

УДК 520.6

ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ
СИСТЕМОЙ НАВИГАЦИИ И НАБЛЮДЕНИЯ
В ПРОЕКТЕ «ФОБОС-ГРУНТ»

Г.А. Аванесов, Б.С. Жуков, Е.Б. Краснопевица

Институт космических исследований
Российской академии наук, Москва

Телевизионная система навигации и наблюдения (ТСНН) на КА «Фобос-Грунт», состоящая из двух узкоугольных и двух широкоугольных камер, разработана для решения как научных, так и навигационных задач миссии. Полученные изображения высокого разрешения дадут новую информацию о структуре кратеров и борозд на поверхности Фобоса, характеристиках реголита, распределении масс внутри Фобоса, а также о пылевых кольцах Марса. Навигационные съемки Фобоса позволят уточнить параметры орбит КА и Фобоса перед каждым маневром КА. Во время наиболее ответственного этапа миссии — посадки на Фобос ТСНН будет осуществлять автономный выбор места посадки и поддерживать штатные системы резервными измерениями высоты и скорости.

Television System for Navigation and Observation (TSNN) on-board the Phobos-Grunt spacecraft, which includes two narrow- and two wide-angle cameras, has been developed to solve both scientific and navigational tasks of the mission. High-resolution images to be obtained by TSNN will provide new information about the structure of craters and grooves on the surface of Phobos, regolith characteristics, density distribution inside Phobos, as well as about dust rings of Mars. Navigational imaging will be used to refine the parameters of the Phobos and s/c orbits before each s/c manoeuvre. During landing, which is the most critical stage of the mission, TSNN will perform an autonomous selection of the most suitable site for landing and provide back-up measurements of the s/c altitude and velocity.

Введение

Важная роль в проекте «Фобос-Грунт», предусматривающем посадку на Фобос и доставку на землю образцов его грунта, отводится телевизионным средствам, которые будут использоваться как для решения критически важных для успеха миссии навигационных задач, так и для научных исследований Фобоса, Марса и околомарсианского пространства. На

основе анализа этих задач в работе [1] определены требования к составу и характеристикам телевизионной системы навигации и наблюдения (ТСНН) на космическом аппарате (КА) «Фобос-Грунт». В данной статье рассматриваются основные режимы работы ТСНН и обсуждается использование получаемой видеoinформации для решения навигационных и научных задач миссии.

1. Характеристики ТСНН

В состав телевизионной системы навигации и наблюдения входят две узкоугольные телевизионные камеры (УТК) высокого разрешения с фокусным расстоянием $F = 500$ мм и две обзорные широкоугольные телевизионные камеры (ШТК) с фокусным расстоянием $F = 18$ мм [2]. Размещение двух комплектов УТК и ШТК по диаметру платформы посадочного модуля с базисом 2 м обеспечивает возможность проведения стереоизмерений при посадке на поверхность Фобоса.

Таблица 1. Характеристики ТСНН и БОКЗ-МФ

Параметры	ТСНН		БОКЗ-МФ
	УТК	ШТК	
Фокусное расстояние, мм	500	18	32
Относительное отверстие	1:7	1:2	1:1,7
Спектральные зоны, мкм	0,4...1,0	0,4...1,0	0,4...1,0
Размер элемента ПЗС, мкм	7,4	7,4	20
Кол-во активных элементов	1000×1000	1000×1000	512×512
Угловое разрешение, угл.с	3,05	84,8	129*
Поле зрения, град	0,85	23,3	18,0
Минимальный угол оптической оси к Солнцу, град	80	60	36
Радиометрическое разрешение, бит	10	10	12
Объем флэш-памяти, Мбайт	16	16	–
Масса, кг	2,8	1,6	2,0
Энергопотребление, Вт	8	8	8
Количество приборов	2	2	2

* Точность угловых измерений БОКЗ-МФ составляет $\sigma_{x,y}/\sigma_z = 5/12$ угл.с.

Для привязки измерений ТСНН к инерциальной системе координат используются звездные датчики БОКЗ-МФ. Приборы БОКЗ-МФ также дублированы и имеют непрерывно направляемые наблюдения для облегчения реализации необходимых углов их оптической оси к Солнцу и Марсу. Каждая пара камер УТК–ШТК жестко сопряжена с соответствующим прибором БОКЗ-МФ.

Все камеры имеют свои процессоры. Связь между камерами осуществляется через бортовой вычислительный комплекс (БВК).

Основные характеристики ТСНН и БОКЗ-МФ приведены в табл. 1.

2. Навигационные и научные задачи съемок ТСНН

Навигационные и научные задачи, которые будут решаться с помощью ТСНН в проекте «Фобос-Грунт», подробно проанализированы в работе [1]. Навигационные задачи включают:

- уточнение орбиты космического аппарата КА на трассе перелета и при маневрировании на орбитах искусственного спутника Марса (ИСМ);
- уточнение орбиты Фобоса;
- выбор района посадки с орбиты ИСМ;
- навигационная поддержка посадки: измерения расстояния до поверхности Фобоса и компонент относительной скорости КА – Фобос в процессе снижения, а также автономный выбор места посадки.

Полученные изображения позволят также провести комплекс научных исследований характеристик Фобоса и околомарсианского пространства:

- уточнение модели фигуры, карт рельефа и геологических карт Фобоса;
- исследования характеристик основных форм рельефа поверхности Фобоса: кратеров и борозд;
- исследования пространственных вариаций отражательных характеристик поверхности Фобоса и оценки по ним характеристик грунта Фобоса;
- уточнение массы Фобоса и положения центра масс в модели фигуры Фобоса, что позволит сделать заключение о внутренней однородности Фобоса;

- исследования пылевых колец Марса;
- исследования либраций Фобоса, что позволит оценить его моменты инерции и даст дополнительную информацию о распределении масс внутри Фобоса.

Для обеспечения решения стоящих перед ТСНН задач предусмотрены три режима наблюдений: «Съемка звезд», «Последовательная съемка» и «Посадка».

3. Режим «Съемка звезд»

В режиме «Съемка звезд» (СЗ) все камеры работают независимо. В каждой камере может быть получено до 1000 изображений с заданными параметрами (момент начала и интервал съемки, время экспозиции, коэффициент усиления и др.). На полученных изображениях выделяются и запоминаются во флэш-память камер «локализованные объекты», яркость которых значимо превышает уровень фона. При заполнении флэш-памяти объемом 16 Мбайт съемка прекращается.

Режим СЗ будет использоваться:

- для геометрической калибровки камер ТСНН;
- навигационных съемок Марса и Фобоса на фоне звезд;
- детектирования пылевых колец Марса.

Геометрическая калибровка камер ТСНН включает определение внутренних параметров камер (фокусное расстояние, положение главной точки, функция рассеяния точки, обобщенная дисторсия), а также взаимную привязку систем координат всех камер и звездных датчиков. Калибровка камер будет проводиться путем одновременной съемки звезд всеми камерами и звездными датчиками. Максимальная распознаваемая звездная величина и ожидаемое количество звезд в поле зрения УТК и ШТК при времени накопления 0,25 с приведены в табл. 2. Наилучшие условия для калибровки реализуются при ориентации камер ТСНН вблизи галактического экватора. Калибровочные сеансы предусмотрены на трассе перелета Земля–Марс, а также при необходимости могут повторяться на орбитах ИСМ.

Таблица 2. Максимальная распознаваемая звездная величина и ожидаемое количество звезд в поле зрения УТК и ШТК в калибровочных сеансах

Параметр	УТК	ШТК
Максимальная распознаваемая звездная величина	11	6
Ожидаемое количество звезд в поле зрения:		
• среднее по небесной сфере	12	45
• вариация между галактическим полюсом и экватором	5...30	25...110

Съемка Марса и Фобоса на реальном фоне звезд позволяет наиболее точно определить направление на снимаемые объекты в инерциальной системе координат для уточнения параметров орбиты КА и снимаемых объектов. Для одновременного наблюдения звезд в одном кадре вместе с Марсом или Фобосом изображения последних должны быть переэкспонированы. Технология антиблужинга ПЗС-матриц позволяет переэкспонировать изображения до 300 раз без растекания заряда.

Навигационные съемки Марса на фоне звезд предусмотрены с помощью ШТК на подлетной траектории на расстоянии 6 и 3 млн км до Марса, а навигационные съемки Фобоса — с помощью ШТК на орбите наблюдения.

Частицы пыли могут быть распознаны среди звезд как яркие объекты, не имеющие соответствия в звездном каталоге. Принимая, что максимальная плотность частиц в пылевом торе Фобоса равна $5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-3}$, типичная масса частиц — $10^{-7} \dots 10^{-6} \text{ г}$ и отражательные характеристики частиц и их плотность такие же, как у Фобоса, получим приведенные в табл. 3 значения максимального расстояния, на котором эти частицы могут быть детектированы с помощью УТК, ШТК и БОКЗ-МФ, а также среднее количество детектированных частиц на одном изображении. Как следует из этих расчетов, наиболее эффективно частицы пыли могут быть детектированы с помощью УТК. Для эксперимента по детектированию пыли особенно важно получение большого количества изображений, которое может быть обработано и записано в режиме СЗ.

Таблица 3. Условия детектирования пыли телевизионными средствами

Параметр	УТК	ШТК	БОКЗ-МФ
Максимальное расстояние до частицы, м	600...1200	12...25	29...57
Ожидаемое число частиц на одном изображении	0,2...1,8	0,002...0,01	0,006...0,05

4. Режим «Последовательная съемка»

Режим «Последовательная съемка» (ПС) также предусматривает независимую съемку камерами ТСНН, однако, в отличие от режима СЗ, полученные изображения запоминаются целиком — предусматривается лишь их упаковка без сжатия. В результате во флэш-памяти каждой камеры может быть записано до 12 полных изображений.

Режим ПС предназначен для крупномасштабных съемок Фобоса в навигационных и научных целях, а также для выбора района посадки КА на Фобос. В табл. 4 приведены разрешение и поле зрения УТК и ШТК при съемке поверхности Фобоса на орбите наблюдения и квазиспутниковых орбитах (КСО).

Поскольку при крупномасштабной съемке изображения Фобоса не могут быть получены на фоне звезд, привязка снимков к инерциальной системе координат будет производиться с помощью звездных датчиков.

Съемки с КСО позволят выполнить картирование Фобоса, а также (при использовании конвергентной съемки) сте-

Таблица 4. Пространственное разрешение и поле зрения на поверхности Фобоса, получаемое с помощью УТК и ШТК на КСО и орбите наблюдения

Параметр	Расстояние до поверхности Фобоса, км			
	КСО		Орбита наблюдения	
	30	100	500	20 000
УТК:				
• разрешение, м	0,45	1,5	7,5	300
• поле зрения, км	0,45	1,5	7,5	300
ШТК:				
• разрешение, м	12	40	200	8000
• поле зрения, км	12	40	200	8000

реореконструкцию его поверхности с субметровым разрешением, что на 1...2 порядка лучше разрешения существующих карт Фобоса. Эти данные позволят получить качественно новую информацию о формах рельефа и вариациях отражательных характеристик поверхности Фобоса.

Важнейшей задачей съемок ТСНН на КСО является уточнение района посадки. Требования к выбору района посадки определяются тем, что при относительно малых размерах посадочного аппарата и, возможно, не полной компенсации к моменту посадки боковых составляющих скорости «безопасной» считается площадка, не имеющая выпуклостей и впадин с размером более 0,5 м. В настоящее время район посадки предварительно выбран на основе имеющихся снимков Фобоса с разрешением до 4 м. Для уточнения района посадки необходима стереосъемка поверхности Фобоса с КСО с расстояния 30...50 км с разрешением не хуже 0,5 м. Для этого программа наблюдений ТСНН с КСО предусматривает:

- конвергентную съемку района посадки под различными углами для обеспечения оптимальной стереореконструкции поверхности Фобоса;
- перекрытие изображений ~60 % для взаимной привязки соседних снимков;
- сочетание съемок УТК, обеспечивающих высокое пространственное разрешение, и ШТК, позволяющих привязать узкоугольные снимки УТК к модели фигуры Фобоса.

Однако учитывая, что эллипс рассеяния при посадке равен 800×400 м (соответственно по долготе и широте) и что ожидаемое среднее расстояние между кратерами, которые могут представлять опасность для посадки, составляет ~40 м, нельзя ожидать, что в пределах выбранного района посадки (размеры которого должны соответствовать эллипсу рассеяния) будут отсутствовать опасные неровности. Можно лишь надеяться по полученным с орбиты снимкам выбрать для посадки район с минимальным количеством таких неровностей, а задачу выбора конкретного места посадки решать автономно при спуске на поверхность Фобоса.

5. Режим «Посадка»

В режиме «Посадка», который будет использоваться при спуске КА на поверхность Фобоса, предусматривается синхронная съемка Фобоса всеми четырьмя камерами ТСНН для решения следующих задач:

- запись полных изображений во флэш-память камер для передачи на Землю после посадки;
- формирование сжатых кадров репортажной съемки, которые будут передаваться на Землю в реальном времени в процессе посадки;
- построение карты пригодности поверхности для посадки, которая будет использоваться для автоматического выбора места посадки;
- измерения расстояния до поверхности Фобоса;
- измерения смещения опорного объекта на последовательных изображениях, которые с учетом изменения масштаба изображения и ориентации КА позволят оценить боковую скорость КА.

Выполняемые с помощью ТСНН измерения высоты и скорости КА используются для резервирования аналогичных измерений, выполняемых штатными средствами — лазерным высотомером и доплеровским измерителем скорости и дальности.

Хотя измерения ТСНН планируется осуществлять непрерывно начиная с момента схода с орбиты, наиболее важными они являются:

- на участке спуска от 4 км до 800 м, где уточняется момент начала торможения;
- при приближении к поверхности на высотах 300...50 м для контроля высоты, скорости соприкосновения с поверхностью и автономного выбора места посадки (50 м — минимальная высота, на которой может быть принято решение о выполнении дополнительного маневра КА).

Разрешение и поле зрения камер ТСНН при посадке приведены в табл. 5 (с учетом эффекта дефокусировки). Смазом изображений из-за бокового смещения КА относительно поверхности Фобоса можно пренебречь. Для УТК ухудшение разрешения из-за дефокусировки в 2 раза про-

Таблица 5. Изменение разрешения и поля зрения камер ТСНН в процессе посадки

Расстояние до поверхности Фобоса	ШТК ($f = 18$ мм)			УТК ($f = 500$ мм)		
	Разрешение		Поле зрения	Разрешение		Поле зрения
	исходное изображение	репортажный кадр		исходное изображение	репортажный кадр	
30 км	12 м	48 м	12 км	52 см	180 см	450 м
10 км	4,1 м	16 м	4,1 км	22 см	67 см	150 м
3 км	1,2 м	4,8 м	1,2 км	12 см	25 см	45 м
1 км	42 см	1,6 м	410 м	8,6 см	13 см	15 м
300 м	13 см	49 см	120 м	7,6 см	8,8 см	4,5 м
100 м	5,0 см	17 см	41 м	7,3 см	7,6 см	1,5 м
30 м	2,1 см	5,8 см	12 м	—	—	—
10 м	1,3 см	2,6 см	4,1 м	—	—	—
3 м	1,0 см	1,5 см	1,2 м	—	—	—
1 м	0,9 см	1,1 см	41 см	—	—	—

исходит на высоте 5 км, а на высотах ниже 1 км разрешение УТК остается практически постоянным. Для ШТК ухудшение разрешения из-за дефокусировки более чем в 2 раза происходит на высотах ниже 20 м, а предельное разрешение составляет ~1 см.

Снимки с сантиметровым разрешением позволяют получить ценную научную информацию о детальной структуре кратеров и борозд и о свойствах реголита на поверхности Фобоса. Всего во флэш-память каждой камеры будет записано по 12 полных изображений.

Цикл съемки и обработки информации в режиме «Посадка» составляет 6 с [3]. Чтобы избежать увеличения времени цикла из-за записи во флэш-память полных изображений, циклы измерений и записи изображений разделены между собой. 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. В случае приведенного выше определения критических участков для измерений запись изображений УТК во флэш-память можно производить 1 раз на

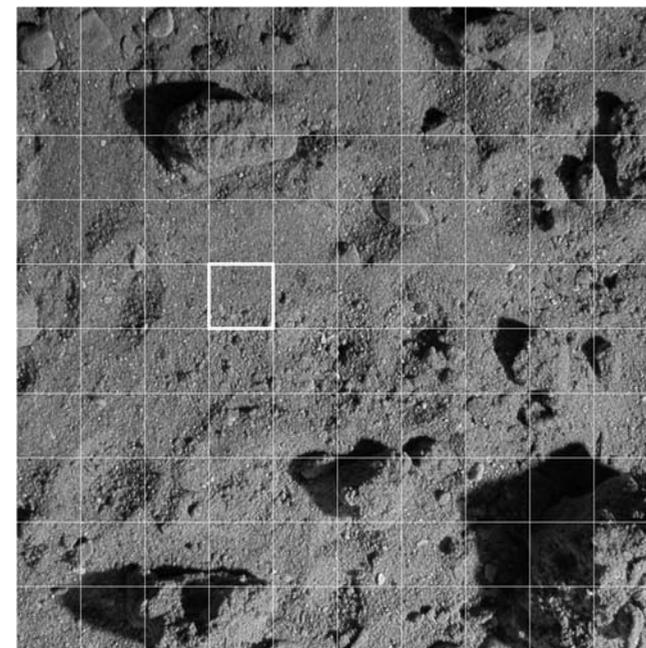
30 циклов измерений — начиная с момента схода КА с орбиты и до высоты 4 км. Для ШТК запись изображений можно начать на высотах ниже 40 м после прекращения измерений и проводить запись на каждом цикле.

Сжатый кадр репортажной съемки будет передаваться из каждой камеры в БВК за 20 циклов. Всего каждой камерой за время спуска будет получено до 20 репортажных кадров. На малых высотах из-за эффекта дефокусировки разрешение репортажного кадра будет приближаться к разрешению исходного изображения (см. табл. 5).

После окончания торможения КА на высоте 300...200 м, когда разрешение ШТК достигнет 13...9 см, по снимкам ШТК должен производиться автономный выбор места посадки. С этой целью по данным ШТК будет строиться и передаваться в БВК карта пригодности поверхности для посадки, по которой можно определить пригодность прогнозируемого места посадки, а в случае его непригодности — выбрать наиболее ровный участок размером ~10 м, на который может быть проведена посадка КА. Карта пригодности строится по признаку фотометрической однородности изображения с учетом наличия теней и близости крупных неоднородностей. Рисунок иллюстрирует выбор оптимального места посадки по изображению шероховатой поверхности, моделирующей поверхность Фобоса.

Расстояние до поверхности Фобоса будет определяться по изображениям, полученным камерами УТК и ШТК на стереобазе 2 м. С момента схода с орбиты до высоты 300 м для этой цели должны использоваться камеры УТК, а на более низких высотах, где перекрытие их полей зрения становится меньше 50 %, — камеры ШТК. Ошибки измерений высоты камерами ТСНН, оцененные с учетом разрешения камер и ошибок их геометрической калибровки, приведены в табл. 6. Относительные ошибки убывают с уменьшением высоты: от 6 до 4 % по данным УТК на участке перед началом торможения (высота от 4 до 0,8 км) и от 5 до 1 % по данным ШТК при приближении к поверхности (высота от 200 до 50 м).

Информацию для оценки горизонтальных компонент скорости КА дадут измерения смещения опорной точки на



Выбор оптимального места посадки по модельному изображению

последовательных изображениях, полученных одной из камер ШТК (измерения УТК для этой цели не применимы, так как за время цикла 6 с опорные точки могут выходить из поля зрения УТК уже на высотах менее нескольких километров). Данные этих измерений будут обрабатываться в БВК с учетом изменения ориентации КА и высоты съемки. Поскольку смещения объектов очень чувствительны к горизонтальной скорости, для экономии времени вычислений эти смещения будут определяться по четырехкратно заглубленному изображению ШТК ([3]. Даже в этом случае обеспечивается достаточная точность измерения горизонтальной скорости (см. табл. 6).

С накоплением результатов измерений ТСНН в БВК ошибки траекторных измерений будут существенно ниже, чем рассмотренные ошибки единичных измерений ТСНН.

Таблица 6. Ошибки измерения высоты и горизонтальной скорости по данным ТСНН

Расстояние до поверхности Фобоса	Ошибка измерения расстояния, м		Ошибка оценки горизонтальной скорости (ШТК), м/с
	УТК	ШТК	
30 км	—	—	—
10 км	1100	—	—
3 км	170	1900	0,82
1 км	43	210	0,28
300 м	11	20	0,084
200 м	—	9,1	0,056
100 м	—	2,5	0,029
30 м	—	0,32	0,0097
10 м	—	0,066	0,0042

Заключение

Проработка основных режимов работы телевизионной системы навигации и наблюдения подтвердила возможность решения стоящих перед ТСНН навигационных и научных задач в проекте «Фобос-Грунт».

Литература

1. Аванесов Г.А., Жуков Б.С., Краснопецева Е.Б., Железнов М.М. Анализ задач и условий телевизионных наблюдений Фобоса и Марса с КА «Фобос-Грунт»: Препринт. Пр-2128. М.: ИКИ РАН, 2006.
2. Аванесов Г.А., Жуков Б.С., Краснопецева Е.Б. Телевизионные средства навигации и наблюдения проекта «Фобос-Грунт» // Космич. приборостроение. Координатно-временные системы с использованием космич. технологий. Приборы для космич. исслед. Земли и планет: Сб. тр. по результатам выездного семинара / Под ред. Р.Р. Назирова. Россия, Таруса, 7–9 июня 2006. М.: ИКИ РАН, 2007. С. 226–231.
3. Жуков Б.С., Жуков С.Б., Гришин В.А., Гордеев Р.В. Бортовое программно-алгоритмическое обеспечение информационной поддержки посадки на Фобос. (Статья в настоящем сборнике, с. 294.)

ФОРМИРОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ СТЕРЕОИЗОБРАЖЕНИЙ ФОБОСА И ИХ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА В ЗАДАЧАХ ПРИПЛАНЕТНОЙ НАВИГАЦИИ

Т.В. Кондратьева, А.В. Никитин

Институт космических исследований
Российской академии наук, Москва

Рассмотрены вопросы визуализации и построения цифровой модели поверхности (рельефа) Фобоса (ЦМР). Приведены особенности построения модельных снимков. Предложен алгоритм обработки стереопары, сформированной для широкоугольной камеры ТСНН, с целью восстановления ЦМР по результатам съемки поверхности Фобоса. Проверка работоспособности алгоритма проведена на модельных изображениях, при этом точность решения задачи составила 9 м по высоте и в плане.

Предложены рекомендации для конвергентной съемки поверхности Фобоса узкоугольной камерой с целью получения точности определения координат в плане и по высоте на уровне 0,5 м с квазисинхронной орбиты.

Problems of the Phobos digital terrain model (DTM) creation and visualization are considered. Features of the image modeling are listed. An algorithm for processing a stereo pair formed for the wide-angle camera of the TV System for Navigation and Observation in order to restore DTM based on the Phobos surface imaging data is proposed. The algorithm operation ability was tested on model images. The task solution accuracy was 9 m for height and plan.

Recommendations for the Phobos surface convergent imaging from the quasi-synchronous orbit by the narrow-angle camera to achieve coordinates determination accuracy of about 0.5 m for the height and plan are given.

Введение

Эффективность отработки задач припланетной навигации на этапах облета Фобоса на квазиспутниковой орбите может быть значительно повышена при использовании трехмерной модели Фобоса. Такая модель была создана в рамках проекта «Фобос-Грунт».

Трехмерная модель Фобоса была использована для построения модельных изображений Фобоса при исследовании