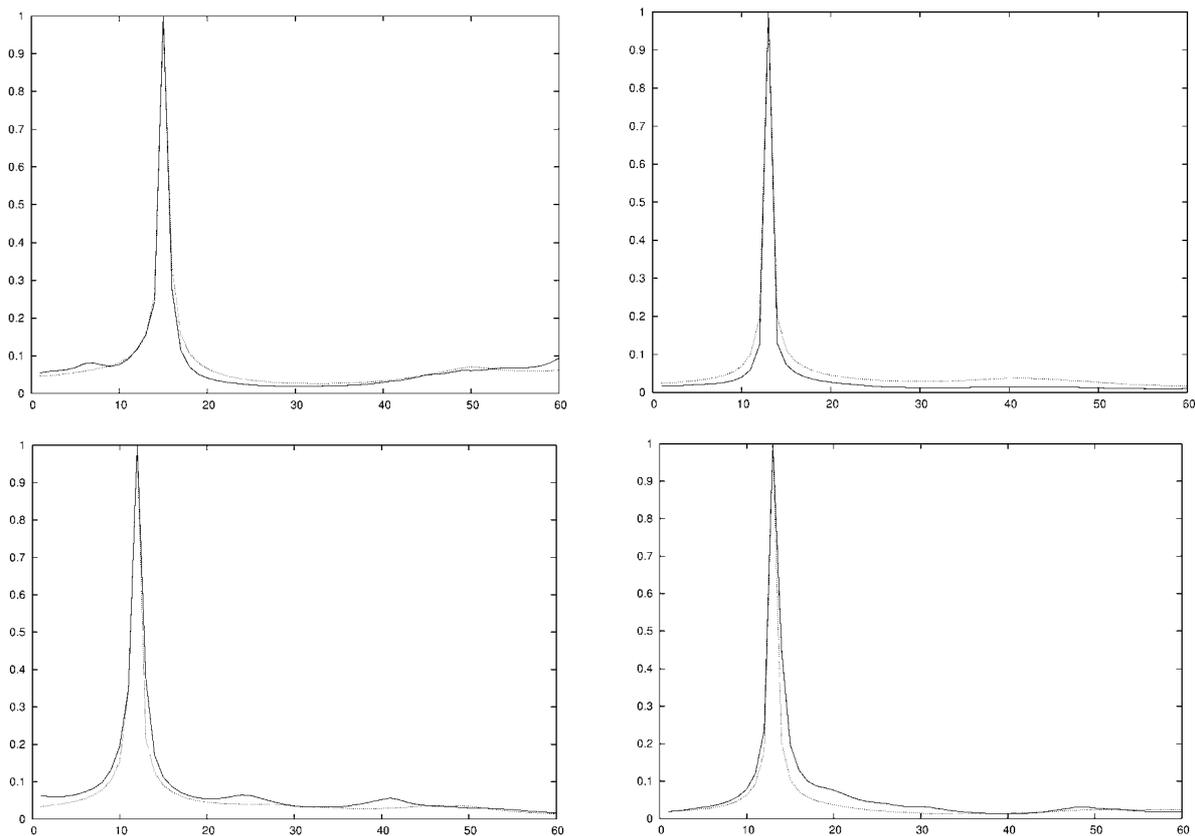


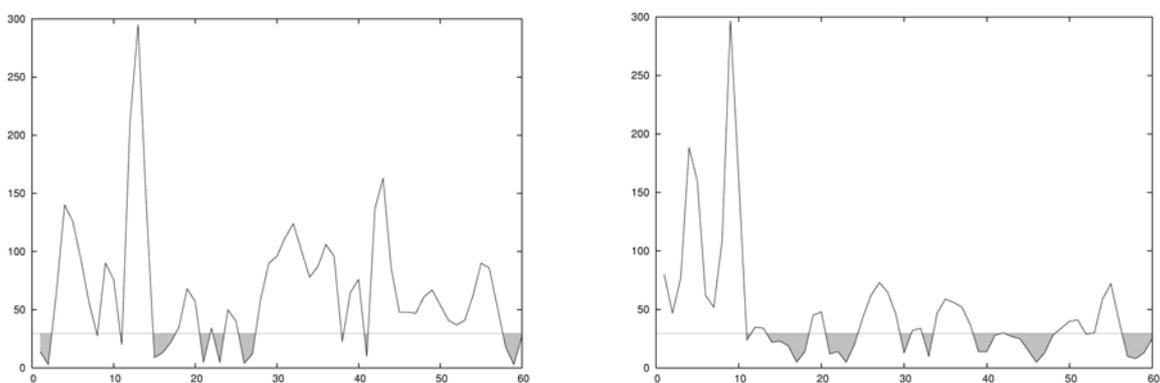
Рис. 4. Разложение трех вложенных окрестностей точек, выбранных в качестве особенностей, по базису Уолша. На левых графиках представлена мощность компонентов спектра. На правых графиках представлена взаимная корреляционная функция коэффициентов разложения Уолша окрестностей соответствующих точек левого и правого изображений стереопары

Реально, для поиска соответствия использовалась специальная процедура, позволяющая существенно уменьшить вычислительную сложность. Классический алгоритм для поиска соответствия в area-based методах включает в себя циклический расчет функции близости фрагментов изображений с заданным сдвигом на каждом шаге (как правило – 1 пиксель). Величина смещения определяется по экстремуму функции близости. В данном случае использовалась двухэтапная процедура. Во-первых, осуществлялся поиск особенностей на втором изображении такого же типа, как и на первом. Такой поиск требует малого числа операций. Далее производился отбор таких положений особенностей, для которых параметр, по экстремуму которого производился отбор, отличается не более чем на заданную величину (в частности, 30). Для таких точек проводился расчет коэффициентов Уолша и отбиралась точка с наибольшим соответствием. Рис. 6 иллюстрирует этот процесс. Серым цветом выделены точки, которые укладываются в указанную выше границу.



*Рис. 5. Функции соответствия при обработке стереопар. Черная линия показывает зависимость функции соответствия, рассчитанной по 12 коэффициентам Уолша (сумма модулей разности). Серая линия показывает зависимость функции соответствия, рассчитанной как сумма модулей разностей яркости по окрестности 16\*16 пикселей*

Алгоритм может быть модифицирован таким образом, чтобы расчет коэффициентов Уолша производить, начиная с точек с наибольшим соответствием. Иными словами, вместо чисто детерминированного алгоритма может быть использован последовательный алгоритм статистических решений, что позволяет получить дополнительную экономию вычислительных затрат.



*Рис. 6. Модуль разности параметров, по которым отбирались особенности для двух точек*

Исследование топологических свойств пространства признаков, ее связь с характеристиками изображений и возможностями построения эффективных (в смысле малых вычислительных затрат) последовательных решающих алгоритмов является темой дальнейших исследований.

### **Экспериментальная отработка алгоритмов установления соответствия**

Статистические характеристики изображений поверхности, на которую осуществляется посадка, могут изменяться в очень широких пределах. Поэтому основные характеристики алгоритмов установления соответствия (СКО ошибок и вероятность аномальных ошибок) также подвержены существенным изменениям. Оценить устойчивость функционирования и точностные характеристики алгоритмов обработки изображений для решения задач управления посадкой летательных аппаратов (а, следовательно, и их пригодность) можно только экспериментальным путем. Необходимость отработки алгоритмов с накоплением обширной статистики обусловлена также тем обстоятельством, что аномальные ошибки имеют небольшую вероятность и для получения надежных статистических оценок требуются большие выборки.

Обычно, для экспериментальной отработки алгоритмов используется небольшой радиоуправляемый вертолет с грузоподъемностью 10-30 кг. Однако, в нашем случае такой подход неприменим по финансовым причинам. Поэтому остается использовать методы математического моделирования. Подготовлено специальное программное обеспечение для отработки алгоритмов установления соответствия, селекции аномальных ошибок установления соответствия, отработки алгоритмов измерения параметров движения летательного аппарата и реконструкции профиля визируемой поверхности.

Окончательный выбор алгоритма установления соответствия будет произведен после накопления достаточно большой статистики на изображениях, близких к реальным, и оценки затрат времени на реализацию алгоритмов на конкретном процессоре.

### **Литература**

1. *Гришин В. А.* Системы технического зрения в решении задач навигации и терминального управления // Космическое приборостроение. Сборник докладов выездного семинара. Россия. Таруса. 7-9 июня 2006 г. Москва. Институт космических исследований. Российская академия наук. 2007.
2. *Puri A., Hang H.-M., Schilling D.* An efficient block-matching algorithm for motion compensated coding // Proc. IEEE Conf. Acoustics, Speech and Signal Processing, 1987, v.12. pp 1063-1066.
3. *Сэломон Д.* Сжатие данных, изображений и звука // М: Техносфера, 2004. 368 с.
4. *Netravali A.N., Haskell W. G.* Digital pictures, representation and compression // New York: Plenum Press, 1988. p. 706.
5. *Daniel Scharstein, Richard Szeliski.* A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms // International Journal of Computer Vision, 2002, vol. 47, No. 1/2/3, pp. 7-42.
6. *Myron Z. Brown, Darius Burschka, Gregory D. Hager.* Advances in Computational Stereo // IEEE transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, vol. 25, No. 8, pp. 993-1008.
7. *Bhattacharya P.* Automatic Target Recognition, Wavelet Transforms and Stereo Matching // BDMO Grant F49620-98-1-0413. Technical report number: AFRL-SR-BL-TR-02-0097. Nebraska Univ.-Lincoln. Dept. of Computer Science and Engineering, 2001.
8. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений // М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
9. Цифровая обработка телевизионных и компьютерных изображений. Под ред. Зубарева Ю. Б. и Дворковича В. П. // М.: Международный Центр научной и технической информации, 1997. 212 с.
10. *Блаттер К.* Вейвлет-анализ. Основы теории // М.: Техносфера, 2004. 280 с.
11. *Залманзон Л. А.* Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях // М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. литературы, 1989. 496 с.
12. *Трахтман А. М.* Введение в обобщенную спектральную теорию сигналов // М.: Советское радио, 1972. 352 с.