

## БОРТОВОЕ ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ПОСАДКИ НА ФОБОС

*Б.С. Жуков<sup>1</sup>, С.Б. Жуков<sup>2</sup>, В.А. Гришин<sup>1</sup>, Р.В. Гордеев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Институт космических исследований Российской академии наук, Москва

<sup>2</sup> Автономная некоммерческая организация — АНО «Космос-НТ», Москва

Разработано программно-алгоритмическое обеспечение (ПАО) телевизионной системы навигации и наблюдения (ТСНН), которое при посадке космического аппарата (КА) на поверхность Фобоса позволяет измерять высоту и скорость КА, а также осуществлять автономный выбор места посадки. Цикл съемки, обработки информации и передачи результатов в бортовой компьютер занимает 6 с. ПАО отлажено с использованием стереоизображений шероховатых поверхностей со структурой, характерной для поверхности Фобоса.

Algorithms and software have been developed for the Television System of Navigation and Observation (TSNN) on-board the Phobos-Grunt s/c to provide for an autonomous selection of a landing site and back-up measurements of the s/c altitude and velocity during landing onto Phobos. A cycle of imaging, data processing and information exchange with the central computer takes 6 s. The algorithms and software are tested using stereo-images of rough surfaces with a structure typical for the Phobos surface.

### Введение

Телевизионная система навигации и наблюдения (ТСНН) на борту космического аппарата (КА) «Фобос-Грунт», состоящая из двух узкоугольных (УТК) и двух широкоугольных (ШТК) камер, предназначена для решения как научных, так и навигационных задач миссии [1]. На этапе посадки космического аппарата на поверхность Фобоса будет проводиться одновременная съемка всеми четырьмя камерами:

- с целью записи полных изображений во флэш-память камер;
- формирования сжатых кадров репортажной съемки;
- построения карты пригодности поверхности для посадки;

- определения расстояния до поверхности Фобоса;
- измерения смещения опорного объекта на последовательных изображениях для оценки боковой скорости КА.

Для решения указанных задач разработано программно-алгоритмическое обеспечение (ПАО) режима «Посадка».

### 1. Общие принципы построения ПАО ТСНН в режиме «Посадка»

Программно-алгоритмическое обеспечения ТСНН в режиме «Посадка» осуществляет управление работой камер ТСНН, автономную обработку получаемых ими изображений и обмен информацией с бортовым вычислительным комплексом (БВК) при спуске КА на поверхность Фобоса. ПАО реализовано на процессорах ADSP-21060 камер ТСНН с тактовой частотой 24 МГц. Служебные функции ПАО реализованы на языке Ассемблер, измерительные — на языке Си.

Программно-алгоритмическое обеспечение «Посадка» одинаково для всех камер ТСНН (различие камер учитывается заданием характеризующих их параметров).

Все камеры начинают работать синхронно при включении режима «Посадка» и заканчивают работу после посадки на поверхность Фобоса. УТК пропускает ряд функций, выполняемых ШТК (построение карты пригодности, оценка боковых смещений), поскольку из-за своего малого поля зрения она не может их эффективно выполнять.

Измерения высоты и скорости КА, а также построение карты пригодности производятся каждой камерой в течение всего спуска, а не только на тех высотах, на которых эти измерения будут реально использоваться алгоритмом управления посадкой в БВК. При этом «левая» и «правая» камеры (УТК или ШТК) работают по симметричной схеме: например, в то время как «правая» камера измеряет высоту с использованием опорных точек, выделенных «левой камерой», «левая» камера определяет высоту с использованием опорных точек, выделенных «правой» камерой.

Ряд функций (например, способ построения карты пригодности) оптимизирован для тех интервалов высот, для

которых результаты этих функций реально будут использоваться [1].

Протокол информационного обмена с БВК по мультиплексному каналу обмена (МКО) идентичен для всех камер ТСНН, что значительно упрощает алгоритмы обмена.

Преимущество унификации ПАО — его упрощение, повышение надежности, сокращение временных затрат на разработку и отладку, а также резервирование измерений.

## 2. Структура ПАО режима «Посадка»

После включения камер и подготовительных операций (тестирования, инициализации внутренних буферов данных, передачи параметров съемки и алгоритмических параметров) осуществляются циклы съемки, обработки информации и информационного обмена с БВК. Каждый цикл инициализи-

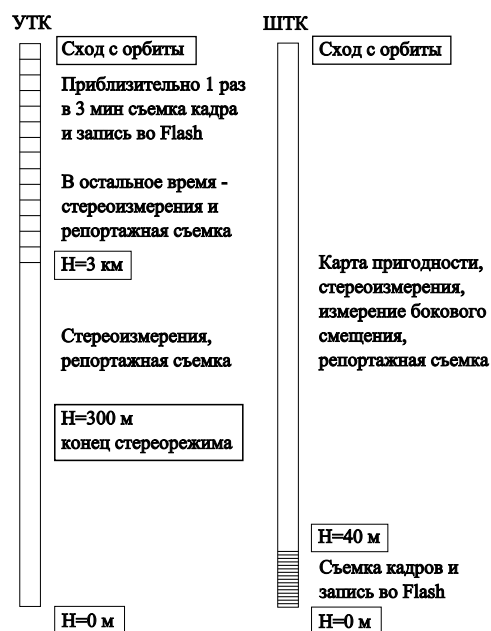


Рис. 1. Чередование циклов измерений и записи изображений при спуске КА на поверхность Фобоса

зируется командой синхронизации, поступающей от БВК одновременно в каждую камеру. Длительность одного цикла — 6 с.

Для того чтобы не увеличивать время цикла за счет записи полных изображений во флэш-память, измерения и запись изображений проводятся поочередно (рис. 1). На высотах, где измерения наиболее критичны, они не прерываются и запись во флэш-память не производится. Периодичность записи во флэш-память и интервал высот, на которых такая запись осуществляется, задаются параметрами программы посадки. Например, для УТК запись во флэш-память можно осуществлять 1 раз в 3 мин, т. е. 1 раз на 30 циклов измерений от момента схода с орбиты и до высоты 3 км, с которой начинается наиболее критический участок для измерений УТК [1]. Стереоизмерения УТК проводятся до высоты 300 м, где перекрытие стереоизображений уменьшается до 50 %. Для ШТК запись изображений можно начать на высотах ниже 40 м после прекращения измерений и проводить запись на каждом цикле [1].

Командами с Земли можно изменять:

- параметры съемки (время экспонирования, коэффициент усиления, число кадров и др.),
- алгоритмические параметры (пороги выделения и установления соответствия опорных точек, размеры областей поиска соответствия, углы взаимной ориентации камер, периодичность записи изображений во флэш-память и др.).

Режим «Посадка» заканчивается передачей в БВК записанных полных изображений из буферов данных камер и их выключением.

## 3. Циклы измерений и записи изображений

Циклограмма работы камер ТСНН при измерениях приведена в таблице.

После получения команды синхронизации осуществляются экспозиция и считывание изображения с ПЗС-матрицы. Далее выполняются:

- коррекция засветки, заглубление разрешения изображения и формирование кадра репортажной съемки;

- выбор опорных точек для стереообработки;
- обмен информацией между камерами о параметрах опорных точек;
- построение карты пригодности поверхности для посадки (только для ШТК);
- нахождение соответствия опорных точек в стереорежиме и расчет расстояния до поверхности Фобоса;
- определение бокового смещения по опорной точке, выделенной в монокулярном режиме на предыдущем цикле (только для ШТК);

Циклограмма работы камер ТСНН при измерениях  
(РК — репортажный кадр, КС — командное слово)

Номер такта (20 мс)	Операции в камере	Обмен по МКО
1	—	Синхронизация
2	Экспозиция (<10 мс)	—
3–15	Считывание (250 мс)	
16–139	Коррекция, закругление, формирование РК (2,5 с)	
140–156	Выбор опорных точек для стерео (0,33 с)	Передача РК (25 КС)
157–164	—	
165–216	—	Обмен между камерами параметрами опорных точек для стерео (2×26 КС)
217–244	Построение карты пригодности, оценка высоты, оценка бокового смещения и выбор новой опорной точки для монокулярного режима (0,42 с)	—
245–251	—	Передача карты пригодности
252	—	Передача результатов измерений
253–277	—	Передача РК (25 КС)
278–299	Резерв	Резерв
300	Переход к такту № 1 $N_k$ раз	—

- поиск новой опорной точки в монокулярном режиме для определения бокового смещения на следующем цикле (только для ШТК);
- передача карты пригодности и результатов измерений расстояния и бокового смещения в БВК.

*Коррекция засветки* позволяет устранить влияние засветки при переносе изображения по вертикальным регистрам ПЗС-матрицы. Коррекция сводится к вычислению среднего значения сигнала, полученного в первых трех «темновых» строках каждого столбца изображения, и его вычитанию из сигнала остальных пикселей столбца.

*Загрубление разрешения изображения* (четырёх- и шестнадцатикратное) используется:

- для построения карты пригодности,
- реализации иерархических алгоритмов установления соответствия в стерео- и монокулярном режимах [2].

*Формирование кадра репортажной съемки* (РК) происходит путем сжатия исходного изображения. Репортажный кадр передается в БВК за 20 циклов (по 2 порции по 25 КС за 1 цикл). По окончании передачи РК обновляется.

*Выбор опорных точек для стереообработки* осуществляется по четырехкратно загрубленному изображению и уточняется по исходному изображению в соответствии с алгоритмом [2]. Максимальное число выделяемых опорных точек равно 10.

*Обмен информацией между камерами о параметрах опорных точек* (их координатах и «спектрах») происходит по мультиплексному каналу обмена под управлением БВК.

*Построение карты пригодности поверхности для посадки* производится по признаку фотометрической неоднородности получаемого изображения, кодируемому значениями от 0 до 255. За основу критерия неоднородности принимается относительная дисперсия яркости изображения в движущемся окне, размер которого соответствует требуемому размеру площадки для посадки. Для более точного выбора оптимального места посадки анализ однородности изображения в движущемся окне проводится с перекрытием 50 %. При наличии

затенения, определяемого пороговым методом, окно получает максимальное значение кода неоднородности (255). Далее производится взвешенная НЧ-фильтрация карты пригодности во избежание выбора места посадки вблизи сильных неоднородностей рельефа. Координаты оптимального места посадки соответствуют минимуму карты пригодности. Для ускорения вычислений карта пригодности строится по четырехкратно загрубленному изображению, которое в требуемом интервале высот 200...50 м обеспечивает требуемое разрешение 32...8 см. До высоты 50 м размер окна адаптируется к изменению высоты так, чтобы обеспечить его постоянный размер на поверхности равным 10 м. На более низких высотах размер окна на поверхности линейно уменьшается до 3 м на высоте 10 м.

*Нахождение соответствия опорных точек в стереорежиме* осуществляется по четырехкратно загрубленному изображению и уточняется по исходному изображению в соответствии с алгоритмом [2]. По стереопараллаксу опорных точек, соответствие которых установлено, рассчитывается среднее расстояние до поверхности Фобоса. Ошибка измерения высоты определяется с учетом среднеквадратического отклонения расстояний до опорных точек и разрешения изображения. Факт измерения высоты отмечается соответствующим флагом.

*Определение бокового смещения по опорной точке, выбранной в монокулярном режиме на предыдущем цикле* в той же камере, производится, начиная со второго кадра по шестнадцатикратно загрубленному изображению, и уточняется по четырехкратно загрубленному изображению в соответствии с алгоритмом [2]. Факт измерения бокового смещения отмечается соответствующим флагом.

*Поиск новой опорной точки в монокулярном режиме для определения бокового смещения на следующем цикле* осуществляется по шестнадцатикратно загрубленному изображению и уточняется по четырехкратно загрубленному изображению в соответствии с алгоритмом [2].

*Передача карты пригодности и результатов измерений расстояния и бокового смещения в БВК* завершает цикл измерений.

В циклах записи изображений производится их упаковка и запись изображения во флэш-память камеры. Упаковка исходных изображений размером 1000×1006, имеющих 10 значащих разрядов (3 пиксела упаковываются в одно 32-разрядное слово), позволяет сократить объем одного запоминаемого изображения до 1,34 Мбайт. При этом во флэш-памяти каждой камеры объемом 16 Мбайт может быть записано до 12 полных кадров, т. е. в четырех камерах — до 48 изображений. При этом циклограмма обмена по МКО остается неизменной (передаются очередной фрагмент РК, а также результаты измерений по предыдущему кадру, но с флагами, показывающими отсутствие измерений).

#### 4. Отладка ПАО

На первом этапе отработка алгоритмических и программных решений осуществлялась на персональном компьютере с использованием имеющихся изображений Фобоса, а также стереоизображений модельных шероховатых поверхностей [3]. Затем ПАО переносилось и отлаживалось на процессоре ADSP-21060 в составе камер ТСНН с использованием прямого ввода тестовых изображений и сопутствующей информации в процессорную память.

При отработке на ПК для управления реальной бортовой программой и отображения получаемых результатов использовалась управляющая программа отладки ПАО режима «Посадка», интерфейс которой показан на рис. 2. Интерфейс отображает (слева направо и сверху вниз):

- текущий «левый» кадр стереопары с указанием положения выбранных опорных точек для стереоизмерения высоты;
- текущий «правый» кадр стереопары, с указанием положения: опорных точек для стереоизмерения высоты, для которых установлено соответствие с «левым» кадром; опорной точки для определения бокового смещения, для которой установлено соответствие с предыдущим «правым» кадром; оптимальной площадки для посадки;
- карту пригодности с указанием положения оптимальной площадки для посадки;

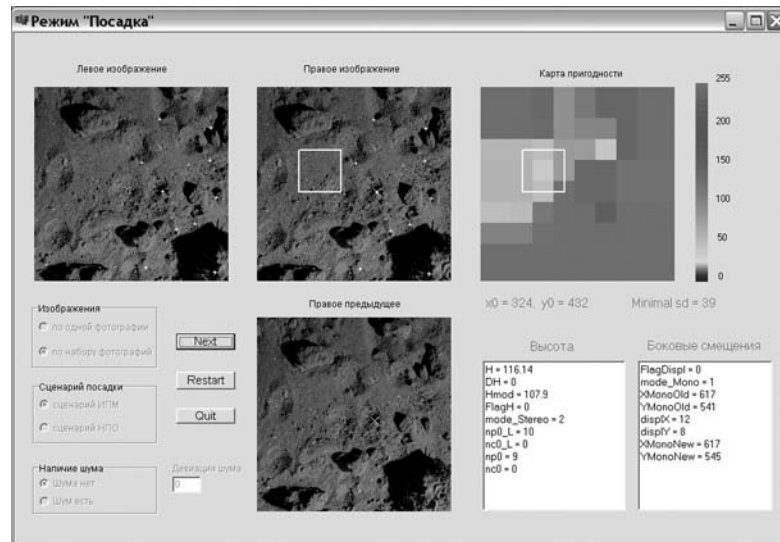


Рис. 2. Интерфейс управляющей программы отладки ПАО ТСНН в режиме «Посадка»

- управляющие элементы для выбора последовательно-модельных изображений;
- предыдущий «правый» кадр (под текущим «правым» кадром) с указанием положения выбранной опорной точки для определения бокового смещения;
- окна с результатами измерения высоты и бокового смещения.

### Заключение

Разработанное программно-алгоритмическое обеспечение обеспечивает решение задач, стоящих перед ТСНН в режиме «Посадка». ПАО ТСНН отлажено на персональном компьютере и процессоре камер ТСНН. Окончательная отработка ПАО будет проводиться на стенде ТСНН, где будет осуществляться съемка камерами ТСНН тестовых изображений с экранов имитаторов поверхности Фобоса, а также по результатам натурных съемок.

### Литература

1. Аванесов Г.А., Жуков Б.С., Краснопецева Е.Б. Задачи, решаемые телевизионной системой навигации и наблюдения в проекте «Фобос-Грунт». (Статья в настоящем сборнике, с. 239.)
2. Гришин В.А. Алгоритмы измерения высоты и компонент скорости по телевизионным изображениям при посадке на Фобос. (Статья в настоящем сборнике, с. 279.)
3. Жуков Б.С., Дунаев Б.С., Жуков С.Б. Моделирование детальных изображений поверхности Фобоса для отработки задач информационной поддержки посадки на Фобос. (Статья в настоящем сборнике, с. 304.)