

Анализ функционирования и оптимизация алгоритмов установления соответствия в условиях неравномерности чувствительности телевизионных камер по полю зрения

В.А. Гришин

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

Реальные телевизионные камеры имеют неравномерность чувствительности по полю зрения, которая влияет на работу алгоритмов установления соответствия изображений точек поверхности на разных снимках. В статье представлены различные методы снижения влияния этого фактора и проведено сравнение их эффективности. Показана возможность введения нормировки целевой функции особенностей, позволяющей использовать значение целевой функции для уменьшения вычислительной сложности процесса установления путем отбрасывания заведомо беспersпективных точек.

Ключевые слова: посадка космических аппаратов, система технического зрения, установление соответствия, неравномерность чувствительности по полю зрения, целевая функция особенностей

Введение

В настоящее время системы технического зрения все более активно применяются в задачах управления процессом посадки (Parreira и др., 2010; Pham и др., 2010; Trawny и др., 2007, Zhukov и др., 2007), http://cres.usc.edu/pubdb_html/files_upload/566.pdf. На борту космического аппарата (КА) “Фобос-Грунт” установлена телевизионная система навигации и наблюдения (ТСНН), которая решается целый комплекс задач, в число которых входит измерение стереоскопическим методом дальности (высоты) до визируемой по-верхности и скорости перемещения видимой поверхности Фобоса в поле зрения камер. Для решения указанных задач используется процесс установления соответствия изображений одних и тех же точек поверхности на стереопарах и на последовательности кадров. От точности и устойчивости этого процесса зависит точность и устойчивость измерений высоты и скорости КА. На качественные показатели процесса установления соответствия влияет комплекс факторов, в число которых входит неравномерность чувствительности камер по полю зрения а, следовательно, неравномерность яркости обрабатываемых изображений по полю кадра.

Неравномерность чувствительности камер по полю зрения

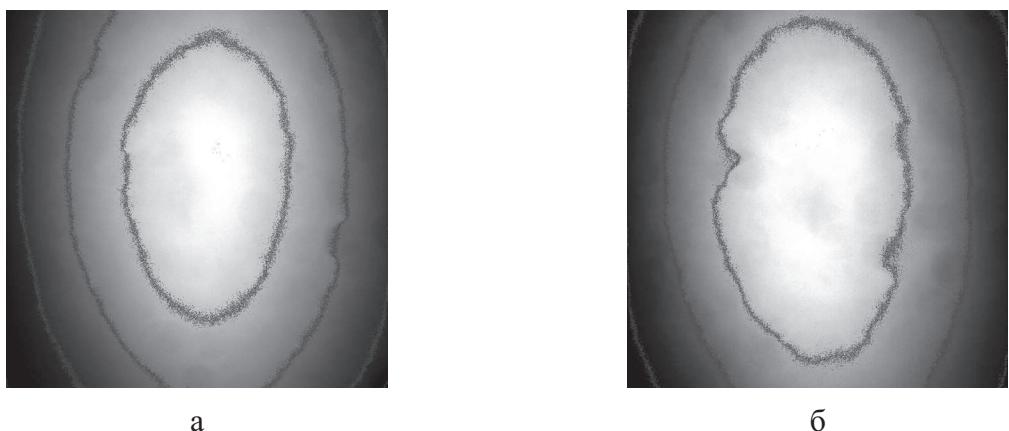
В справочной литературе приводится зависимость яркости изображения по полю зрения. Данная зависимость имеет вид:

$$E_{\omega} \approx E_0 \cos^4 \omega,$$

где E_0 – яркость в центре изображения (на оптической оси камеры); ω – угол между оптической осью камеры и направлением на визируемую точку поверхности.

В процессе посадки для измерений используются так называемые широкоугольные камеры ТСНН с шириной поля зрения 23,23°. Согласно этой формуле на краях изображения яркость должна быть порядка 0,92 от яркости в центре изображения, а яркость в углах изображения –

0,85 от яркости в центре изображения. На рис. 1 приведены изображения белой сферы, формируемые камерами ТСНН. Изображения получены в отделе Оптико-физических исследований.

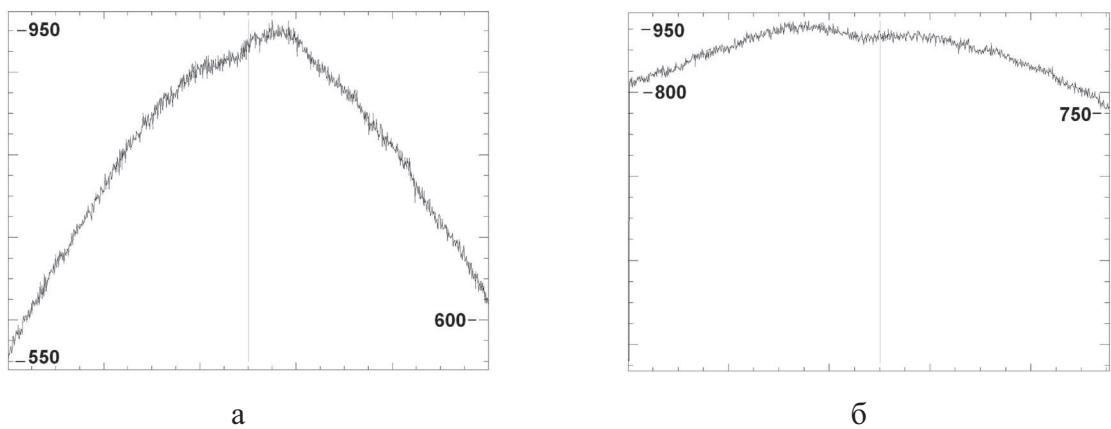


а

б

Рис. 1. Изображения белой сферы, полученные двумя камерами ТСНН, с нанесенными точками равной яркости: а) интервал яркостей: 89-982; шаг точек равной яркости: 128; б) интервал яркостей: 83-878; шаг точек равной яркости: 114

На рис. 2 приведены профили яркости изображения рис. 1а по горизонтали и вертикали.

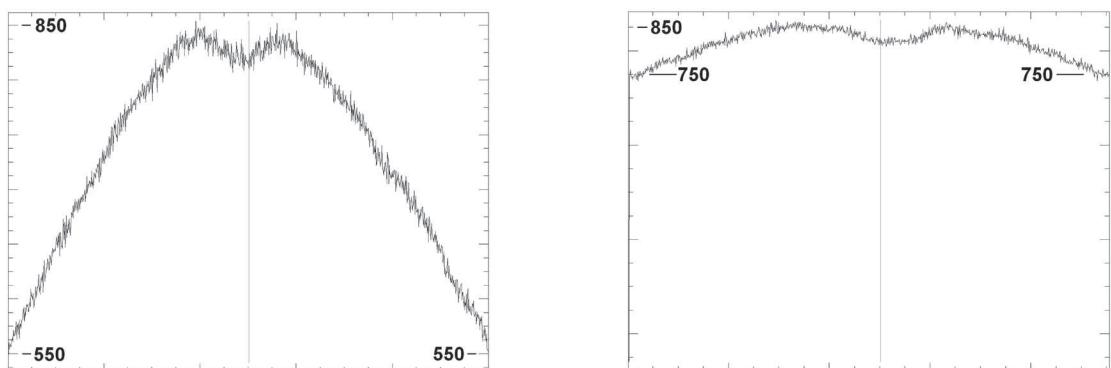


а

б

Рис. 2. Профили яркости изображения белой сферы, представленного на рис. 1а, по горизонтали (а) и по вертикали (б)

Яркость в центре изображения равна 930, яркость по краям изображения по горизонтали равна 560 и 620, что соответствует 0,6 и 0,67 от значения яркости в центре изображения. Среднее квадратическое отклонение яркости лежит в диапазоне 6-13.



а

б

Рис. 3. Профили яркости изображения белой сферы, представленного на рис. 1б по горизонтали (а) и по вертикали (б)

На рис. 3 приведены профили яркости изображения рис. 1б по горизонтали и вертикали. Яркость в центре изображения равна 818, яркость по краям изображения по горизонтали равна 556 и 562, что соответствует 0,68 и 0,69 от значения яркости в центре изображения. Среднее квадратическое отклонение яркости лежит в диапазоне 5-7.

Как следует из этих рисунков, реальная неравномерность яркости весьма велика, что требует разработки специальных мер по компенсации её негативного влияния.

Модификация алгоритмов установления соответствия

Для отработки алгоритмов были использованы изображения 1000×1000 , полученные на специальном стенде отдела Оптико-физических исследований. На рис. 4 показаны два изображения из набора, использованного для отработки алгоритмов в стереорежиме, а на рис. 5 – два изображения из набора для монокулярного режима.



Рис. 4. Стереопара

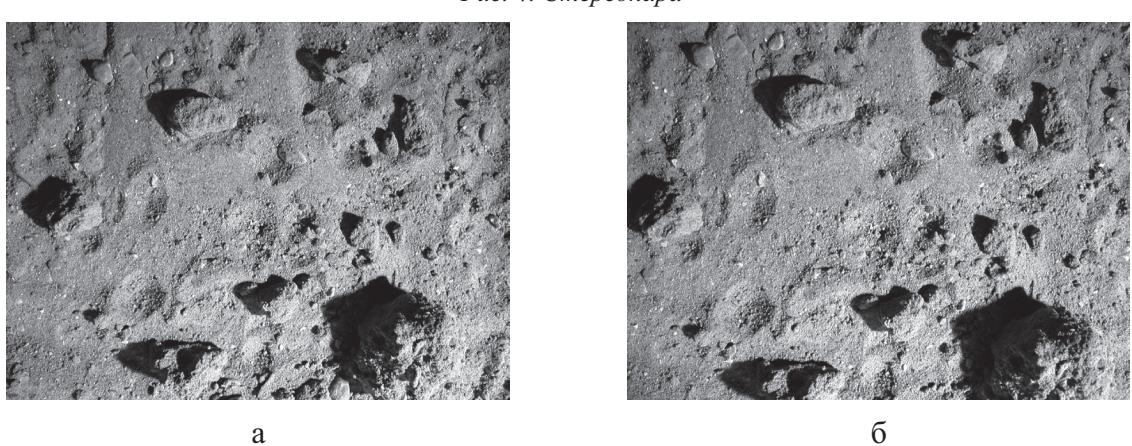


Рис. 5. Два последовательных изображения для монокулярного режима

Из указанных наборов изображений были сформированы изображения размером 250×250 пикселов для каналов установления соответствия низкого разрешения, поскольку все измерения построены по двухканальной схеме.

Для представления образов окрестностей точек использованы спектральные представления на вложенных носителях на основе преобразования Адамара. Для борьбы с отрицательным влиянием неравномерности яркости по полю зрения были проверены два спосо-

ба, а именно нормировка спектральных коэффициентов по величине средней яркости сравниваемых окрестностей и нормировка спектральных коэффициентов по степени корреляции между векторами коэффициентов. Указанные два способа являются наиболее простыми с вычислительной точки зрения, что важно в условиях жесткого дефицита вычислительной мощности.

Нормировка по степени корреляции между векторами коэффициентов \vec{V}_1 и \vec{V}_2 выполняется следующим образом. Сначала вычисляется коэффициент:

$$c = \frac{(\vec{V}_1 \cdot \vec{V}_2)}{\|\vec{V}_2\|^2}.$$

Затем вычисляется критериальные функция соответствия окрестностей:

$$S_1 = \sum_{i=1}^{18} |V_{1i} - cV_{2i}| - \text{сумма модулей разностей спектральных коэффициентов};$$

$$S_2 = \sum_{i=1}^{18} (V_{1i} - cV_{2i})^2 - \text{сумма квадратов разностей спектральных коэффициентов}.$$

Здесь первый индекс соответствует номеру окрестности (1 или 2), второй – номер компоненты вектора. При нормировке по величине средней яркости коэффициент с вычислялся следующим образом:

$$c = \frac{V_{11}}{V_{21}}.$$

В формуле первый компонент вектора образа окрестности – средняя яркость по окрестности 16×16 пикселов. При отсутствии нормировки используется $c=1$.

Для сравнения в качестве критериальной функции соответствия используется также коэффициент корреляции в спектральной области:

$$r = \frac{(\vec{V}_1 \cdot \vec{V}_2)}{\|\vec{V}_1\| \|\vec{V}_2\|}.$$

В табл. 1 приведены результаты оценки влияния изменения яркости на процесс установления соответствия для двух критериальных функций – суммы модулей разности и суммы квадратов разностей спектральных коэффициентов. Сравнение производилось для последовательности изображений в монокулярном режиме, общее количество точек – 2095. В каждом случае подсчитывалось количество точек, для которых установление производилось неправильно.

Таблица 1. Установление соответствия без нормировки яркости

Критериальная функция	Коэффициент изменения яркости К					
	1,0	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95
Сумма модулей разностей	13	24	46	71	97	133
Сумма квадратов разностей	14	30	69	144	248	336

Из табл. 1 следует, что при наличии даже незначительных различий в яркости, количество ошибок установления соответствия растет очень быстро, причем быстрее растет количество ошибок для критериальной функции - суммы квадратов разностей.

В табл. 2 приведены результаты оценки влияния нормировки на количество ошибок установления соответствия в существенно более широком диапазоне вариации яркости.

Таблица 2. Установление соответствия с нормировкой яркости

Критериальная функция	Нормировка	Коэффициент изменения яркости K						
		1,0	0,98	0,95	0,9	0,8	0,7	0,6
Сумма модулей разностей	По средней яркости	41	42	50	40	41	40	38
	По корреляции векторов	18	17	19	17	17	17	17
Сумма квадратов разностей	По средней яркости	49	54	50	52	52	49	49
	По корреляции векторов	19	22	19	20	20	20	20
Коэф. корреляции	Нет	25	26	24	26	23	26	26

Из табл. 2 следует, что нормировка по степени корреляции показывает существенно лучший результат, чем нормировка по средней яркости. Кроме того, коэффициент корреляции в качестве критериальной функции уступает по количеству ошибок как сумме квадратов, так и сумме модулей разностей спектральных коэффициентов. Наилучшие показатели по количеству ошибок установления соответствия у критериальной функции – суммы модулей разности с нормировкой по степени корреляции между векторами коэффициентов. Соответствующие ячейки таблицы выделены толстой линией. При этом количество ошибок ближе всего к количеству ошибок из табл. 1 при $K=1$ (одинаковой яркости изображений). Указанные эксперименты производились для случая, когда одно из сравниваемых изображений умножается на коэффициент K .

На процесс установления соответствия влияют также и градиенты яркости в пределах окрестности 16×16 пикселов. В наибольшей степени такое влияние проявляется в стереорежиме, где поиск особых точек для привязки производится в области большого градиента яркости изображения. Для оценки степени влияния градиентов яркости изображения были проведены расчеты, результаты которых приведены в табл. 3. Расчеты сделаны для критериальной функции – суммы модулей разностей при нормировке по степени корреляции векторов спектральных коэффициентов и коэффициенте изменения яркости $K=0,6$. Неравномерность яркости вводилась на изображении 250×250 пикселов. Дополнительный множитель яркости вычислялся по формуле:

$$K_i = 1 + g(i - 8.5)$$

Здесь i – номер пикселя окрестности размером 16×16 , который лежит в интервале от 1 до 16, g – величина градиента яркости.

Таблица 3. Влияние градиентов яркостей на количество ошибок установления соответствия

Градиент g	0	0,001	0,005	0,01	0,015	0,02
Неравномерность яркости по окрестности 16×16 в процентах	0	$\pm 0,75$	$\pm 3,75$	$\pm 7,5$	$\pm 11,25$	± 15
Градиент по оси, параллельной стереобазе	17	16	34	61	86	125
Градиент по оси, перпендикулярной стереобазе	17	18	33	65	81	109

Из анализа табл. 3 можно заключить, что даже неравномерность яркости по окрестности $\pm 3,75\%$ удваивает количество ошибок. При увеличении неравномерности количество ошибок растет. Неравномерность яркости для изображений белой сферы (рис. 1), пересчитанной на размер изображения 250×250 пикселов, достигает $\pm 6,5\%$ по окрестности

16×16 . Однако таких значений неравномерность яркости достигает только на самых краях изображения. В то же время области поиска особенностей для стереорежима отстоят от краев изображения на некоторое расстояние.

Для оценки степени **совокупного влияния** различий в яркости и градиенте яркости на основе изображений белой сферы, приведенных на рис. 1, были подготовлены маски яркости (нормированные к 1), размером 1000×1000 и 250×250 пикселов. Они умножались на изображения стереопар для моделирования неравномерной яркости получаемых камерами ТСНН изображений. Результаты моделирования процесса установления в стереорежиме приведены в табл. 4. Общее количество точек на последовательности стереопар – 913. Стереобаза съемки на стенде – 100 мм.

Таблица 4. ошибки установления соответствия в стереорежиме для различных критериальных функций

Критериальная функция	Нормировка	Маска выключена	Маска включена
Модуль разности	Нет	128	232
	По средней яркости	44	50
	По корреляции векторов	36	35
Квадрат разности	Нет	255	305
	По средней яркости	43	70
	По корреляции векторов	31	46
Коэф. корреляции	Нет	24	39

Для сравнения приведены данные о количестве ошибок в случае, когда маска яркости выключена. Сравнительно большое количество ошибок даже при отключенной маске показывает, что на использованных изображениях в стереорежиме на процесс установления соответствия влияют проективные искажения, а также не очень высокая точность калибровки стенда, вынуждающая существенно расширять области поиска при установлении соответствия, что в свою очередь повышает вероятность аномальных ошибок установления. При значениях стереобазы 1 и 10 мм число ошибок уменьшается, по крайней мере, на порядок. Дополнительным фактором, уменьшающим ошибки установления соответствия при малых стереобазах, является то, при малой дисперсии существенно меньше влияет неравномерность чувствительности по полю зрения.

Использование нормировки по степени корреляции векторов коэффициентов и в этом случае обеспечивает наилучшие результаты по количеству ошибок (ячейка таблицы выделена толстой линией).

Рассмотрим влияние неравномерности чувствительности камер по полю зрения на величины целевых функций особенностей. Целевые функции особенностей используются для выбора наиболее информативных точек первого изображения для повышения надежности и точности процесса установления соответствия. С другой стороны, значения целевых функций особенностей целесообразно использовать для предварительной селекции точек второго изображения, которые могут быть перспективны с точки зрения установления соответствия. Это позволяет исключить из анализа заранее бесперспективные точки. Т.е. если точка – кандидат имеет существенное отличие по величине целевой функции, то она может быть отброшена без расчета спектров. Это существенно уменьшает вычислительные затраты на процесс установления соответствия.

Очевидно, что чем меньше степень влияния неравномерности яркости по полю изображения, тем более эффективен такой метод сокращения вычислительных затрат. Шаблоны, используемые для вычисления целевой функции особенностей, приведены на рис. 6. Четыре шаблона показаны отдельно для упрощения восприятия рисунка. Реально они рассчитываются для каждой точки.

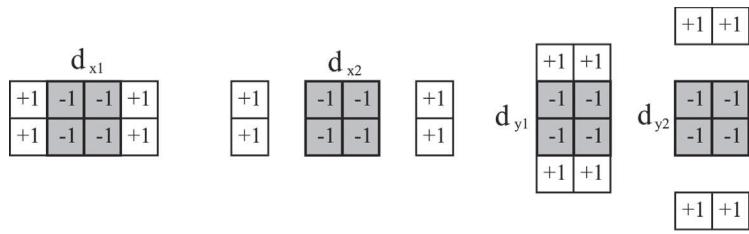


Рис. 6. Шаблоны, используемые для вычисления целевой функции особенностей

Целевая функция особенностей рассчитывается по формуле:

$$f = d_{x1} + d_{x2} + d_{y1} + d_{y2}$$

Выбираются точки, удовлетворяющие условию: $f \rightarrow extr$. Для того, чтобы пороги сравнения не зависели от значения целевой функции особенности на первом изображении, используется нормировка:

$$f_2^* = \frac{f_2 - f_1}{f_1}$$

Здесь f_2 и f_1 – значения целевой функции особенности на первом и втором изображении. Количество ошибок установления соответствия определялось для изображения размером 250×250 пикселов, поскольку на изображении низкого разрешения величины градиентов яркости существенно больше. Соответственно, маски пересчитывались на указанный размер. Расчеты производились для стереорежима с базой 100 мм. Общее количество точек – 886.

Сравнивались три случая:

- Без нормировки.
- С нормировкой по яркости центральной области.
- С нормировкой по яркости всех пикселов, используемых для вычисления целевой функции.

В целом, нормировка по яркости всех пикселов, используемых для вычисления целевой функции, предпочтительнее (меньше разброс гистограммы значений нормированной целевой функции f_2^* и смещение среднего значения целевой функции). В табл. 5 приведены результаты расчетов для случая без нормировки и с нормировкой по яркости всех пикселов.

Таблица 5. Ошибки установления соответствия в зависимости от порога селекции особенностей

Граница селекции f_2^*	$\pm 0,8$	$\pm 0,7$	$\pm 0,6$	$\pm 0,5$	$\pm 0,4$	$\pm 0,3$
Без нормировки	60	69	172	321	—	—
С нормировкой по всем пикселям	62	62	62	63	69	90

Из таблицы следует, что можно выбирать границы селекции особенностей равными $\pm 0,5$ - $0,6$. При этом количество ошибок установления соответствия возрастает совсем незначительно с 59, когда селекция по величине целевой функции не производится, до 62-63 ошибок. При указанном выборе границ селекции особенностей вычислительная сложность установления соответствия для двухканальных алгоритмов уменьшается в 3-4 раза, что весьма существенно.

Указанные простые способы нормировки не исключают влияния градиента маски, особенно в случае противоположного направления градиента на двух изображениях. Более сложные методы нормировки, которые позволяют это учесть, имеют заметную вычислительную сложность и поэтому неприемлемы.

Выводы

В статье представлены методика и результаты оценки эффективности различных способов уменьшения влияния неравномерности яркости изображений по полю кадра на процесс установления соответствия. В результате анализа полученных результатов был выбран и проверен на тестовых последовательностях изображений способ нормировки спектральных коэффициентов, обеспечивающий робастность к неравномерности яркости изображений по полю зрения телевизионных камер. Выбран способ нормировки целевых функций особенностей для повышения робастности процесса селекции точек в тех же условиях. Указанный способ позволяет для используемых двухканальных алгоритмов установления соответствия уменьшить вычислительную сложность в 3-4 раза.

Литература

1. *Parreira B., Vasconcelos J., Oliveira R., Caramagno A., Motrena P., Dinis J., Rebordão J.* Performance Assessment of Vision Based Hazard Avoidance During Lunar And Martian Landing // Proceedings of 7th International Planetary Probe Workshop. Barcelona, Spain. 2010.
2. *Pham B., Lacroix S., Devy M., Voirin T., Drieux M., Bourdarias C.* Fusion of Absolute Vi-sion-Based Localization and Visual Odometry For Spacecraft Pinpoint Landing // Proceedings of 7th International Planetary Probe Workshop. Barcelona, Spain. 2010.
3. *Trawny N., Mourikis A., Roumeliotis S., Johnson A., Montgomery J., Ansar A., Matthies L.* Coupled Vision and Inertial Navigation for Pin-Point Landing // Proceedings of the NASA Science and Technology Conference (NSTC'07). 2007. Paper B2P2.
4. *Zhukov B., Avanesov G., Grishin V., Krasnoperovtseva E.* On-Board Real-Time Image Processing to Support Landing on Phobos // Proceedings of the 7th International Symposium: Reducing the Costs of Spacecraft Ground Systems and Operations (RCSGSO). Moscow, Russia. 2007. P. 423-428.

Analysis and optimization of correspondence algorithms functioning in a nonuniformity sensitivity across the field of TV cameras view

V. A. Grishin

*Space Research Institute (IKI) of RAS
117997 Moscow, 84/32 Profsoyuznaya str.
E-mail: vgrishin@iki.rssi.ru*

Real TV cameras have unequal sensitivity across the field of view. This inequality affects the correspondence algorithms which are used for establishing of correspondence between images of the same surface points on different frames. The paper presents various methods to reduce the influence of this factor and a comparison of their effectiveness. The possibility of introducing the normalization of the feature objective function is demonstrated. This normalization allows discarding obviously unpromising points. Such selection allows reducing the computational complexity of the correspondence process.

Keywords: spacecraft landing, computer vision system, correspondence, inequality of sensitivity across the field of view, the feature objective function.