Развитие аппаратуры ДЗЗ серии МСУ-МР в части повышения точности радиометрических измерений и расширения ее функциональных возможностей

К. В. Бадаев, *badaev_kv@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Ю. М. Гектин, *к. т. н., доцент, tsu-optics@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Ю. Ю. Гулин, *к. т. н., gulin_yu@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. А. Зайцев, *zaytsev_aa@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

В. Н. Максин, *maksin.vn@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Н. П. Пузаков, *puzakov.np@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

В. Н. Сахаров, *sakharov_vn@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Д. С. Серебряков, *к. т. н., serebryakov_ds@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

М. Б. Смелянский, *tsu-optics@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. Г. Фролов, *к. т. н., frolov_ag@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Работа посвящена описанию технической эволюции аппаратуры МСУ-МР, устанавливаемой на космические аппараты серии «Метеор-ЗМ». После запуска каждого следующего космического аппарата серии у коллектива разработчиков появляются новые идеи по модернизации аппаратуры МСУ-МР в целях повышения ее метрологических характеристик. В этой работе подробно описаны как уже апробированные в ходе летных испытаний улучшения аппаратуры МСУ-МР (расширение диапазона измеряемых температур, дистанционная регулировка параметров электронных трактов формирования сигнала и температур имитаторов абсолютно черного тела, усовершенствование методики фокусировки в наземных условиях), так и те, летная апробация которых еще предстоит (дистанционная фокусировка, увеличение холодопроизводительности радиатора имитатора абсолютно черного тела, а также ряд других).

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, спутниковая аппаратура, модернизация аппаратуры, инфракрасный диапазон спектра, радиометрическая точность измерений

Evolution of ERS Equipment of the MSU-MR Series as Related to Increasing the Accuracy of Radiometric Measurements and Expanding Performance Capabilities

K. V. Badayev, *badaev_kv@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Yu. M. Gektin, *Cand. Sci. (Engineering), associate professor, msu-optics@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Yu. Yu. Gulin, *Cand. Sci. (Engineering), gulin_yy@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. A. Zaytsev, *zaytsev_aa@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

V. N. Maksin, *maksin.vn@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

N. P. Puzakov, *puzakov.np@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

V. N. Sakharov, *sakharov_vn@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

D. S. Serebryakov, *Cand. Sci. (Engineering), serebryakov_ds@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

M. B. Smelyanskiy, *msu-optics@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. G. Frolov, *Cand. Sci. (Engineering), frolov_ag@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. This work is devoted to the description of the technical evolution of the MSU-MR equipment installed on Meteor-3M series spacecraft. After the launch of each successive spacecraft of the series, the development team generates new ideas concerning the modernization of the MSU-MR equipment in order to improve its metrological characteristics. This work describes in detail both the improvements of the MSU-MR equipment already tested during flight tests (expansion of the temperature measurement range, remote adjustment of the parameters of electronic signal generation paths and of the temperatures of black body simulators, refinement of the method of laboratory focusing) and of the equipment yet to be subject to flight tests (remote focusing, increasing the cooling capacity of the radiator of the black body simulator, as well as a number of others).

Keywords: Earth remote sensing, satellite equipment, equipment modernization, infrared spectrum, radiometric accuracy of measurements

Введение

5 июля 2019 года в рамках формирования российской группировки спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [1] на круговую солнечно-синхронную орбиту был успешно запущен космический аппарат (КА) «Метеор-М» № 2-2 производства АО «Корпорация ВНИИЭМ». В числе целевой аппаратуры на борту КА находится многозональное сканирующее устройство малого разрешения МСУ-МР производства АО «Российские космические системы» (далее МСУ-МР 2-2).

Аппаратура серии МСУ-МР предназначена для решения таких гидрометеорологических задач, как определение температуры суши и акваторий, картирование облачности, определение ее высоты и водозапаса и т. д. К настоящему моменту аппаратура МСУ-МР 2-2 успешно прошла летные испытания и принята в штатную эксплуатацию. Основные характеристики аппаратуры МСУ-МР 2-2, подтвержденные в процессе летных испытаний, представлены в таблице. Сейчас к запуску готовится аппаратура МСУ-МР для КА «Метеор-М» № 2-3 (далее МСУ-МР 2-3).

Для аппаратуры серии МСУ-МР это уже четвертый по счету запуск — предыдущие КА серии были запущены в 2009, 2014 и 2017 годах (запуск КА «Метеор-М» № 2-1 в 2017 году закончился неудачей). Устройство и общие принципы функционирования аппаратуры серии МСУ-МР подробно описаны в работе [2], достигаемые точности в определении температур акваторий приведены в работе [3]. Здесь будут описаны доработки, реализованные в аппаратуре МСУ-МР 2-2 и 2-3, а также планируемые усовершенствования последующих приборов этой серии.

Модернизация аппаратуры МСУ-МР для КА «Метеор-М» № 2-2.

Оптимизация границ диапазона измеряемых температур в каналах № 4–6

Важнейшей особенностью, впервые реализованной в аппаратуре МСУ-МР 2-2, стало расширение

Таблица. Основные характеристики аппаратуры МСУ-МР КА «Метеор-М» № 2-2

Наименование параметра	Значение параметра
Средняя высота орбиты, км	832
Полоса обзора в направлении, перпендикулярном направлению полета КА, км	2900
Линейное разрешение на поверхности в подспутниковой точке, км	1,0
Количество каналов	6
Границы спектральных диапазонов в каналах № 1–6, мкм	0,5–0,7 0,7–1,1 1,6–1,8 3,5–4,1 10,5–11,5 11,5–12,5
Диапазон измеряемых эффективных яркостей в каналах № 1–3, Вт/(м ² · ср): • 0,5–0,7 мкм • 0,7–1,1 мкм • 1,6–1,8 мкм	0–85 0–71 0–10
Отношение сигнал/шум в каналах № 1–3: • 0,5–0,7 мкм • 0,7–1,1 мкм • 1,6–1,8 мкм	1000 800 600
Диапазон измеряемых радиационных температур в каналах № 4–6, К: • 3,5–4,1 мкм • 10,5–11,5 мкм • 11,5–12,5 мкм	220–380 190–320 190–320
Эквивалентная шуму разность температур на уровне 300 К в каналах № 4–6, К: • 3,5–4,1 мкм • 10,5–11,5 мкм • 11,5–12,5 мкм	0,06 0,06 0,07
Разрядность выходного сигнала, бит	10

диапазона измеряемых температур в каналах № 4–6. В предыдущих приборах МСУ-МР он составлял 220–320 К во всех трех каналах.

Спектральные диапазоны 10,5–11,5 и 11,5–12,5 мкм предназначены для определения температуры подстилающей поверхности — суши, водной поверхности, льда, облачности и пр. При этом существует ряд объектов, имеющих температуру ниже 220 К (в основном это высокая облачность и полярные шапки). Соответственно их температуру было

Рис. 1. Фрагмент изображения Южного полюса, полученного в канале № 5 аппаратуры МСУ-МР КА «Метеор-М» № 2-2 23.07.2020

невозможно определить по данным аппаратуры МСУ-МР КА «Метеор-М» № 1 и 2 [4]. При создании аппаратуры МСУ-МР 2-2 нижняя граница диапазона измеряемых температур в каналах № 5 и 6 была понижена до 190 К за счет изменения коэффициентов аналогового усиления сигнала без существенных потерь радиометрического разрешения (рис. 1). Значения сигналов всех зарегистрированных температур переданы без ограничений. Изображение приведено в стереографической проекции, наложена координатная сетка.

Спектральный диапазон 3,5–4,1 мкм оптимально подходит для обнаружения и регистрации очагов пожаров. Поэтому в канале № 4 верхняя граница диапазона измеряемых температур была существенно повышена — до 380 К — для возможности регистрации сигнала от высокотемпературных объектов. Однако, поскольку разрядность выходного сигнала осталась прежней и составляет всего 10 бит, а наряду с расширением температурного диапазона необходимо сохранить высокое радиометрическое разрешение в диапазоне 220–320 К, то в этом канале был реализован нелинейный аппаратно-программный алгоритм формирования выходного сигнала.

В каналах № 4–6 аппаратуры серии МСУ-МР используются линейные фотоприемные устройства

(далее ФПУ) с четырьмя фоточувствительными площадками (ЧП) в каждом, ориентированными вдоль направления сканирования [5]. Ранее в каждом из этих каналов использовались идентичные электронные формирователи сигнала, а выходной цифровой сигнал представлял собой просуммированный с необходимыми временными задержками и осредненный сигнал от всех четырех ЧП (цифровой режим временной задержки и накопления). В канале № 4 аппаратуры МСУ-МР 2-2 таким образом формируется усредненный сигнал от первых трех ЧП. Коэффициент аналогового усиления для них соответствует температурному диапазону 220–230 К. Коэффициент усиления сигнала от четвертой ЧП устанавливается существенно более низким, так что верхний уровень температурного диапазона достигает для нее значения 380 К [6]. Конкретные значения коэффициентов аналогового усиления подбираются при наземной настройке.

Теперь операция формирования выходного сигнала в канале № 4 выполняется по следующему алгоритму:

$$U_{\text{вых}} = \begin{cases} \alpha \bar{U}_{\text{ЧП } \# 1-3} + \beta U_{\text{ЧП } \# 4}, & \text{когда } \bar{U}_{\text{ЧП } \# 1,2,3} < U_0, \\ \alpha U_0 + \beta U_{\text{ЧП } \# 4}, & \text{когда } \bar{U}_{\text{ЧП } \# 1,2,3} \geq U_0, \end{cases}$$

Рис. 2. Фрагмент изображения западного побережья Африки, полученного в канале № 4 аппаратуры МСУ-МР КА «Метеор-М» № 2-2 23.07.2020

Рис. 3. Функциональная схема аналоговых трактов аппаратуры МСУ-МР 2-2

где $U_{\text{вых}}$ — выходной сигнал в канале № 4;

$\bar{U}_{\text{ЧП № 1,2,3}}$ — осредненный сигнал от ЧП № 1–3 ФПУ канала № 4 (получаемый с обычным коэффициентом усиления);

$U_{\text{ЧП № 4}}$ — сигнал от ЧП № 4 ФПУ канала № 4 (получаемый с пониженным коэффициентом усиления);

U_0 — уровень цифрового ограничения сигнала $\bar{U}_{\text{ЧП № 1,2,3}}$;

α и β — постоянные масштабные коэффициенты, используемые при цифровой обработке.

На рис. 2 представлен фрагмент изображения в канале № 4. На изображении хорошо видны очаги пожаров.

Дистанционное регулирование параметров электронных трактов формирования сигнала и температур имитаторов абсолютно черного тела

Опыт эксплуатации аппаратуры МСУ-МР, начиная с ее первого запуска, показал необходимость регулирования в процессе летной эксплуатации коэффициентов передачи усилительных трактов во всех каналах и температур «холодного» и «горячего» имитаторов абсолютно черного тела

(далее ИАЧТ-Х и ИАЧТ-Г соответственно). Возможность такой регулировки по командам с Земли была реализована при создании аппаратуры МСУ-МР 2-2.

Для поддержания динамического диапазона сигнала в заданных пределах в каналах № 1–3 аппаратуры серии МСУ-МР реализована автоматическая подстройка значения сигнала нулевой яркости на заданный уровень «черного» путем изменения величины постоянной составляющей сигнала в аналоговом тракте. В каналах № 4–6 подобным образом выполняется подстройка на заданный уровень «холодного» сигнала от ИАЧТ-Х. В аппаратуре МСУ-МР 2-2 реализована возможность изменения значения заданных уровней подстройки сигнала во всем диапазоне шкалы выходного сигнала, а также значения коэффициентов усиления в диапазоне от $K \times 0$ до $K \times 3$ (K — коэффициент усиления предварительного усилителя) с 10-битной точностью. Функциональная схема модифицированных аналоговых трактов аппаратуры МСУ-МР 2-2 представлена на рис. 3.

Назначение блоков, представленных на рис. 3:

- B_1 — приемник излучения;
- ПУ-РХ — предварительный усилитель, состоящий из усилителя U_1 с фиксированным коэффициентом усиления K и усилителя-сумматора U_2 , где происходит коррекция уровня «черного» («холодного»);

- БОС — блок обработки сигнала, состоящий из
 - усилителя U_3 с переменным коэффициентом усиления, выполненного на аналоговом перемножителе, управляемого напряжением от цифроаналогового преобразователя (ЦАП) U_6 по коду, переданному с Земли;
 - интегратора U_4 , электронного ключа S_1 и ЦАП U_5 , формирующих сигнал рассогласования между измеренным уровнем «черного» («холодного») в видеосигнале и заданным по коду с Земли, который поступает в усилитель-сумматор U_2 в качестве управляющего сигнала.

Для обеспечения требуемой радиометрической точности в процессе работы аппаратуры ДЗЗ оптического и ИК-диапазонов необходимо выполнение калибровки. В первую очередь это касается калибровки по бортовым источникам излучения. В инфракрасном диапазоне спектра такими источниками являются имитаторы абсолютного черного тела (ИАЧТ). В аппаратуре серии МСУ-МР для калибровки каналов №4–6 используются ИАЧТ с температурами, достаточно близкими к нижнему (ИАЧТ-Х) и верхнему (ИАЧТ-Г) уровням температурного диапазона.

Блок ИАЧТ-Х (ИАЧТ-Г) представляет собой единую конструкцию с тремя сегментами — по одному на каждый из каналов №4–6. В них используются нагреватели, которые поддерживают температуру излучающей поверхности на определенном уровне, нагревая ее от начального значения до заданного. Начальная температура ИАЧТ-Г соответствует установившемуся значению температуры корпуса прибора — около 15°C . Начальная температура ИАЧТ-Х составляет от -20 до -15°C и обеспечивается отводом тепла от блока посредством тепловой трубы к пассивному внешнему радиатору, который излучает эту энергию в космос.

Блок ИАЧТ включает в себя нагревательные элементы R_T , запитанные от бортовой сети (БС), датчики температуры, используемые в обратной связи системы терморегулирования T_{oc}^0 , телеметрические датчики температуры T_{tm}^0 , аналоговую систему терморегулирования. Все эти элементы смонтированы на основании, изготовленном из алюминиевого сплава. Обращенная внутрь приборной по-

лости поверхность основания является излучающей и имеет специальное покрытие с высоким коэффициентом черноты. В предыдущих приборах серии МСУ-МР установка заданных значений температуры осуществлялась при наземной регулировке блока ИАЧТ без возможности ее изменения в процессе летной эксплуатации — 40°C для ИАЧТ-Г и -13°C для ИАЧТ-Х. Однако по совокупности внешних и внутренних факторов после вывода КА на орбиту возможны изменения теплового режима МСУ-МР, что приводит к необходимости коррекции температур ИАЧТ. В особенности это касается ИАЧТ-Х, поскольку возможность адекватного регулирования его температуры напрямую зависит от холодопроизводительности радиатора в условиях переменной засветки от Земли и теплопроводности тепловой трубы.

С целью коррекции температуры ИАЧТ в полете в аппаратуре МСУ-МР 2-2 в систему терморегулирования был введен элемент управления заданным значением температуры излучающей поверхности $T_{уст}$ (рис. 4). Управляющим элементом выступает ЦАП отечественного производства, который задает напряжение установки системы термо-

Рис. 4. Функциональная схема блока ИАЧТ аппаратуры МСУ-МР 2-2

регулирования, позволяя стабилизировать температуру излучающей поверхности на заданном уровне в диапазоне от 30 до 60 °С для ИАЧТ-Г и от минимальной температуры –20 °С до 0 °С для ИАЧТ-Х. Управление ЦАП осуществляется путем подачи специальных команд через командную линию КА [7].

В процессе летных испытаний были успешно подтверждены работоспособность и надежность командного управления температурой ИАЧТ-Х. Однако блок управления и обработки сигнала аппаратуры МСУ-МР 2-2 позволяет хранить обновленные настройки только в энергозависимой памяти, то есть после перезагрузки прибора все настройки возвращаются к исходным значениям. В готовящейся к запуску аппаратуре МСУ-МР 2-3 этот недостаток устранен.

Усовершенствованная методика фокусировки каналов № 4–6 аппаратуры МСУ-МР в наземных условиях

Фотоприемные устройства инфракрасного диапазона (ФПУ ИК), примененные в каналах № 4–6 аппаратуры МСУ-МР, требуют для своего функционирования охлаждения до уровня азотных температур — 76–80 К. Поскольку срок активного существования МСУ-МР составляет не менее 5 лет в режиме непрерывной работы, то для охлаждения ФПУ ИК была использована пассивная система радиационного охлаждения (РХ), имеющая практически неограниченный ресурс наработки на отказ. РХ представляет собой сложную конструкцию с несколькими слоями зеркальных экранов и двумя излучающими поверхностями — радиаторами 1-й и 2-й ступеней. На 2-й ступени РХ, где установлены ФПУ ИК, достигается минимальная температура за счет многослойного экранирования лучистых теплопритоков и минимизации кондуктивных теплопритоков, для чего 2-я ступень РХ механически подвешена на тонких нитях-растяжках.

В условиях наземных настроек и испытаний 2-я ступень РХ охлаждается контактно посредством теплообменника, по которому циркулирует

жидкий азот. Охлаждение 2-й ступени РХ при нормальном атмосферном давлении привело бы к незамедлительному образованию льда на входных окнах ФПУ ИК. Для предотвращения обмерзания входных окон ФПУ ИК внутренний объем РХ герметизируется и вакуумируется с помощью специального технологического оборудования (далее ВК РХ). При этом внешнее атмосферное давление вызывает деформацию корпуса (основания) РХ, вследствие чего изменяется пространственное положение 2-й ступени и, соответственно, ФПУ ИК относительно фокальных плоскостей объективов.

Поскольку РХ первого МСУ-МР был сравнительно малых габаритов (из-за чего температура ФПУ не достигла заданного значения), то означенные деформации для него были невелики и серьезных проблем с фокусировкой каналов № 4–6 не возникло. Однако в результате существенного увеличения площади РХ для МСУ-МР КА «Метеор-М» № 2 этот эффект оказался заметным. Это стало окончательно понятно в процессе летных испытаний прибора на борту КА «Метеор-М» № 2 — для некоторых каналов изображение оказалось сильно расфокусированным.

На основе теоретического анализа и экспериментальных исследований была разработана и внедрена методика фокусировки каналов № 4–6 в камере пониженного давления.

Суть методики заключается в том, что прибор с установленной ВК РХ помещается в камеру пониженного давления (при нормальном давлении). После достижения рабочей температуры ФПУ ИК воздух из камеры откачивается до давления порядка 20 мм рт.ст. При этом за счет интенсивного кипения жидкого азота в ванне ВК РХ происходит быстрое охлаждение всего объема ванны до температуры его замерзания и кипение прекращается. В этом состоянии выполняется измерение коэффициента передачи модуляции (КПМ) в каналах № 4–6 с помощью оборудования, размещенного внутри вакуумной камеры и включающего в себя зеркальный коллиматор, штриховую миру с дистанционно управляемым устройством перемещения и контроля ее положения и ИАЧТ — осветитель миры (рис. 5). По результатам анализа серии изображений при различных положениях миры относительно фокальной плоскости коллиматора

Рис. 5. Схема усовершенствованной лабораторной фокусировки каналов №4-6 аппаратуры МСУ-МР: 1 — камера пониженного давления; 2 — аппаратура МСУ-МР; 3 — фокальная плоскость объективов каналов №4-6; 4 — РХ МСУ-МР; 5 — коллиматор; 6 — штриховая мира; 7 — ИАЧТ

для каждого канала определяется величина поправки, которую необходимо внести в осевое положение объектива канала.

Летные испытания МСУ-МР 2-2 подтвердили целесообразность проведения фокусировки по разработанной методике. Тем не менее достичь предельных значений КПМ, имевших место в наземных условиях, не удалось. Поэтому было принято решение о разработке и введении в состав аппаратуры МСУ-МР, начиная с МСУ-МР 2-3, прецизионной фокусировки каналов №4-6 на борту КА.

Модернизация аппаратуры МСУ-МР для КА «Метеор-М» №2-3. Дистанционная фокусировка каналов №4-6

Важнейшей особенностью, впервые реализованной в аппаратуре МСУ-МР 2-3, стала доработка блока объективов каналов №4-6. В его состав были введены специально разработанные механизмы на шаговых двигателях, позволяющие проводить прецизионную фокусировку объективов в процессе штатной эксплуатации по командам с Земли независимо для каждого из каналов (рис. 6). Перемещение объективов производится вдоль оптической оси с шагом 0,01 мм в диапазоне $\pm 2,8$ мм,

Рис. 6. 3D-модель блока объективов каналов №4-6 с системой фокусировки

чего полностью достаточно для компенсации деформации РХ.

Функциональная схема блока фокусировки представлена на рис. 7. Фокусировка каждого объектива (О) обеспечивается с помощью шаговых двигателей (ШД) путем вращения резьбового, образующего винтовую пару с гайкой, закрепленной на оправе объектива, штока (Ш). С целью получения минимального шага перемещения объектива задействованы два редуктора: встроенный в шаговый двигатель и дополнительный, являющийся частью конструкции. При достижении крайнего положения замыкается механический контакт концевого

Рис. 7. Функциональная схема блока фокусировки каналов №4-6

датчика (К), останавливая перемещение. Управление шаговыми двигателями осуществляется индивидуально командами управления — КУ посредством блока сопряжения, запитываемого от бортовой сети — БСКА. В режиме фокусировки последовательно осуществляются выбор двигателя, подача на него питания, установка счетчика шагов и выдача команды на движение на заданное количество шагов в выбранном направлении. При этом положение двигателя телеметрируется и передается в служебной части информационной строки. Положение объектива, обеспечивающее наилучшую фокусировку, определяется путем анализа качества изображения подстилающей поверхности.

Доработка радиатора ИАЧТ-Х

В ходе летных испытаний аппаратуры МСУ-МР 2-2 была выявлена недостаточная холодопроизводительность радиатора ИАЧТ-Х, в результате чего имеет место витковый и суточный ход температуры ИАЧТ, превышающий заданные пределы. По результатам летных испытаний аппаратуры было принято решение о модернизации радиатора ИАЧТ-Х. В аппаратуре МСУ-МР 2-3 площадь радиатора (а значит, и его холодопроизводительность) увеличена на 16,5%. С целью снижения тепловой нагрузки усилена тепловая развязка радиатора с корпусом прибора, РХ и матами экранно-вакуумной теплоизоляции. Увеличена площадь контакта между радиатором и тепловой трубой. Кроме того, на радиаторе установлены три термодатчика для телеметрического контроля его температуры.

Сохранение настроек ЦАП

В аппаратуре МСУ-МР 2-3 доработана электроника блока управления и обработки сигналов — в него добавлено электрически стираемое перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство. Это позволило реализовать функцию сохранения передаваемых с Земли кодов управления с целью оптимизации параметров электронных трактов формирования сигнала и температур ИАЧТ.

Переход от подстройки уровня «холодного» к подстройке уровня «горячего»

Автоматическая подстройка уровня аналогового сигнала на заданное значение позволяет нивелировать изменения постоянной составляющей сигнала. Теоретически, ввиду возможности изменения коэффициента преобразования канала (в частности, в силу приращения чувствительности ФПУ из-за постепенного снижения концентрации водяных паров в газовом облаке вокруг КА, что имеет место в каналах № 4–6), такую подстройку правильно было бы выполнять для средней точки диапазона аналого-цифрового преобразования, чтобы приращение чувствительности приводило к минимальным рискам выхода сигнала за границы диапазона АЦП. Этому условию достаточно хорошо удовлетворяет сигнал от ИАЧТ-Х, поскольку его температура находится вблизи середины основного диапазона измеряемых температур 220–320 К. Однако, поскольку стабильность ИАЧТ-Х зависит от изменения температуры его радиатора, то более качественную автоподстройку уровня сигнала обеспечивает использование в качестве опорного сигнала от ИАЧТ-Г.

В предыдущих приборах серии МСУ-МР не было возможности сохранять вносимые по командам с Земли изменения параметров электронных трактов формирования сигнала и температур ИАЧТ, поэтому производилась автоподстройка по сигналу от ИАЧТ-Х. В аппаратуре МСУ-МР 2-3 уже реализована автоподстройка по сигналу от ИАЧТ-Г. Это позволит добиться большей стабильности постоянной составляющей сигнала. А в случае сильного изменения коэффициента чувствительности ФПУ возможность перепрограммирования ЦАП и сохранения настройки позволит нивелировать этот эффект.

Изменение типа калибровочных ламп системы калибровки каналов № 1–3 и режима их работы

Начиная с аппаратуры МСУ-МР 2-3 в системе бортовой калибровки и каналов № 1–3 будут

использоваться лампы нового типа, прошедшие соответствующую сертификацию. Также изменен режим их работы.

Опыт более чем пятилетнего функционирования аппаратуры МСУ-МР на КА «Метеор-М» № 1 и 2 показал, что деградация калибровочных ламп, вызванная их непрерывным горением, существенно превышает изменение коэффициентов преобразования каналов № 1–3. В аппаратуре МСУ-МР 2-3 калибровочные лампы должны будут работать в следующем режиме: время непрерывного горения — 1 час, период включения — 1 неделя. Такой режим работы позволит существенно сэкономить их ресурс, а значит, повысить точность калибровки каналов № 1–3 на длительном интервале. Отсутствие калибровки в течение того времени, когда лампы выключены, не скажется на точности калибровки, поскольку высокочастотные помехи в этих каналах отсутствуют, а на коррекцию долговременного тренда коэффициента преобразования канала это не повлияет.

Экспериментальный режим «кругового обзора»

Согласно своему назначению, аппаратура серии МСУ-МР снимает подстилающую поверхность в угле обзора 110° с центром в подспутниковой точке в направлении, перпендикулярном движению КА. Этот угол обзора формируется за счет непрерывного вращения двухстороннего плоскопараллельного сканирующего зеркала. В аппаратуре МСУ-МР 2-3 реализован экспериментальный режим «кругового обзора» — передачи сигнала, регистрируемого в угле обзора 110° с последовательным сдвигом центра угла обзора на 72° каждые 64 строки изображения (приблизительно каждые 10 секунд). Такой режим позволяет последовательно получить изображение всего внутреннего пространства прибора в каждом канале. Основная цель использования режима — поиск паразитных засветок (в том числе от подстилающей поверхности) для выработки рекомендаций по дальнейшей модернизации аппаратуры МСУ-МР.

Перспективы дальнейшей модернизации аппаратуры серии МСУ-МР.

Доработка ИАЧТ-Х и его радиатора

Конкретные шаги должны быть направлены на повышение радиометрической точности. На сегодняшний день очевидно, что существующая система «холодной» калибровки имеет два недостатка, вносящих неопределенность в измеряемые характеристики. Один из них связан с недостаточно высокой степенью черноты излучающей поверхности ИАЧТ (коэффициент черноты $\varepsilon \approx 0,97$). При наличии переменной засветки рабочей поверхности излучением от Земли, которая не может быть устранена в рамках существующей конструкции аппаратуры, это приводит к неопределенности фактической радиационной температуры ИАЧТ-Х [8]. Повышение коэффициента ε до значения порядка 0,99 может быть достигнуто за счет формирования на излучающей поверхности особого профиля и применения известных в настоящее время специальных покрытий.

Второй недостаток системы холодной калибровки заключается в наличии колебаний термодинамической температуры ИАЧТ-Х. Причина аналогична: это засветка радиатора излучением от Земли, интенсивность которого изменяется в витковом и суточном ходах. Дополнительная тепловая нагрузка на радиатор может составлять, по оценке, от 6 до 12 Вт. Существенное снижение этой нагрузки может быть обеспечено за счет введения в состав конструкции радиатора экранов-отражателей.

Повышение точности поддержания заданной температуры ИАЧТ-Х до значений $\sim 0,05$ К может быть реализовано путем двухконтурного регулирования. Первый, грубый контур должен располагаться в зоне теплообмена тепловой трубы с радиатором. Его задача — поддержание постоянной температуры в этой зоне с относительно невысокой точностью, порядка $\pm 0,5$ К. Входящий в состав ИАЧТ-Х второй контур должен отслеживать эти колебания. Повышенная точность достигается за счет того, что этот регулятор должен работать в узком диапазоне изменения мощности.

Дистанционное изменение и сохранение всех настроек блока управления и обработки сигнала

По аналогии с механизмом дистанционного изменения и сохранения настроек ЦАП необходимо реализовать те же возможности и для других констант, используемых в работе прибора.

Заключение

Эволюция аппаратуры серии МСУ-МР — показательный пример того, как в процессе эксплуатации приборов выявляются их существенные особенности и конструктивные просчеты, которые впоследствии устраняются. Этот эволюционный процесс позволяет выявить наиболее удачные конструктивные решения и использовать полученный опыт для разработки новой, более совершенной аппаратуры.

Список литературы

1. Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года. М.: Роскосмос, 2006. 77 с.
2. Акимов Н.П., Бадаев К.В., Гектин Ю.М. и др. Многозональное сканирующее устройство малого разрешения МСУ-МР для космического информационного комплекса «Метеор-М». Принцип работы, эволюция, перспективы // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2015, т. 2, вып. 4. С. 9–13.
3. Алексанин А.И., Гектин Ю.М., Дьяков С.Е. и др. Учет влияния криоосадков при калибровке ИК-каналов радиометра МСУ-МР // Исследование Земли из космоса, 2018, № 1. С. 1–9.
4. Киселева Ю.В., Рыжаков А.В., Козлов Д.А., Рублев А.Н. Контроль калибровки ИК-каналов сканера МСУ-МР по данным наземных измерений полярных полигонов // Международная школа-конференция молодых ученых «Климат и эколого-географические проблемы Российской Арктики». 4–10 сентября 2016, г. Апатиты. Сб. тезисов докладов. Электросталь: Изд-во ООО «КАЭМ», 2016. С. 100.
5. Патент № 2306583 Российской Федерации, G02B 23/12 (2006.01). Многозональное сканирующее устройство для дистанционного получения изображений в широком угле обзора: № 2005138576/28: заявлено 12.12.2005: опубл. 20.09.2007 / Н.П. Акимов, Ю.М. Гектин, М.В. Новиков, М.Б. Смелянский.
6. Андреев Р.В., Гектин Ю.М., Зайцев А.А. и др. Способ регистрации высокотемпературных объектов аппаратурой ДЗЗ с применением модифицированной передаточной характеристики приемного тракта // Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли. Москва, 2016.
7. Фролов А.Г., Серебряков Д.С., Пузаков Н.П. и др. Программно-аппаратная реализация компенсации воздействия дестабилизирующих факторов на опорные источники излучения и тракт формирования видеосигнала в составе аппаратуры ДЗЗ // VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». Сб. трудов. М.: АО «Российские космические системы», 2016.
8. Гектин Ю.М., Герасимов Д.Д., Зайцев А.А. и др. Анализ внешних воздействий на систему бортовой калибровки низкоорбитальной аппаратуры дистанционного зондирования в инфракрасном диапазоне // 59-я научная конференция МФТИ с международным участием. Тезисы докладов (Москва, 21–26 ноября 2016 г.). Москва, 2016. http://conf59.mipt.ru/static/reports_pdf/2707.pdf