

## **Анализ влияния динамики космического аппарата на характеристики алгоритмов обработки изображений в монокулярном режиме**

**В. А. Гришин, Е. В. Белинская**

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

В статье представлена методика и результаты анализа влияния динамики космического аппарата (КА) на характеристики алгоритмов обработки изображений в бортовой системе технического зрения, работающей в монокулярном режиме. Учет динамики КА при разработке алгоритмов обработки изображений позволяет оптимизировать их параметры, повысить надежность и устойчивость измерений.

**Ключевые слова:** посадка космических аппаратов, системы технического зрения, монокулярный канал измерений относительных скоростей

### **Введение**

В настоящее время системы технического зрения все более активно применяются в задачах управления процессом посадки [1-4]. На борту КА “Фобос-Грунт” установлена телевизионная система навигации и наблюдения (ТСНН). ТСНН решает целый комплекс задач, в число которых входит измерение скорости перемещения видимой поверхности Фобоса в поле зрения камер [5-6]. Эта скорость используется для расчета компонент скорости КА по отношению к поверхности Фобоса.

В процессе работы ТСНН цикл обработки информации составляет 6 с. При большой длительности цикла обработки информации даже сравнительно небольшие скорости углового и линейного перемещений КА могут быть критичными. Поэтому в данной работе ставилась задача оценить влияние динамики КА на характеристики алгоритмов обработки изображений в монокулярном режиме, так как динамика движения КА влияет самым непосредственным образом на характер перемещения поверхности Фобоса в поле зрения камер.

### **Методика и результаты моделирования**

Поскольку весь процесс измерений в монокулярном режиме базируется на выделении особенностей (т.е. точек, обладающих свойством хорошей привязки) на изображении и определении их положения на следующем кадре, то анализировался выход граничных точек области поиска особенностей за границы области поиска соответствия на следующем кадре. Даже частичный выход области поиска особенностей за границы области поиска соответствия создает предпосылки того, что соответствие изображений точек будет установлено с ошибкой. Следствием этого может быть ошибка расчета компонент скорости КА.

В настоящее время имеются четыре сценария посадки на поверхность Фобоса. Два сценария, разработанные в НПО им. С. А. Лавочкина, и два сценария, разработанные в ИПМ им. М. В. Келдыша. Сценарии посадки, разработанные в НПО им. С. А. Ла-

вочкина, отличаются тем, что полет КА осуществляется в режиме инерциальной стабилизации, что исключает большие угловые скорости КА. Кроме того, даже в “быстром” сценарии посадки, который характеризуется сравнительно большими скоростями сближения с Фобосом, предусматривается зависание КА над поверхностью Фобоса на высоте 200 м. При этом создаются благоприятные условия для работы ТСНН, в частности в монокулярном режиме.

Что касается двух сценариев посадки, разработанных в ИПМ им. М. В. Келдыша, то в них полет КА осуществляется в режиме ориентации оси ОХ аппарата параллельно местной нормали к поверхности. Это приводит к интенсивным колебаниям КА с большими угловыми скоростями, что существенно затрудняет работу монокулярного канала системы технического зрения. По указанным причинам было проведено моделирование работы монокулярного измерителя ТСНН для двух сценариев посадки, разработанных в ИПМ им. М. В. Келдыша.

Поскольку выход особенностей из области поиска соответствия вызывается как уменьшением высоты за время цикла измерений, так и угловым движением КА, оценивалось влияние этих факторов как по-отдельности, так и их совместное влияние.

Рассмотрим сценарий посадки ИПМ им. М. В. Келдыша, при котором осуществляется сход с квазисинхронной орбиты (КСО) с упреждением прохождения траверза точки посадки. На рис. 1 представлен график зависимости изменения углов ориентации за время цикла измерений, а также коэффициента масштабирования изображения  $M$  как функций времени. Здесь угол  $\Delta\psi$  соответствует повороту вокруг оптической оси, углы  $\Delta\theta$  и  $\Delta\phi$  соответствуют повороту вокруг осей, лежащих в плоскости ПЗС-матрицы. Величины углов измеряются в градусах. Цикл измерения равен 6 с. Время, равное нулю, здесь соответствует высоте 5397 м.

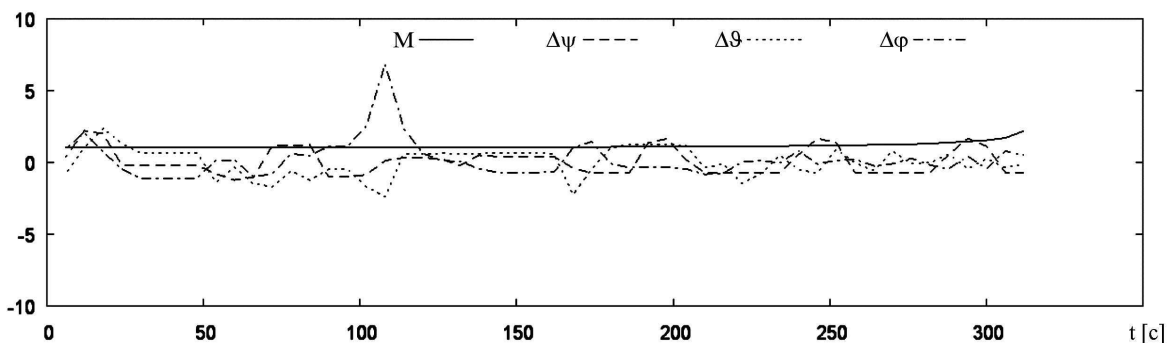


Рис. 1. График зависимости изменения углов ориентации за время цикла измерений в градусах, а также коэффициента масштабирования изображения  $M$  как функций времени

Для анализа влияния динамики КА на выход точек за границы области установления соответствия был произведен расчет выхода за границы этой области размером  $46 \times 46$  пикселей восьми точек, лежащих на границе области поиска особенностей размером  $20 \times 20$  пикселей (рис. 2). Здесь рассматривается 16-кратно загрубленное изображение, полученное из исходного изображения  $1000 \times 1000$  пикселей. Полученное изображение имеет размер  $62 \times 62$  пикселя. Поскольку для вычисления образа окрестности точки необходимо, чтобы точка отстояла от края изображения не менее чем на 8 пикселей, то получается размер области поиска соответствия –  $46 \times 46$  пикселей.

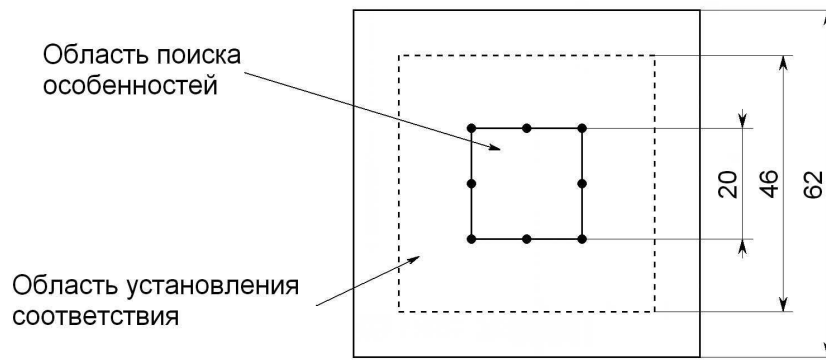
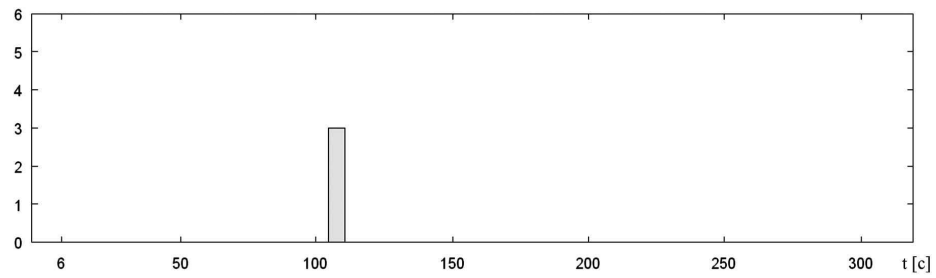
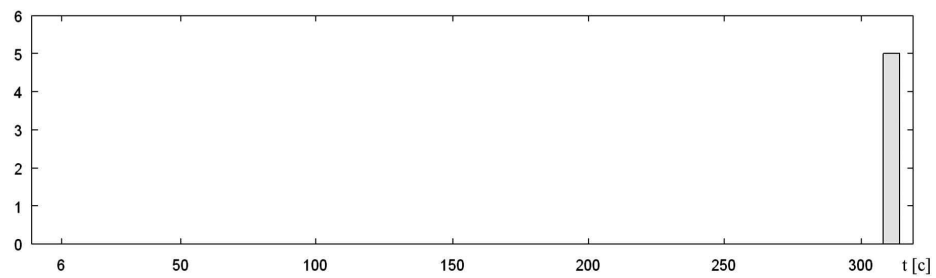


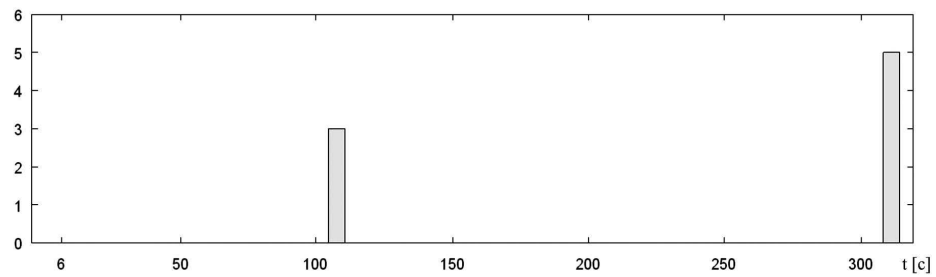
Рис. 2. Размеры областей поиска особенностей и установления соответствия на изображении 62×62 пикселя



**А**



**Б**



**В**

Рис. 3. Число точек, вышедших за границу области поиска соответствия за время цикла измерений.

- а) учет разворота камеры; б) учет изменения высоты съемки;  
в) учет изменения высоты съемки и разворота камеры

На рис. 3 представлены зависимости числа точек (из 8 рассматриваемых), вышедших за границу области поиска соответствия. По горизонтальной оси отложено время в секундах. Рис. 3а. показывает влияние разворотов КА, рис. 3б показывает влияние уменьшения высоты за время цикла измерений. Как следует из этих графиков, влияние угловых разворотов наиболее существенно сказывается при  $t \approx 108$  с, что соответствует высоте  $h \approx 3193$  м. Именно здесь возможны сбои монокулярного канала ТСНН. Влияние масшта-

бирования изображения наиболее существенно сказывается при  $t \approx 312$  с и соответственно  $h \approx 29$  м. Здесь также возможны сбои измерений. Совокупное влияние этих двух факторов представлено на рис. 3в.

Анализ графиков показывает, что выход точек за пределы поля зрения обуславливается как уменьшением расстояния, так и угловой динамикой аппарата. Влияние уменьшения расстояния сказывается только на последних десятках метров.

Для оптимизации области поиска представляет интерес гистограмма распределения величины выхода точек за границы области установления соответствия (рис. 4). По горизонтали откладывается длина вектора перемещения точки за пределами области установления соответствия в пикселях.

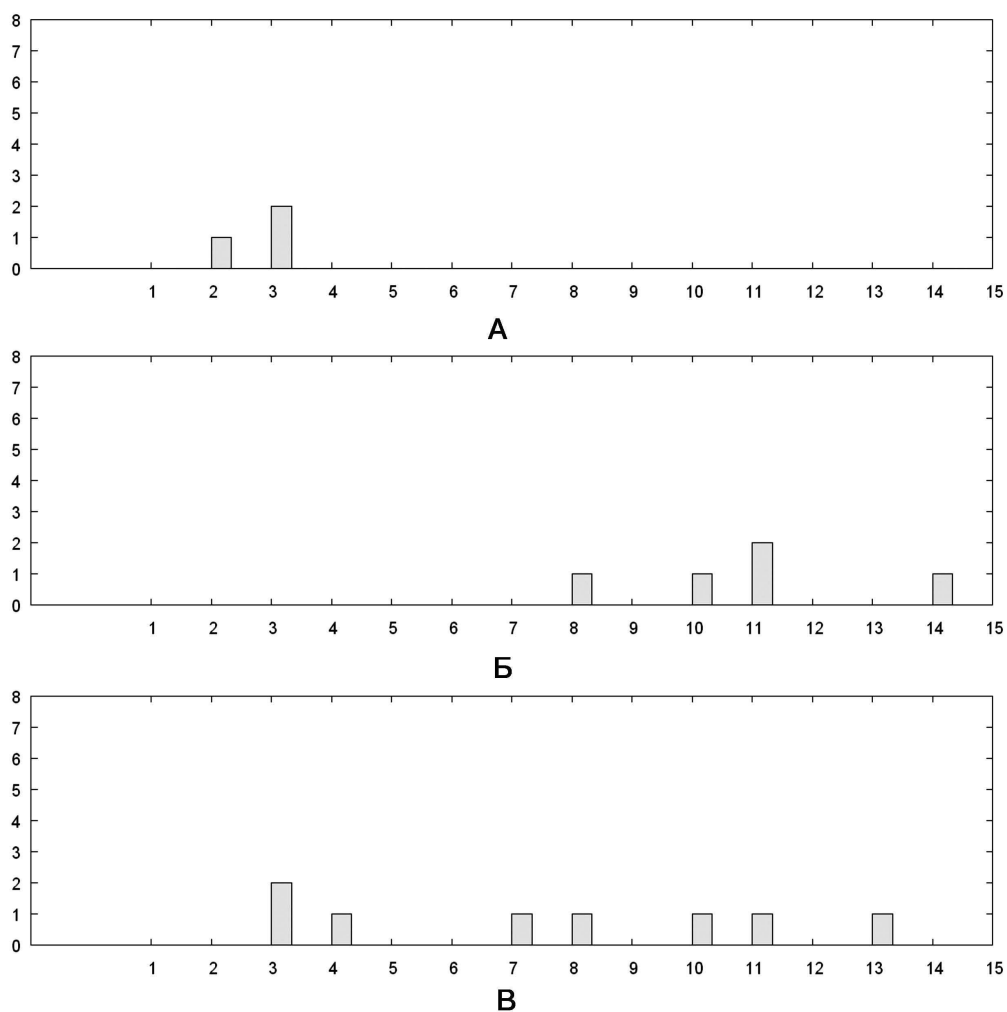


Рис. 4. Гистограмма, показывающая зависимость числа точек, выходящих за пределы области поиска соответствия, в зависимости от длины вектора перемещения, лежащей за границами этой области.

а) учет разворота камеры; б) учет изменения высоты съемки;

в) учет изменения высоты съемки и разворота камеры

Анализ гистограмм показывает, что угловые развороты КА вызывают выход точек за границы области поиска соответствия, не превышающий 4 пикселя. В то же время как изменение высоты вызывает выход за границы области поиска соответствия более чем на 14 пикселей. Очевидно, что если точка вышла за указанные границы, то соответствие для неё не может быть правильно установлено, и невозможно получить правильную оценку скорости КА. Поэтому минимальная высота, на которой будет способна работать система

в монокулярном режиме, зависит в первую очередь от вертикальной скорости КА на последних десятках метров, остающихся до поверхности.

Рассмотрим сценарий посадки ИПМ им. М. В. Келдыша, при котором осуществляется сход с КСО при прохождении траверза точки посадки. Время, равное нулю, здесь соответствует высоте 5450 м. Результаты расчетов представлены на рис. 5-7.

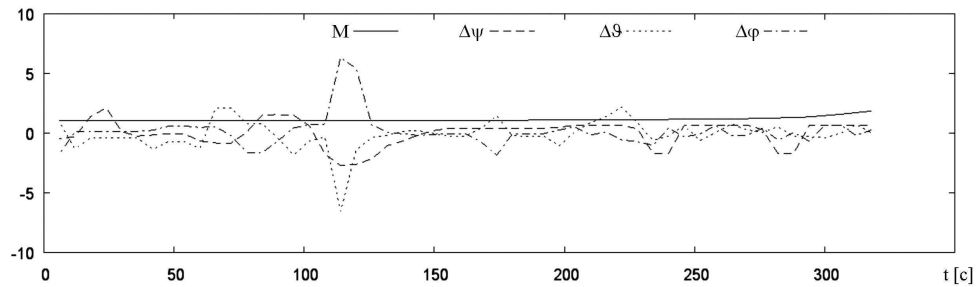


Рис. 5. График зависимости изменения углов ориентации за время цикла измерений в градусах, а также коэффициент масштабирования изображения  $M$  как функции времени

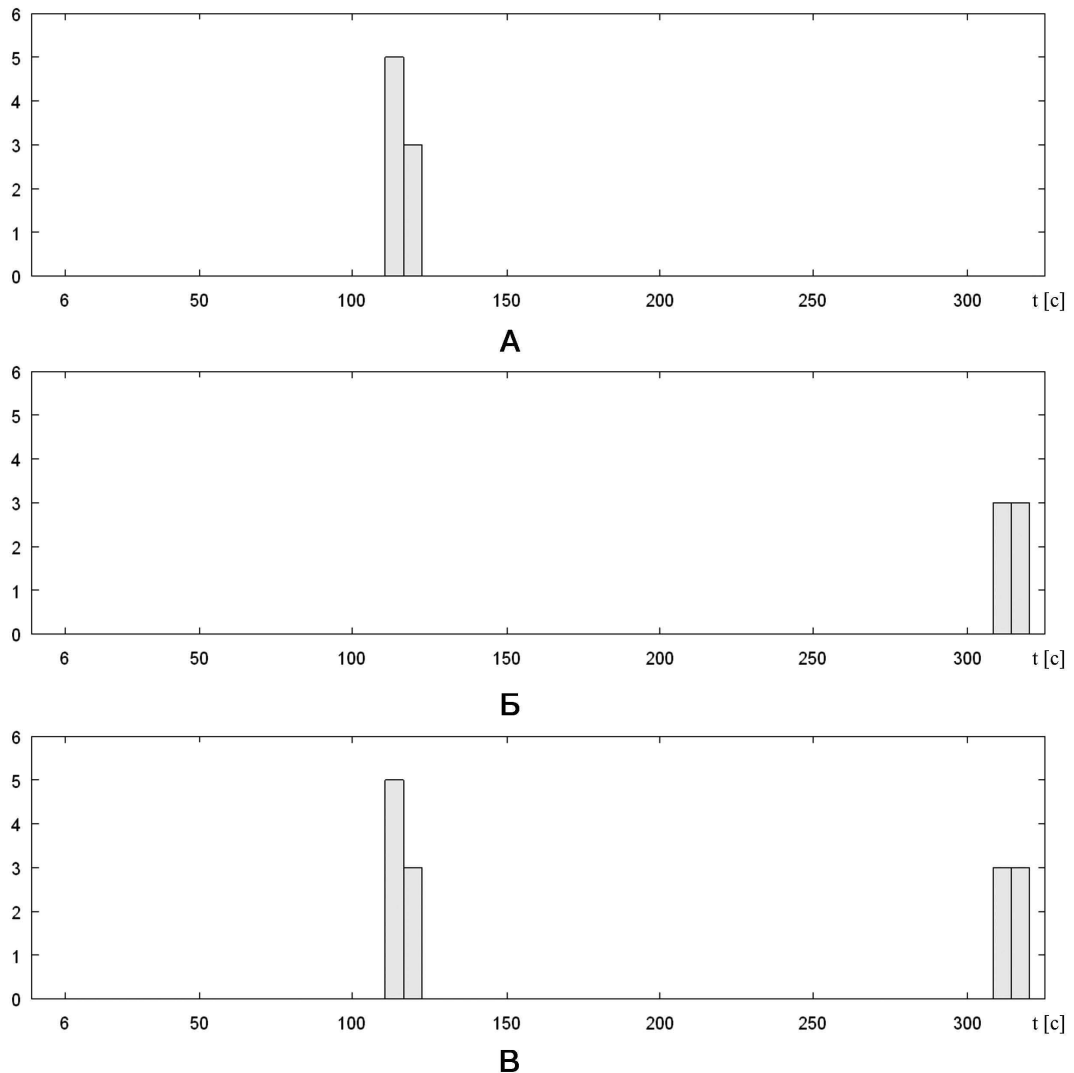


Рис. 6. Число точек, вышедших за границу области поиска соответствия за время цикла измерений.

- а) учет разворота камеры; б) учет изменения высоты съемки.
- в) учет изменения высоты съемки и разворота камеры

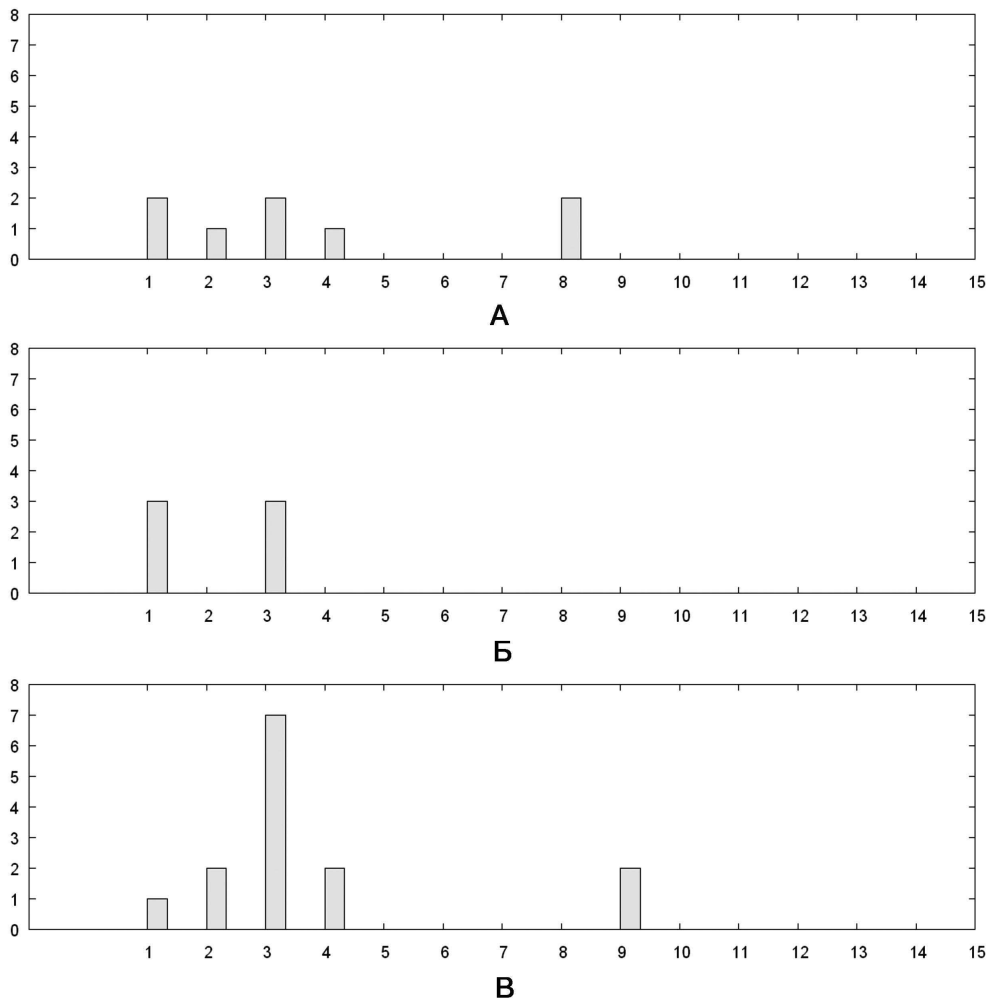


Рис. 7. Гистограмма, показывающая зависимость числа точек, выходящих за пределы области поиска соответствия, в зависимости от длины вектора перемещения, лежащей за границами этой области.  
 а) учет разворота камеры; б) учет изменения высоты съемки;  
 в) учет изменения высоты съемки и разворота камеры

Как следует из этих графиков, влияние угловых разворотов наиболее существенно сказывается при  $t \approx 114$  с и  $t \approx 120$  с, что соответствует высотам  $h \approx 3190$  м и  $h \approx 3070$  м. Именно здесь возможны сбои монокулярного канала ТСНН. Влияние масштабирования изображения наиболее существенно сказывается при  $t \approx 312$  с и  $t \approx 318$  с и соответственно высотах  $h \approx 50$  м и  $h \approx 29$  м. Здесь также возможны сбои измерений.

Анализ этих графиков и гистограмм показывает, что результаты, полученные по двум сценариям посадки ИПМ им. М. В. Келдыша, различаются не принципиально, хотя при использовании сценария схода с КСО при прохождении траверза точки посадки в большей степени ухудшают условия измерений угловые развороты, а при использовании сценария схода с КСО с упреждением прохождения траверза точки посадки – масштабирование изображения на малых расстояниях.

При частотах дискретизации, сопоставимых или меньших значений характерных частот дискретизируемого процесса, может иметь место заметная чувствительность к начальной фазе сетки дискретизации. Поэтому была выполнена проверка влияния начального сдвига цикла измерений (от 0 до 6 секунд с шагом 1 с) на результаты оценки выхода точек за пределы поля зрения. Были произведены соответствующие расчеты. Полученные значения занимают большой объем и здесь не приводятся. Анализ полученных результа-

тов показал, что изменение начального времени съемки не оказывает существенного влияния на оценку рассматриваемых параметров, в частности числа точек, выходящих за границу кадра.

Уменьшать размеры области поиска особенностей с целью предотвращения выхода точек из поля зрения нецелесообразно, поскольку величина выхода точки за границы области поиска соответствия достигает 9-14 пикселей. Таким образом, даже сокращение размеров области поиска особенностей до нуля не решит эту проблему. Не говоря уже о том, что сокращение области поиска особенностей уменьшает вероятность нахождения точки с хорошими свойствами привязки. При посадке по сценарию с упреждением прохождения траверза точки посадки в двух циклах измерений из 52 возможен выход особенностей за границы области поиска. Таким образом, в 96% измерений динамика КА не будет вызывать сбоев измерений. Аналогично, при посадке по сценарию с прохождением траверза точки посадки в четырех циклах измерений из 53 возможен выход особенностей за границы области поиска. Соответственно, в 92% измерений динамика КА не будет вызывать сбоев измерений.

## Выводы

Для монокулярного режима работы ТСНН проанализированы величины перемещений граничных точек области поиска особенностей предыдущего кадра на последующем кадре. Установлено, что, даже при выполнении посадки по сценариям ИПМ им. М. В. Келдыша, динамика КА не будет вызывать сбоев процесса измерений в монокулярном режиме ТСНН в течение большей части времени сближения с Фобосом.

## Литература

1. *Johnson A., Matthies L.* Precise Image-Based Motion Estimation for Autonomous Small Body Exploration // Proceedings of the Fifth International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (ISAIRAS '99). 1999. P. 627-634.
2. *Cheng Y., Johnson A., Matthies L.* MER-DIMES: A Planetary Landing Application of Computer Vision // IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2005). 2005. V. 1. P. 806-813.
3. *Montgomery J., Johnson A., Roumeliotis S., Matthies L.* The Jet Propulsion Laboratory Autonomous Helicopter Testbed: A Platform for Planetary Exploration Technology Research and Development // Journal of Field Robotics, 2006. V. 23. Issue 3-4. P. 245-267.
4. *Trawny N., Mourikis A., Roumeliotis S., Johnson A., Montgomery J., Ansar A., Matthies L.* Coupled Vision and Inertial Navigation for Pin-Point Landing // Proc. of the NASA Science and Technology Conference (NSTC'07). 2007. Paper B2P2.
5. *Zhukov B., Avanesov G., Grishin V., Krasnopevtseva 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.
6. *Гришин В. А.* Алгоритмы измерения высоты и компонент скорости по телевизионным изображениям при посадке на Фобос // Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции "Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов". Серия Механика, управление и информатика. ИКИ РАН. Россия. Таруса. 22-25 сентября 2008 г. М.: ИКИ РАН, 2008. С. 279-293.

# **Analysis of spacecraft dynamics effects on the characteristics of image processing in computer vision system in monocular mode**

**Grishin V. A., Belinskaya E. V.**

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

This paper describes the method and analysis results of spacecraft dynamic effects on the characteristics of image processing in the on-board computer vision system. The monocular mode of the computer vision system is investigated. Taking into account the spacecraft dynamics during image processing algorithms' development it is possible to optimize their parameters, to increase reliability and robustness of a measurement.

**Keywords:** spacecraft landing, computer vision systems, monocular channel relative velocity measurement.