

Наземная калибровка камер КМСС для КА «Метеор-М» № 1

В.А. Ваваев¹, А.С. Василейский², Б.С. Жуков¹, С.Б. Жуков², А.Н. Куркина²,
И.В. Полянский¹

¹Институт космических исследований РАН

117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

E-mail: bzukov@nserv.iki.rssi.ru

²Автономная некоммерческая организация «Космос-НТ»

117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

E-mail: ano_cnt@ofo.iki.rssi.ru

Наземная радиометрическая калибровка комплекса многозональной спутниковой съемки (КМСС), который будет установлен на борту КА «Метеор-М» № 1, включала анализ шумовых характеристик, калибровку темнового сигнала, проверку линейности характеристики свет-сигнал, спектральную калибровку каналов, калибровку распределения коэффициента чувствительности вдоль ПЗС-линеек. Исследована зависимость этих характеристик от времени экспозиции, температуры и коэффициента усиления. Результаты калибровки камер КМСС сохранялись в файлах радиометрической калибровки, которые будут использоваться для радиометрической коррекции видеоданных спутниковых съемок.

Ключевые слова: КМСС, Метеор-М, радиометрическая калибровка.

Задачи и особенности калибровки камер КМСС

В состав комплекса многозональной спутниковой съемки (КМСС) на КА «Метеор-М» №1 входят две трехзональные камеры МСУ-100 с фокусным расстоянием 100 мм и одна трехзональная камера МСУ-50 с фокусным расстоянием 50 мм [1-3]. В фокальной плоскости каждой камеры расположены три ПЗС-линейки со спектральными фильтрами. Спектральные зоны МСУ-100 (535...575, 630...680 и 700...900 нм) оптимизированы для исследований суши, а спектральные зоны МСУ-50 (370...450, 450...510 и 580...690 нм) – для исследований океана. Радиометрическое разрешение камер – 8 бит.

Задача радиометрической калибровки КМСС - установление связи между цифровыми сигналами $DN(x)$, регистрируемыми элементарными детекторами x в спектральных каналах каждой камеры КМСС, и значениями зональной яркости $B(x)$. Зональная яркость является средневзвешенным значением спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) $B(x, \lambda)$, где в качестве весовой функции используется функция спектральной чувствительности (ФСЧ) канала $S(x, \lambda)$:

$$B(x) = \int S(x, \lambda) B(x, \lambda) d\lambda / \int S(x, \lambda) d\lambda. \quad (1)$$

Предполагается, что форма ФСЧ одинакова для всех элементарных детекторов одного канала.

При условии линейности характеристики свет - сигнал в рабочем диапазоне ПЗС $DN(x)$ и $B(x)$ связаны соотношением:

$$DN(x) = \int S(x, \lambda) B(x, \lambda) d\lambda + DC(x) = c(x)B(x) + DC(x), \quad (2)$$

где $DC(x)$ - темновой сигнал; $c(x)$ - абсолютный коэффициент чувствительности элементарного детектора x , который определяется как

$$c(x) = \int S(x, \lambda) d\lambda. \quad (3)$$

При калибровке камер МСУ-50/100 учитывались их следующие технические и конструктивные особенности:

- Темновой сигнал чувствительных элементов ПЗС может меняться со временем из-за изменений температуры и некоторой нестабильности электроники. Для обеспечения возможности учета этих изменений конструкция используемых ПЗС-линеек включает набор так называемых «темновых» детекторов, представляющих собой элементарные детекторы, полностью идентичные остальным (так называемым «световым» или «рабочим»), но закрытые светонепроницаемым экраном. Измерение сигналов, генерируемых темновыми детекторами, позволяет оценивать для каждой строки изображения изменение темновых сигналов световых детекторов.

- При существенном повышении уровня темнового сигнала канала в полете возможно его уменьшение до оптимального уровня путем использования напряжения смещения, отличного от установленного при калибровке. При этом темновой сигнал для всех элементарных детекторов канала смещается на одну и ту же величину. Анализ сигналов темновых детекторов позволяет учесть и это смещение. При калибровке напряжение смещения устанавливается как функция коэффициента усиления.

Стенд радиометрической калибровки

Радиометрическая калибровка входящей в состав КМСС съемочной аппаратуры выполнялась на специализированном стенде, схематически представленном на рис.1. Он включает:

- образцовый излучатель ОИ;
- рабочий диффузный излучатель ДИ;
- монохроматор;
- высокоточный фотодетектор ФД;
- управляющую рабочую станцию РС;
- стабилизированные источники питания ИП1-ИП4.

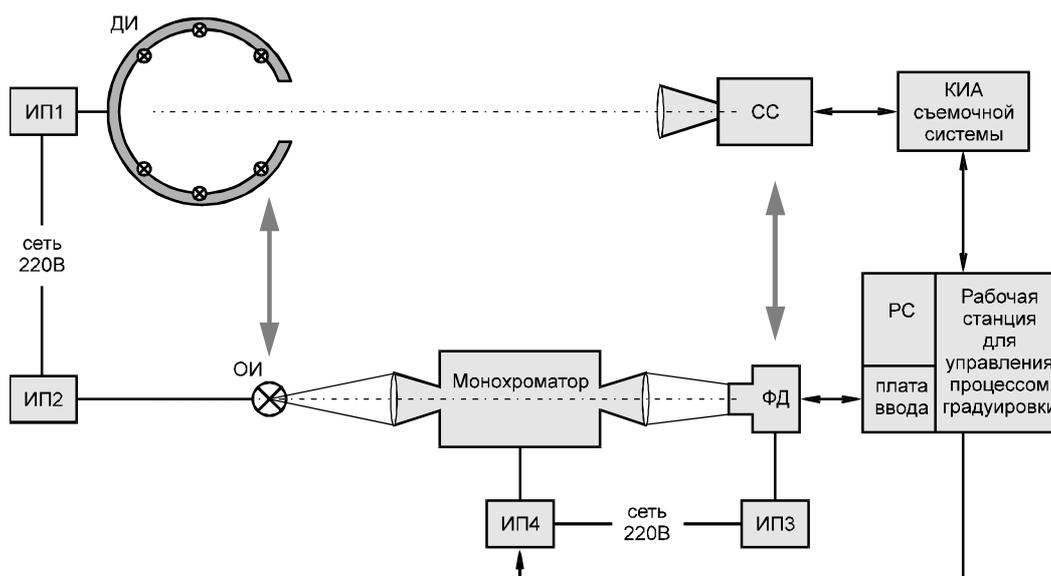


Рис. 1. Схема стенда радиометрической калибровки аппаратуры МСУ

Методика радиометрической калибровки КМСС [2] включает:

- анализ шумовых характеристик;
- калибровку темного сигнала;
- проверку линейности характеристики свет - сигнал;
- спектральную калибровку каналов;
- калибровку распределения коэффициента чувствительности.

Результаты калибровки

Анализ шумовых характеристик

Величина шума элементарных детекторов определялась как среднеквадратическая амплитуда вариаций их сигнала на темновом изображении размером 1000 строк. При коэффициенте усиления $k = 1$ (здесь и ниже коэффициент усиления указывается в линейных единицах) величина шума элементарных детекторов не превышала 0,5 градации сигнала, причем не выявлено ее систематической зависимости от температуры. Не выявлено также зависимости величины шума от времени экспозиции. Все это говорит о том, что наблюдаемый шум не имеет теплового характера, а формируется в электронных цепях считывания сигнала ПЗС. При увеличении коэффициента усиления шум возрастает, причем эта зависимость близка к линейной.

Калибровка темного сигнала

Темновой сигнал элементарных детекторов определялся по изображениям, полученным при закрытом объективе камеры, путем усреднения 1000 строк. Зависимости темного сигнала от времени экспозиции не выявлено, что свидетельствует о том, что он также, в основном, формируется в электронных цепях считывания сигнала ПЗС, а вкладом эффекта тепловой генерации заряда в ПЗС можно пренебречь. Можно отметить небольшой рост темного сигнала при повышении температуры, который, однако, не превышал 1 градации сигнала при $k = 1$.

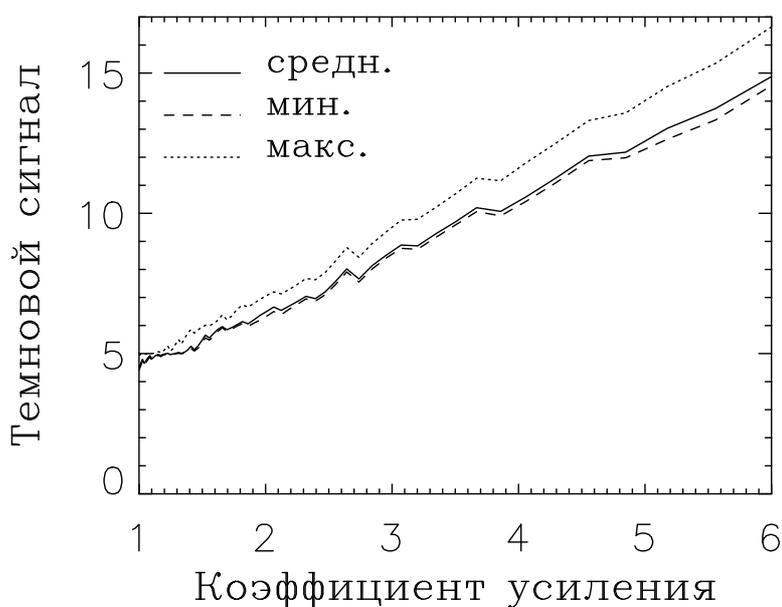


Рис. 2. Зависимость средней, минимальной и максимальной величин темного сигнала элементарных детекторов от коэффициента усиления

Зависимость величины темнового сигнала от коэффициента усиления k представлена на рис. 2 (здесь и ниже для иллюстрации используются результаты, полученные в канале 1 одной из камер МСУ-100).

Несмотря на частичную компенсацию эффекта изменения k путем подбора напряжения смещения, наблюдается значительный рост темнового сигнала с увеличением k . Указанная зависимость носит «пилообразный» характер, связанный с выбором различных напряжений смещения при разных коэффициентах усиления.

Разброс значений темнового сигнала элементарных детекторов при заданном коэффициенте усиления существенно меньше 1 градации сигнала при $k = 1$ и увеличивается до 2 градаций сигнала при $k = 6$.

Средний сигнал темновых детекторов определялся усреднением темнового изображения по 40 детекторам отдельно для «четных» и «нечетных» детекторов. Его можно использовать для коррекции зависимости темнового сигнала световых детекторов от коэффициента усиления и напряжения смещения. Для этого рассмотрим следующую модель формирования темнового сигнала:

$$DC(x, k) = ak(U(x) + \Delta U(k)), \quad (4)$$

где $U(x)$ - напряжение, считываемое с элемента x ПЗС; $\Delta U(k)$ - напряжение смещения, устанавливаемое в зависимости от коэффициента усиления k ; a - константа, связывающая напряжение с цифровым сигналом на выходе АЦП.

Аналогичным образом, средний сигнал темновых детекторов DC_{dark} описывается выражением

$$DC_{dark}(k) = ak(U_{dark} + \Delta U(k)).$$

Путем перехода к разности темновых сигналов световых и темновых элементов исключается влияние напряжения смещения $\Delta U(k)$:

$$DC(x, k) - DC_{dark}(k) = ak(U(x) - U_{dark}).$$

В частности, при некотором выбранном опорном коэффициенте усиления $k = k_d$ имеем

$$DC(x, k_d) - DC_{dark}(k_d) = ak_d(U(x) - U_{dark}).$$

Используя последние два выражения, получаем

$$DC(x, k) = \frac{k}{k_d}(DC(x, k_d) - DC_{dark}(k_d)) + DC_{dark}(k). \quad (5)$$

В рамках этой модели темновой сигнал световых элементов при коэффициенте усиления k может быть оценен по их темновому сигналу при коэффициенте усиления k_d и сигналам темновых элементов. В качестве k_d выбрано значение 1,588, которое близко к среднему используемому при реальной съемке значению коэффициента усиления.

Ошибки данной модели показаны на рис.3. Средняя величина этой ошибки существенно меньше 0,1 градации сигнала. Максимальное значение ошибки, которое наблюдается на небольшом количестве «дефектных» элементов, не превышало 0,5 градации сигнала.

Поскольку ошибки модели сопоставимы с уровнем шума, достаточно сохранить в калибровочных файлах значения темнового сигнала элементов только для выбранного значения k_d и далее использовать соотношение (5) для их оценки при произвольных значениях коэффициента усиления и напряжения смещения.

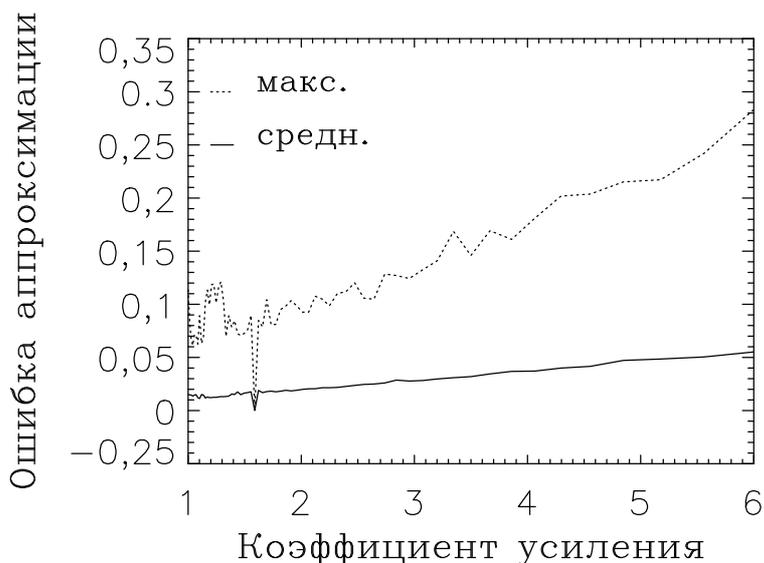


Рис. 3. Средняя и максимальная ошибка аппроксимации темнового сигнала в зависимости от коэффициента усиления

Проверка линейности характеристики свет - сигнал

Проверка линейности характеристики свет-сигнал проводилась по эталонному источнику путем варьирования времени экспозиции при коэффициенте усиления $k = 1$. Согласно требованиям к КМСС коэффициент нелинейности канала не должен превышать 2%. При $k = 1$ это условие удовлетворялось для всех камер при значении сигнала до 170-190. При $k > 1,5$, а в некоторых случаях - и при меньших коэффициентах усиления все каналы в соответствии с указанным критерием являются линейными при всех значениях сигнала.

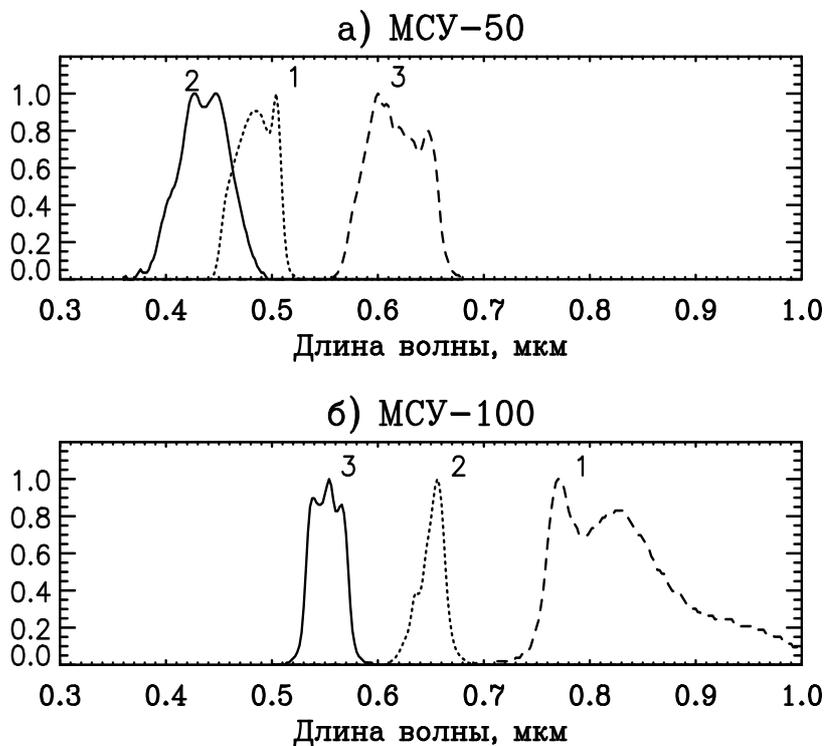


Рис. 4. Нормированные функции спектральной чувствительности каналов камер МСУ-50 и МСУ-100 (номер канала указан у кривой)

Спектральная калибровка каналов

Спектральная калибровка каналов камер проводилась с помощью эталонного источника и монохроматора. Монохроматическое изображение эталонного источника проектировалось на центральную часть ПЗС-линейек. Яркость эталонного источника подбиралась так, чтобы сигнал лежал в диапазоне линейности канала. Шаг спектральных отсчетов выбирался равным 2 нм. Нормированные функции спектральной чувствительности каналов камер МСУ-50 и МСУ-100 показаны на рис. 4.

Калибровка распределения коэффициента чувствительности

Калибровка распределения относительного коэффициента чувствительности $c_{отн}(x)$ проводилась по интегрирующей сфере. Пример зависимости относительного коэффициента чувствительности от номера элементарного светового детектора приведен на рис. 5. Систематический спад чувствительности к краю ПЗС-линейки связан с уменьшением освещенности фокальной плоскости при удалении от оптической оси. Кроме того, заметны флуктуации чувствительности между отдельными элементарными детекторами.

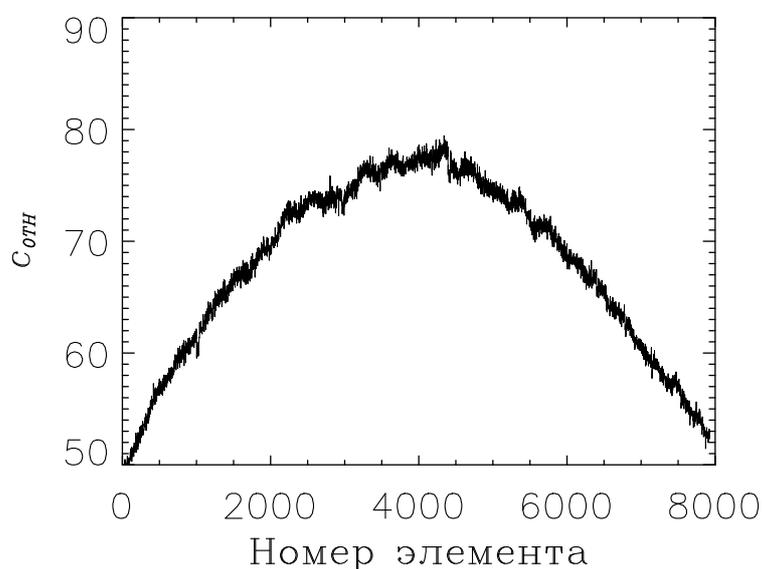


Рис. 5. Зависимость относительного коэффициента чувствительности от номера элементарного детектора

Средний коэффициент чувствительности каналов оказался с хорошей точностью пропорциональным коэффициенту усиления (рис. 6), а относительная форма распределения коэффициента чувствительности вдоль ПЗС-линейки - слабо зависящей от коэффициента усиления, изменяясь не более чем на 3% в камерах МСУ-100 и не более чем на 6% в МСУ-50.

Переход от распределения относительного коэффициента чувствительности к распределению абсолютного коэффициента чувствительности осуществлялся по результатам абсолютной калибровки чувствительности группы выбранных элементов вблизи центра ПЗС-линейек, выполнявшейся по эталонному источнику. Для этого использовалось соотношение:

$$c_0(x) = c_{отн}(x) \cdot \frac{\bar{c}_0}{\bar{c}_{отн}},$$

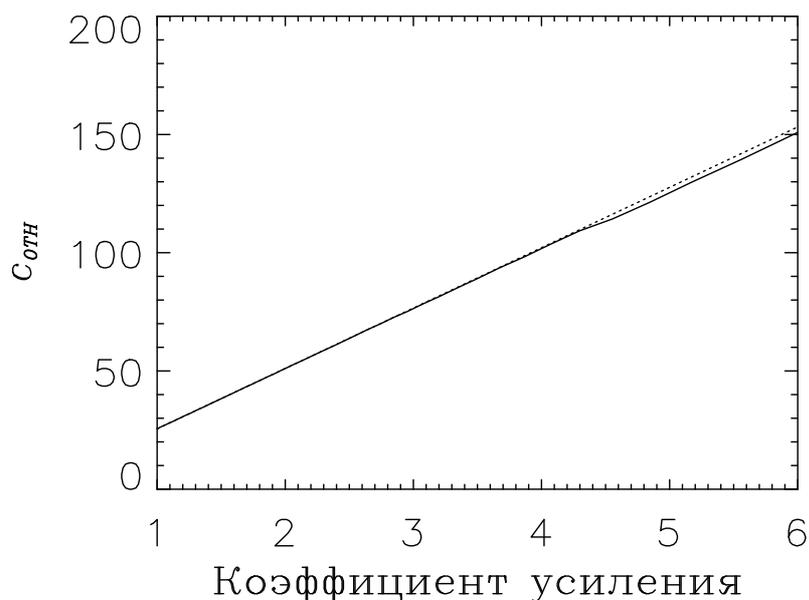


Рис. 6. Зависимость среднего относительного коэффициента чувствительности канала от коэффициента усиления: сплошная линия – измерения, пунктирная линия – пропорциональная зависимость

где \bar{c}_0 - средний абсолютный коэффициент чувствительности указанных элементов, приведенный к минимальному времени экспонирования $\tau_0 = 2$ мс и коэффициенту усиления $k_0 = 1$, $\bar{C}_{отн}$ - относительный коэффициент чувствительности, усредненный по тем же элементам, что и \bar{c}_0 .

Коэффициент чувствительности при времени экспозиции τ и коэффициенте усиления k рассчитывается как:

$$c(x, k, \tau) = c_0(x) \frac{k \tau}{k_0 \tau_0}.$$

По результатам калибровок сформированы калибровочные файлы, используемые при радиометрической коррекции видеоданных КМСС [3]. В них входят массивы абсолютных коэффициентов чувствительности $c_0(x)$ и темновых сигналов световых и темновых элементов $DC(x, k_d)$ и $DC_{dark}(u, k_d)$ вместе с соответствующими значениями τ_0 , k_0 и k_d .

Литература

1. Аванесов Г.А., Зиман Я.Л., Куделин М.И. и др. Комплекс многозональной съемочной аппаратуры, разрабатываемый для КА "Метеор-М" // Третья всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 14-17 ноября 2005 г. Сборник тезисов конференции. С. 72.
2. Руководство пользователя видеоданными КМСС. КБДУ.201231.014 РПВ.М.: АНО «Космос-НТ», 2006.
3. Жуков Б.С., Зиман Я.Л., Полянский И.В., Жуков С.Б., Бекренев О.В., Пермитина Л.И. Предварительная обработка видеоданных комплекса многозональной спутниковой съемки с космического аппарата «Метеор-М» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сб. научн. статей. М.: ООО «Азбука-2000», 2007. Вып. 4. Т. I. С.222-228.

On-ground calibration of KMSS cameras for Meteor-M No. 1

V.A. Vavaev¹, A.S. Vasilevsky², B.S. Zhukov¹, S.B. Zhukov², A.N. Kurkina²,
I.V. Polyansky¹

¹ *Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences*

² *Autonomous non-commercial organization «Kosmos-NT»*

On-ground radiometric calibration of the Multispectral Satellite Imaging System (KMSS), which will be installed on Meteor-M No. 1 spacecraft, included measurements of noise, dark signal, response linearity, spectral response function and sensitivity coefficient for CCD-detector elements. These characteristics were investigated as functions of integration time, temperature and amplification coefficient. The calibration results are stored in radiometric calibration files that will be used for radiometric correction of satellite images.

Keywords: KMSS, Meteor-M, radiometric calibration.