

Анализ внешних воздействий на систему бортовой калибровки низкоорбитальной аппаратуры дистанционного зондирования в инфракрасном диапазоне

*Ю.М. Гектин¹, Д.Д. Герасимов², А.А. Зайцев^{1,2},
Ю.В. Киселева^{3,4}, А.Н. Рублев³, М.Б. Смелянский¹*

¹АО «Российские космические системы»

²Московский физико-технический институт (государственный университет)

³ФГБУ «НИЦ Планета»

⁴ФГБУ «Гидрометцентр России»

В процессе эксплуатации гидрометеорологической аппаратуры дистанционного зондирования Земли МСУ-МР (установлена на космическом аппарате «Метеор-М» №2) была подтверждена высокая точность определения температуры подстилающей поверхности в области низких температур в пределах заданного динамического диапазона 220–320 К (рис. 1а). При съемке подстилающей поверхности, имеющей более низкую температуру, естественным образом возникает погрешность ее определения из-за ограничения значения снизу цифрового сигнала, формируемого аппаратурой (рис 1б) [1]. Однако, как видно из графика, это ограничение имеет место на различных уровнях температуры в зависимости от времени съемки. Ниже изложено качественное объяснение эффекта изменения положения нижней температурной границы динамического диапазона аппаратуры МСУ-МР.

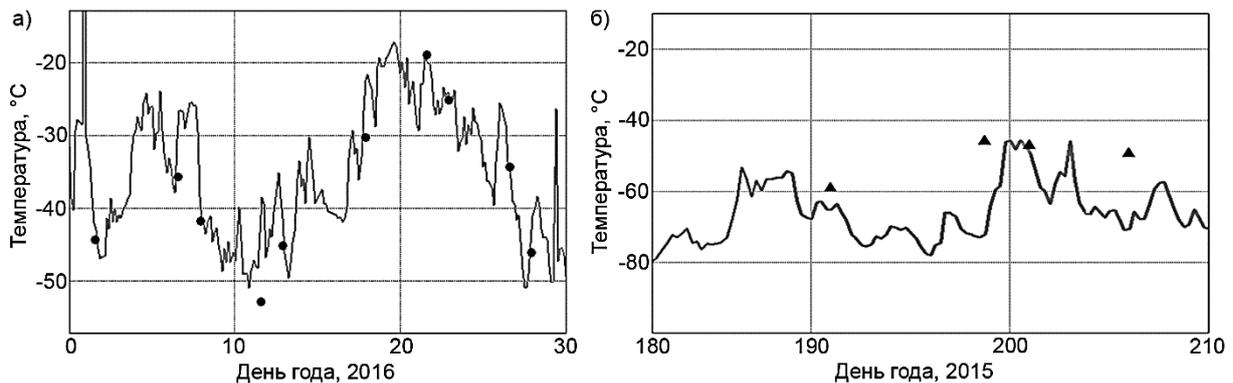


Рис. 1. Сравнение значений температуры, определенной по данным тепловых каналов МСУ-МР (отмечены маркерами) с показаниями, зарегистрированными на станциях Нэви-Оперейтед, о. Гренландия (а) и Восток, Антарктида (б).

Аппаратура МСУ-МР в инфракрасном диапазоне производит съемку в трех спектральных каналах — 3.5–4.1, 10.5–11.5 и 11.5–12.5 мкм [2]. Для обеспечения бортовой радиометрической калибровки используются опорные излучатели — имитаторы абсолютно черного тела, термостабилизированные на заданной температуре. Температура «горячего» составляет 313 К, «холодного» — 260 К. Регулярная регистрация сигнала от излучателей позволяет контролировать изменения масштаба выходного сигнала, связанные с изменениями чувствительности фотоприемного оптико-электронного тракта. Кроме того, для поддержания динамического диапазона в заданных пределах реализована автоматическая подстройка значения сигнала от «холодного» излучателя на заданный уровень путем изменения величины постоянной составляющей сигнала в аналоговом тракте.

Такой метод автоподстройки опорного уровня сигнала имеет очевидный положительный эффект. Однако, в случае, если сигнал от «холодного» излучателя по каким-либо причинам меняется, а его термодинамическая температура и параметры фотоприемного оптико-электронного тракта при этом остаются неизменными, автоматическая подстройка производит некорректный сдвиг шкалы выходного сигнала, что приводит систематической ошибке в определении радиационной температуры. Кроме того, при этом становится возможным цифровое ограничение сигнала.

Анализ значений температур бортовых имитаторов, а также сигналов, зарегистрированных от них, выявил явный «витковый ход» некоторых из этих параметров (рис. 2). Представленные зависимости интерпретируются следующим образом. В силу конструктивных особенностей

аппаратуры имитаторы под малыми углами освещены определенными зонами подстилающей поверхности (на рис. 2а показана временная зависимость среднего сигнала от подстилающей поверхности, регистрируемого аппаратурой). Во-первых, это приводит к периодическому повышению термодинамической температуры «холодного» имитатора (рис. 2б). Это происходит из-за особенностей работы системы термостабилизации радиатора имитатора. Система термостабилизации «горячего» имитатора при этом поддерживает стабильную температуру. Во-вторых, означенная подсветка имитаторов изменяет их радиационную температуру, поскольку степень их черноты отлична от единицы. Влияние обоих факторов приводит к тому, что цифровое значение сигнала от «горячего» имитатора имеет явно выраженный «витковый ход» (рис. 2в), коррелированный с сигналом от подстилающей поверхности.

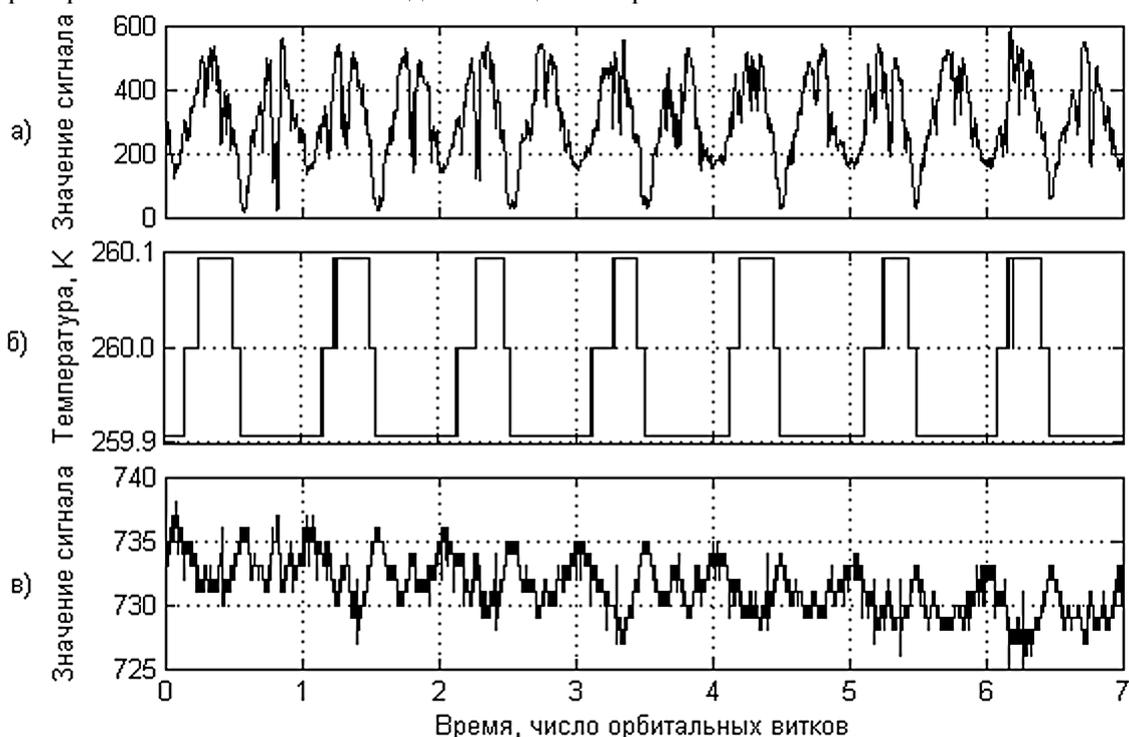


Рис 2. Временная зависимость среднего значения сигнала от подстилающей поверхности (а), температуры «холодного» имитатора (б) и значения сигнала от «горячего» имитатора (в) в канале 11.5–12.5 мкм.

Можно показать, что в первом приближении коррекция сигнала возможна по следующему алгоритму

$$U' = U + \frac{\delta U_h \cdot (U - C_c) - \delta U_c \cdot (U - C_h)}{U_h - U_c},$$

где C_c и C_h — константы двухточечной радиометрической коррекции (нормализации) сигнала, U_c и U_h — значения сигналов от имитаторов, δU_c и δU_h — времязависимые вариации значений сигналов от имитаторов, U и U' — нормализованный и скорректированный значения сигнала от подстилающей поверхности соответственно. Величины δU_c и δU_h определяются по телеметрической информации с учетом данных наземной радиометрической калибровки и конструктивных особенностей аппаратуры.

Тем не менее, для построения доверительной процедуры коррекции, по-видимому, необходим более детальный анализ описанного эффекта.

Литература

1. Киселева Ю.В. [и др.]. 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, Россия. Сборник тезисов докладов. 2016. С. 100. ISBN 978-5-902643-38-8.
2. Акимов Н.П. [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. ISSN 2409-0239.