

Сравнение спектральных представлений образов окрестностей точек для решения задач установления соответствия¹

В.А. Гришин, Е.В. Белинская

*Институт космических исследований РАН
117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
E-mail: vgrishin@iki.rssi.ru*

В статье рассматриваются спектральные представления образов окрестностей точек, предназначенные для использования в системах технического зрения летательных аппаратов. Ключевые параметры систем технического зрения существенно зависят от точности и надежности процесса установления соответствия изображений одних и тех же точек поверхности на различных кадрах. Вычислительная сложность алгоритмов технического зрения также определяется вычислительной сложностью процесса установления соответствия. На характеристики процесса установления соответствия существенное влияние оказывают способы представления образов окрестностей точек. В статье приводятся результаты сравнения нескольких систем ортогональных функций, использованных для представления образов окрестностей. Основными параметрами, которые рассматривались при этом, являются вероятность появления аномальных ошибок установления соответствия и вычислительные затраты, необходимые для реализации процесса установления.

Ключевые слова: системы технического зрения летательных аппаратов, алгоритмы установления соответствия, спектральные представления образов окрестностей точек.

Введение

Системы технического зрения (СТЗ) постепенно завоевывают все новые и новые позиции в решении задач навигации и управления полетом беспилотных летательных аппаратов. Это обусловлено высокой информативностью таких систем, их многофункциональностью и гибкостью. Одной из наиболее серьезных проблем, возникающих при разработке таких систем, являются высокие требования к мощности процессоров, используемых для обработки видеoinформации. Другой проблемой является такое построение алгоритмов обработки изображений, при котором обеспечивается высокая надежность и точность измерений при изменении в широких пределах условий наблюдения, статистических характеристик изображений визируемой поверхности, маневрировании летательного аппарата.

Для решения задач навигации и управления посадкой в рамках проекта “Фобос-грунт”, предполагается использовать телевизионную систему навигации и наблюдения (ТСНН). В числе других функций ТСНН реализует резервный канал измерения высоты и скоростей движения аппарата относительно поверхности Фобоса.

Надежность и точность измерений в значительной степени зависит от используемых алгоритмов установления соответствия. В [1, 2] представлен спектральный метод представления образов окрестностей точек, для которых производится установление соответствия. Указанный метод использует вложение носителей различных пространственных частот, что с одной стороны, уменьшает вычислительную сложность расчета спектральных коэффициентов, а с другой стороны, уменьшает влияние проективных искажений на ошибки процесса установления соответствия. Использование ограниченного набора спектральных коэффициентов делает указанный метод близким к методу сопоставления образов окрестностей точек по их сигнатурам (image signatures). Указанные работы были ориентированы, в основном, на преобразование Уолша-Адамара, как наиболее простое в вычислительном плане. Однако, известно, что спектральные коэффициенты

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 06-08-01497-а

этого преобразования затухают достаточно медленно с ростом номеров базисных функций. По этой причине представляет интерес сравнение системы ортогональных функций Уолша-Адамара с другими системами ортогональных функций. Сравнение производилось по одному из основных показателей – по количеству аномальных ошибок установления соответствия. Обязательно учитывалась также и вычислительная сложность алгоритма расчета коэффициентов.

Особенности использованного спектрального представления

Спектральные представления находят применение в решении задач установления соответствия [3]. Как указывается в [4] использование спектральных методов позволяет за счет выбора набора используемых коэффициентов получать широкий спектр алгоритмов установления соответствия с заданными характеристиками. Предельными случаями являются классические area-based алгоритмы (устанавливается соответствие между областями, окружающую точку) и feature-based алгоритмы (устанавливается соответствие между особенностями - перепадами яркости, угловыми точками и т.п.).

Ошибки процесса установления соответствия оказывают существенное влияние на точностные показатели СТЗ, а также на надежность их функционирования. Можно считать, что ошибки установления соответствия можно разделить на две группы. Первая группа характеризуется законом распределения, который принято считать близким к нормальному закону. Вторая группа ошибок - это так называемые аномальные ошибки, которые характеризуются значительной величиной и порождаются ложными экстремумами критериальной функции соответствия. Наиболее неприятны аномальные ошибки установления, т.к. они порождают значительные по величине ошибки оценивания измеряемых параметров. По этой причине различные спектральные представления сравнивались по количеству аномальных ошибок установления соответствия. Исследование величин нормальных ошибок установления соответствия требует использования весьма дорогостоящего оборудования высокой точности и по этой причине такие исследования проводятся достаточно редко.

На надежность процесса установления соответствия в большинстве случаев (при отсутствии бликов на изображении) определяющее влияние оказывают проективные искажения. В настоящее время накоплено достаточно много методов, позволяющих компенсировать проективные искажения в процессе установления соответствия [5, 6], а также методы специальной предварительной фильтрации, адаптации размеров и формы окрестности, используемой для установления соответствия. Существенным недостатком методов компенсации проективных искажений является их

высокая вычислительная сложность, что весьма существенно для СТЗ, предназначенных для работы в режиме реального времени. Предварительная фильтрация окрестностей и адаптация размеров и формы окрестностей требуют меньших вычислительных затрат, однако отличаются меньшей эффективностью.

Геометрия носителей различных частот спектра яркости изображения приведена на рис. 1. Такая геометрия позволяет исключить периферию областей из процесса расчета части спектральных коэффициентов, поскольку именно на периферии имеет место потеря когерентности среднечастотных, а

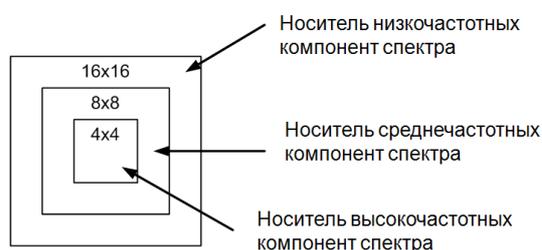


Рис. 1. Вложение носителей пространственных частот

особенно высокочастотных спектральных компонентов, обусловленная проективными искажениями. Использование таких спектральных представлений в сочетании с предварительным отбором таких точек изображения, которые характеризуются хорошими свойствами привязки, позволяет получить приемлемые характеристики устойчивости к проективным искажениям при не слишком больших вычислительных затратах [1, 2, 4, 7, 8].

Методика проведения эксперимента

Методика проведения экспериментов более подробно описана в [2]. Как уже отмечалось ранее, отбор коэффициентов производился с учетом вычислительной сложности процесса установления соответствия (т.е. число используемых коэффициентов должно быть минимальным). В качестве основного параметра рассматривалось количество аномальных ошибок процесса установления соответствия (оно должно быть малым). Для обнаружения аномальных ошибок использовался метод обратного поиска. Суть его заключается в том, что после установления соответствия между точкой первого изображения и точкой второго изображения берется точка второго изображения со своей окрестностью и для нее осуществляется установление соответствия на первом изображении (обратный поиск). Если разница координат исходной точки первого изображения и точкой, полученной в результате обратного поиска, превысит заданную величину (2 пикселя по любой координате или 1 пиксель по обеим координатам) то принимается решение, что соответствие установлено с ошибкой. Результаты подвергаются статистической обработке.

Проводилось сравнение для двух схем расчета – полной и упрощенной. Для полной схемы расчета спектральные коэффициенты определялись по окрестностям 4×4 , 8×8 , 16×16 . Для упрощенной схемы расчета последние две окрестности предварительно преобразовывались к окрестностям размера 4×4 . Первая область получается путем вырезания окрестности точки размером 4×4 (рис. 2а).

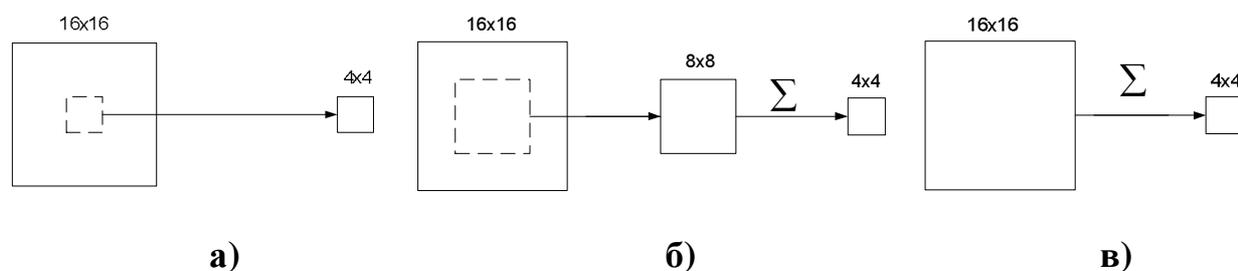


Рис. 2. Формирование окрестностей 4×4 для упрощенной схемы расчета

Вторая область получается путем вырезания окрестности точки размером 8×8 из окрестности 16×16 , а затем по области 8×8 производится усреднение значений яркости элементов для получения области 4×4 (рис. 2б). Третья область получается путем усреднения значений яркости элементов окрестности 16×16 для получения области 4×4 (рис. 2в).

Использование упрощенного метода продиктовано необходимостью сокращения количества вычислительных операций. Расчеты были выполнены для следующих ортогональных преобразований: Уолша-Адамара, Хаара, косинусного, синусного и наклонного. Основные сведения об этих преобразованиях можно найти в [8-13]. В качестве функции соответствия использовалась сумма модулей разности спектральных коэффициентов.

Для экспериментов использована последовательность из 8 изображений, снятых в монокулярном режиме при последовательном уменьшении высоты над поверхностью. Изображения получены на натурном стенде ИКИ. Из этих изображений сформировано 7 пар, которые обрабатывались последовательно, обнаруженные аномальные ошибки установления соответствия суммировались. На рис. 3 приведена одна из этих семи пар. На предшествующем изображении из каждой пары (на рис. 3 оно находится слева) выделялось множество точек, имеющих хорошие свойства привязки. Число этих точек выбиралось исходя из степени масштабирования изображения и величины средних перемещений визируемых точек. Они были выбраны равными 324, 324, 324, 289, 289, 289, 256 соответственно.

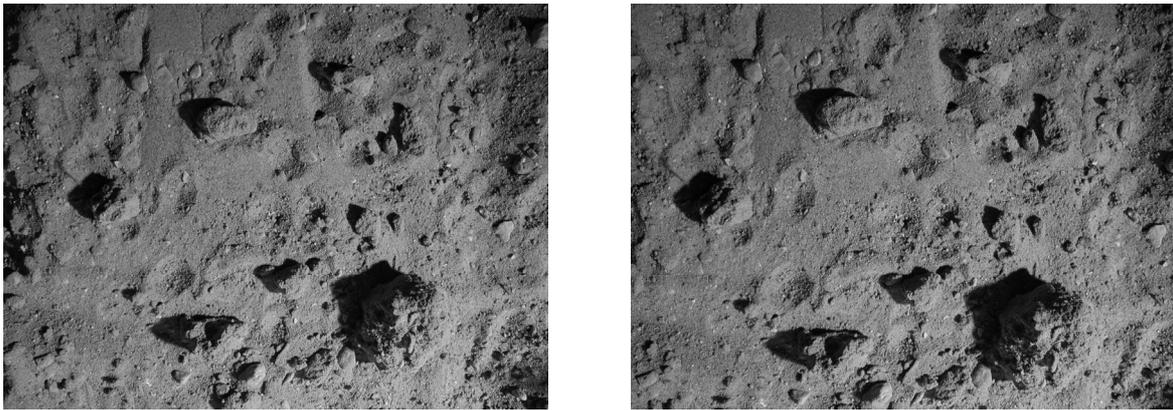


Рис. 3. Изображения двух последовательных кадров

Результаты экспериментов

По результатам [2] в качестве основного набора, используемого для сравнения, был выбран набор из шести низкочастотных спектральных коэффициентов Уолша-Адамара для каждой окрестности: (0,0), (0,1), (0,2), (1,0), (1,1), (2,0). Этот набор приведен на рис. 4. На рисунке серым цветом выделены ячейки, соответствующие тем коэффициентам, которые используются. Залитые белым цветом ячейки соответствуют тем коэффициентам, которые отбрасываются. Ячейки, находящиеся в левом верхнем углу, соответствуют коэффициенту с индексом (0,0), т.е. постоянной составляющей яркости.

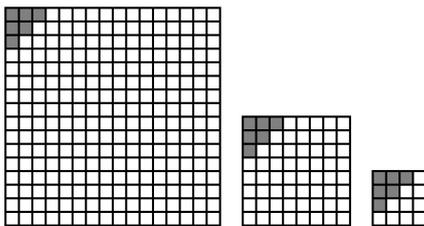


Рис. 4. Набор низкочастотных коэффициентов, использованный для сравнения

Для облегчения восприятия полученных результатов они представлены в виде графиков (рис. 5). По оси абсцисс представлены в графическом виде наборы использованных коэффициентов. Они одинаковы для всех трех окрестностей размером 4×4, 8×8 и 16×16 пикселей.

На графике отчетливо просматривается тот факт, что все пики увеличения числа аномальных ошибок

приходятся на случай, когда из рассмотрения исключалась первая составляющая спектра, соответствующая средней яркости. Отсюда можно сделать вывод, что первая низкочастотная компонента оказывает самое существенное влияние на результаты. На полученных графиках можно лишь проследить поведение функций ошибок для различных распределений при отсутствии первой составляющей спектра. Поэтому рассмотрим следующий график, где исключены наборы, где отсутствует первая составляющая спектра. Исключен также набор, содержащий 3 коэффициента по каждой окрестности, так как для такого набора велико количество ошибок. Поскольку для двух последних наборов коэффициентов количество ошибок установления соответствия уменьшается незначительно, то их также исключаем из дальнейшего рассмотрения – рис. 6.

Анализируя данный график можно сказать, что в принципе результаты для косинусного и синусного преобразований отличаются незначительно. Несколько худшие результаты демонстрирует наклонное преобразование для случаев 4, 6, 8 (первый случай) и 9 коэффициентов. В целом, преобразования Уолша-Адамара и Хаара показывают наихудшие результаты. Только для случая 6 коэффициентов преобразование Уолша-Адамара а для первого случая 8 коэффициентов оба эти преобразования показывают результаты лучше, чем наклонное преобразование и несколько хуже, чем синусное и косинусное преобразования.

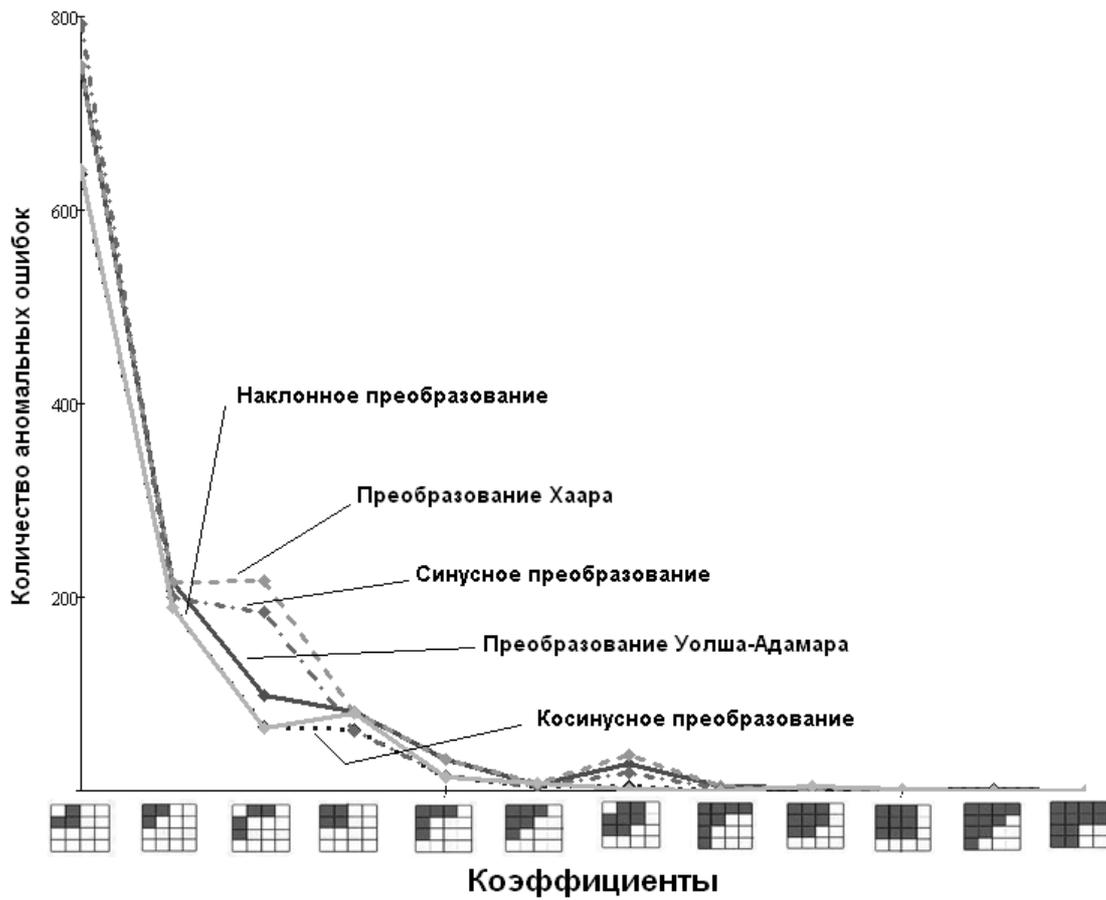


Рис. 5. Суммарное количество аномальных ошибок установления соответствия

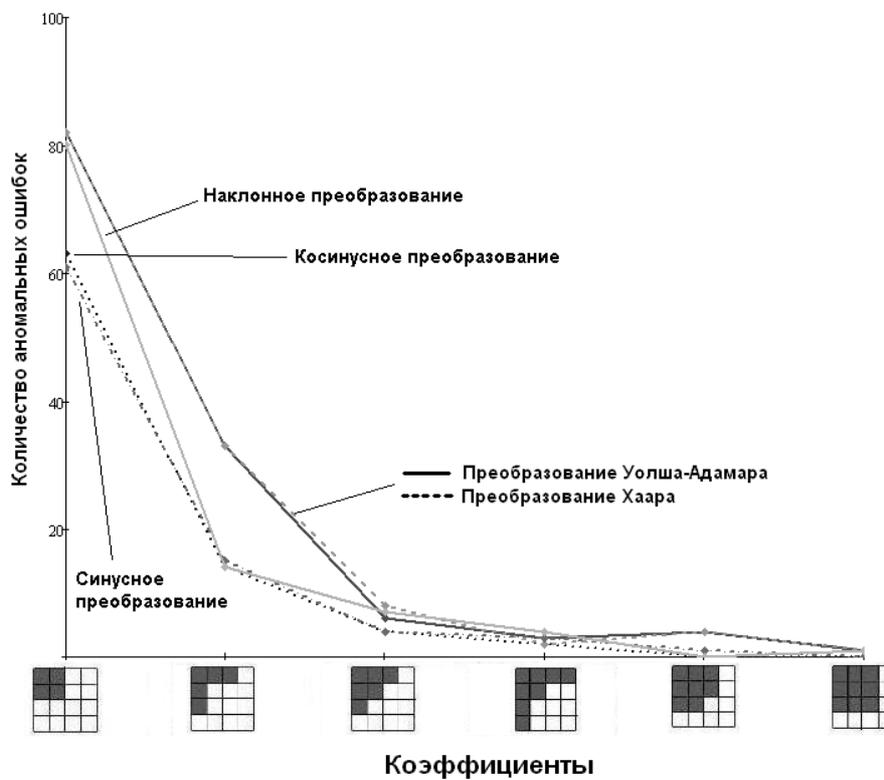


Рис. 6. Суммарное количество аномальных ошибок установления соответствия при расчете по полной схеме

Необходимо отметить, что результаты были получены при использовании полной схемы расчета. Рассмотрим упрощенную схему расчета применительно к косинусному, синусному, наклонному, а также к преобразованию Хаара. Для преобразования Уолша-Адамара результаты для обеих схем идентичны. При расчете по упрощенной схеме были получены следующие результаты (рис. 7).

Наклонное преобразование, в отличие от полной схемы, оказалось лучше и синусного, и косинусного преобразований (исключая первый случай 8 коэффициентов). В целом, преобразование Уолша-Адамара и в этом случае уступает синусному, косинусному и наклонному преобразованию. Однако, при числе коэффициентов, равном 6 и 8 (первый случай), величина проигрыша становится вполне сопоставимой с другими преобразованиями (табл. 1).

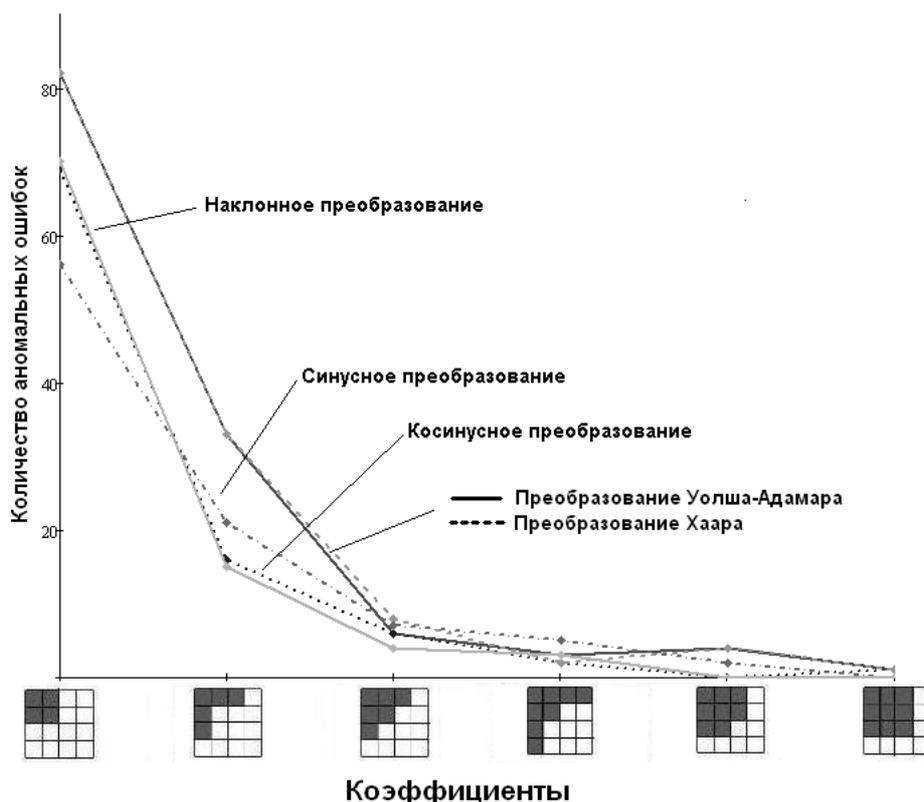


Рис. 7. Суммарное количество аномальных ошибок установления соответствия при расчете по упрощенной схеме

Таблица 1. Сравнение преобразований для случая шести коэффициентов по количеству аномальных ошибок для случая 6 коэффициентов

Схема расчета	Преобразование				
	Уолша-Адамара	Хаара	Косинусное	Синусное	Наклонное
Полная	6	8	4	4	7
Упрощенная	6	8	6	7	4

Сравним расчет по полной и упрощенной схеме для различных преобразований. Для Уолша-Адамара результаты идентичны. Для других преобразований результаты приведены на рис. 8. Упрощенная схема расчета коэффициентов характеризуется приблизительно в полтора-два раза меньшими вычислительными затратами по сравнению с полной схемой расчетов. Интересно отметить, что в целом упрощенная схема расчетов показала результаты, близкие к полной схеме, хотя можно было ожидать, что упрощенная схема покажет заметно худший результат.

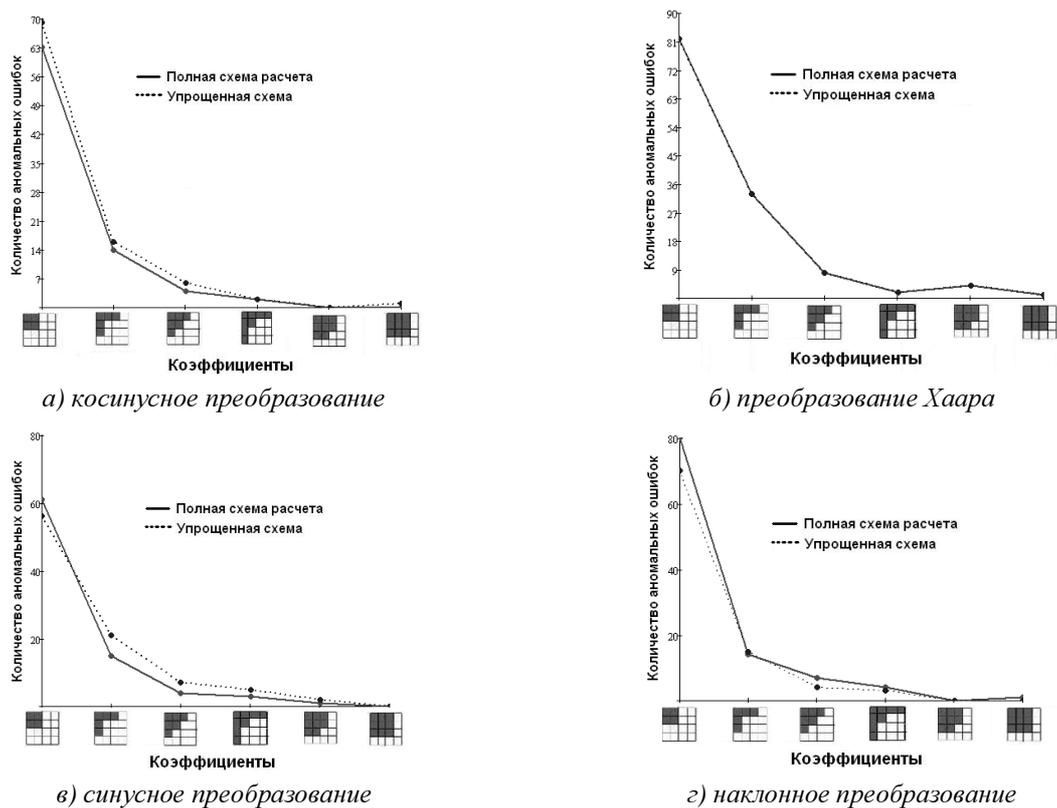


Рис. 8. Сравнение полной и упрощенной схемы расчета коэффициентов

Выводы

Показано что, как и ожидалось, система ортогональных функций Уолша-Адамара в целом показывает несколько худшие результаты, чем другие системы ортогональных функций (исключая систему функций Хаара). Однако величина проигрыша незначительна при числе использованных коэффициентов, большем или равном 6 по каждой окрестности (исключая второй случай 8 коэффициентов). Вычислительная сложность расчета спектра Уолша-Адамара меньше, поскольку для его вычисления можно использовать только операции суммирования и изменения знака. Для вычисления спектра синусного, косинусного и наклонного преобразований необходимо использовать большое количество операций умножения.

Литература

1. Гришин В.А., Книжский И.М., Хрекин К.Е. Алгоритмы установления соответствия при обработке изображений для решения задач управления посадкой летательных аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сб. научн. статей. М.: ООО «Азбука-2000», 2007. Вып. 4. Т. 1. С. 25-32.
2. Гришин В.А. Оптимизация состава спектральных коэффициентов базиса преобразования Адамара для решения задач установления соответствия изображений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сб. научн. статей. М.: ООО «Азбука-2000», 2008. Вып. 5. Т. 1. С. 77-83.
3. Trawny N., Mourikis A., Roumeliotis S., Johnson A., Montgomery J., Ansar A., Matthies L. Coupled Vision and Inertial Navigation for Pin-Point Landing // NASA Science and Technology Conference 2007 – Paper B2P2.

4. *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.
5. *Scharstein D., Szeliski R.* A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms // International Journal of Computer Vision, 2002. Vol. 47. No. 1/2/3. P. 7-42.
6. *Brown M., Burschka D., Hager G.* Advances in Computational Stereo // IEEE transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003. Vol. 25. No. 8. P. 993-1008.
7. *Блаттер К.* Вейвлет-анализ. Основы теории. М.: Техносфера, 2004. 280 с.
8. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
9. Цифровая обработка телевизионных и компьютерных изображений / Под ред. Ю.Б. Зубарева, В.П. Дворковича. М.: Международный Центр научной и технической информации, 1997. 212 с.
10. *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.
11. *Трахтман А.М.* Введение в обобщенную спектральную теорию сигналов. М.: Советское радио, 1972. 352 с.
12. *Прэнтт У.* Цифровая обработка изображений Т. 1. М.: Мир, 1982. 311 с.
13. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Сойфера. М.: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2003. 784 с.

Benchmark of points neighborhood spectral representations for points correspondence in different images

V.A. Grishin, E.V. Belinskaya

*Space Research Institute (IKI) of Russian Academy of Sciences
117997, 84/32 Profsoyuznaya Str, Moscow, Russia*

There are considered spectral representations for points neighborhoods. These representations are intended for using in computer vision systems of flying apparatus. The key parameters of computer vision systems heavily depend from accuracy and reliability of correspondence establishing of the same points images of observed surface in different images. Computational complexity of computer vision algorithms is determined by computational complexity of correspondence process. The method of points neighborhoods images representation have considerable influence to characteristic of correspondence establish process. Benchmark of different spectral representations for points neighborhood is presented in this article. The principal parameters, which are considered, are the probability of correspondence anomalous errors and computational complexity of correspondence process.

Keywords: computer vision systems of flying apparatus, correspondence algorithms, spectral representation of points neighborhoods.