

Обробка інформації в складних технічних системах

УДК 528.7: 629.78

М.А. Авдеев¹, С.В. Чёрный²

¹ *Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, Харьков*

² *Харьковский центр института космических исследований НАНУ и ГКАУ, Харьков*

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ГРАДУИРОВКИ МНОГОЗОНАЛЬНЫХ СКАНИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ШИРОКОПОЛОСНЫМ СИГНАЛОМ

Рассмотрены варианты решения задачи получения градуировочных характеристик многозональных сканирующих устройств, выведены соответствующие формульные зависимости для оценки методических ошибок, проанализированы частные случаи, при которых ошибки отсутствуют, на примере реальных данных определены методические ошибки градуировки.

Ключевые слова: многозональные сканирующие устройства, радиометрическая калибровка, градуировочные характеристики.

Введение

Постановка проблемы и анализ литературы.

Для проведения спектрально-аэрокосмической съемки подстилающей поверхности широко применяются многозональные сканирующие устройства (МСУ), использующие в качестве приемника излучения линейные датчики на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС).

МСУ, как и другие спектральные приборы, предназначены для исследования спектрального состава по длинам волн электромагнитного излучения. Выходным продуктом МСУ являются цифровые изображения, сделанные в нескольких спектральных диапазонах.

Цифровые изображения МСУ традиционно используются в задачах обнаружения объектов по их форме. Однако во многих случаях дополнительно требуется информация об оптических характеристиках снимаемой поверхности, к которым относится поток падающего излучения, идущего от снятой поверхности, а также отражательная способность этой поверхности. Для определения этих величин, прежде всего, нужно знать спектральную плотность энергетической яркости на входе прибора. Для пересчета значений пикселей изображения в яркость используют градуировочную характеристику. Полоса длин волн принимаемого приемником МСУ излучения имеет некоторую ширину, следовательно, входной сигнал каждого пикселя датчика представляет собой функцию.

Однако градуировочная характеристика устанавливает связь между скалярными величинами. Поэтому при градуировке входной сигнал МСУ должен быть заменен на некоторую скалярную ве-

личину. Таким образом, возникает задача выбора преобразования входной функции в скаляр.

В статье рассматриваются различные варианты решения этой задачи, анализируются частные случаи, при которых ошибки отсутствуют, и на примере реальных данных определяются методические ошибки градуировки. **Целью статьи** является получение соответствующих этим вариантам аналитических зависимостей для оценки методических ошибок.

Перечисленные вопросы нашли отражение в литературе [1 – 4]. Однако они не содержат систематического изложения указанных вариантов решения задачи и соответствующих им формульных зависимостей.

В свете эксплуатации отечественного спутника "Сич-2", имеющего на борту МСУ, подготовки последующих аналогичных спутников, и потребностью в верификации их данных, статья является актуальной.

Основная часть

1. Формулировка задачи

Получение градуировочной характеристики или градуировка – одна из задач радиометрической калибровки МСУ. Существуют различные способы градуировки датчиков МСУ. Прежде всего – это предполетная градуировка, выполняемая до выведения прибора на орбиту. После выведения прибора на орбиту при наличии соответствующего оборудования градуировка может выполняться на борту по эталонным искусственным или естественным источникам света. Также возможна градуировка с использованием подспутниковых измерений. В каждом из этих случаев возникает одна и та же проблема представления или замены входного сигнала.

МСУ с точки зрения фотометрии представляет собой радиометр-яркометр, т.е. прибор, измеряющий яркость. Конструктивно датчик МСУ представляет собой набор линеек с чувствительными элементами (обычно их несколько тысяч). Будем рассматривать только один элемент одной линейки. Его выходной сигнал – это значение пиксела, обозначается DN (от англ. digital number – цифровое или дискретное число). На вход прибора поступает лучистая энергия, распределенная во всем диапазоне спектра. Распределение энергетической светимости (яркости) по спектру излучения характеризуется спектральной плотностью энергетической яркости (СПЭЯ) $B(\lambda)$ (единица измерения – Вт·м⁻²·ср⁻¹·мкм⁻¹), где λ – длина волны. МСУ измеряет эффективную энергетическую яркость (ЭЭЯ) B [1]:

$$B = \int_0^{\infty} B(\lambda)S(\lambda)d\lambda, \quad (1)$$

где $S(\lambda)$ – относительная спектральная характеристика чувствительности датчика.

Выходной сигнал DN пропорционален величине B , далее для простоты будем считать, что это одинаковые величины. Схематически работа прибора, соответствующая преобразованию (1), изображена на рис. 1.

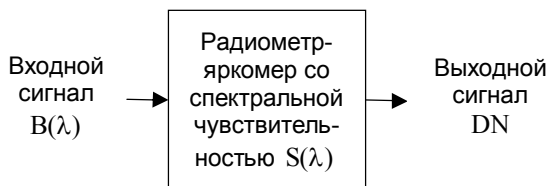


Рис. 1. Интегрирование взвешенного входного сигнала прибором

Градуировать этот прибор – значит получить зависимость выходного сигнала DN от входного $B(\lambda)$. Выходной сигнал представляет собой скаляр, а входной сигнал – функцию. В соответствии с выражением (1) выходной сигнал определяется видом этой функции во всем диапазоне длин волн. Градуировочная характеристика устанавливает соответствие только между скалярными величинами. Следовательно, при выполнении градуировки нужно действительный входной сигнал в виде функции заменить некоторым скалярным сигналом.

Использование прибора подразумевает получение по выходному сигналу входного сигнала с использованием градуировочной характеристики. Получить по скалярному выходному сигналу действительный входной сигнал (функцию), конечно, невозможно. Но предполагается, что по градуировочной характеристике удастся хотя бы получить преобразованный входной сигнал, т.е. тот скалярный сигнал, на который был заменен действительный сигнал в виде функции. На самом деле в общем случае в точности такой сигнал

получить не удастся. Т.е. рассчитанная по градуировочной характеристике величина будет отличаться от сигнала-заменителя. Разницу этих величин будем называть методической погрешностью градуировки. Невозможность восстановления входного сигнала по входному и даже восстановления сигнала-заменителя – следствие особенностей работы приборов рассматриваемого типа (взвешенное интегрирование входного сигнала в полосе пропускания приемника). В статье [2] они называются спектрально-несогласованными радиометрами-яркометрами.

Одной из задач настоящей статьи является оценка методической погрешности градуировки при различных способах (моделях) формирования скалярного входного сигнала-заменителя. Рассмотрим возможные варианты формирования такого сигнала.

Первый вариант – это замена действительного входного сигнала $B(\lambda)$ полной интегральной яркостью:

$$B_1 = \int_0^{\infty} B(\lambda)d\lambda. \quad (2)$$

Второй вариант – замена сигнала $B(\lambda)$ интегральной яркостью источника излучения в пределах некоторого интервала $\Delta\lambda$:

$$B_{\Delta\lambda} = \int_{\Delta\lambda} B(\lambda)d\lambda. \quad (3)$$

Третий вариант: в качестве входного сигнала рассматривается эффективная яркость:

$$B_e = \int_0^{\infty} B(\lambda)d\lambda. \quad (4)$$

И, наконец, в четвертом варианте в качестве входного сигнала рассматривается значение входного сигнала B_x на выбранной длине волны λ_x :

$$B_x = B(\lambda_x). \quad (5)$$

Заметим, что перечисленные формы представления входного сигнала не исчерпывают всего возможного их разнообразия. Например, при градуировке камер комплекса многозональной спутниковой съемки КА "Метеор-М" № 1 [3] в качестве входного сигнала используется так называемая зональная яркость, определяемая по формуле

$$B_3 = \int_0^{\infty} B(\lambda)S(\lambda)d\lambda / \int_0^{\infty} S(\lambda)d\lambda. \quad (6)$$

Остановимся на четырех формах, определяемых выражениями (2) – (5). Итак, для градуировки следует выполнить такую последовательность действий:

- подать на прибор сигнал $B(\lambda)$;
- вычислить сигнал-заменитель по одной из формул (2) – (5);
- зафиксировать выходной сигнал DN;
- найти коэффициент передачи или чувствительность прибора, разделив выходной сигнал на входной сигнал.

Соответственно виду входного сигнала (2) – (5) на последнем шаге получают или интегральную чувствительность канала $S_i = DN/B_i$, или абсолютную чувствительность $S_{\Delta\lambda} = DN/B_{\Delta\lambda}$, или эффективную чувствительность $S_e = DN/B_e$, или, наконец, чувствительность на выбранной длине волны $S_x = DN/B_x$.

Пересчет выходного сигнала прибора DN в соответствующие входные сигналы B_i^r , $B_{\Delta\lambda}^r$, B_e^r , B_x^r выполняется с использованием градуировочной характеристики по типовой формуле $B_j^r = DN/S_j$. Здесь j обозначает i, $\Delta\lambda$, e, x; верхний индекс "r" добавлен к величинам, родственным тем, что определяются выражениями (2) – (5), но вычисляемым по градуировочным характеристикам. Задачей является определение разницы величин B_j^r и соответствующих им величин (2) – (5). Эта разница представляет собой методическую погрешность градуировки.

2. Вывод выражений для вычисленных входных величин

Пересчет выходного сигнала по градуировочной характеристике определяет некоторую величину B_j^r , которая в общем случае не совпадает с сигналом-заменителем, определяемым по формулам (2) – (5), т.е. имеет методическую погрешность. Найдем выражения для величин B_j^r (j = i, $\Delta\lambda$, e, x) и укажем частные случаи, при которых методическая ошибка отсутствует.

2.1. Входной сигнал-заменитель – полная интегральная яркость

Определим входной сигнал, получаемый по градуировочной характеристике для случая, когда в качестве сигнала-заменителя при градуировке выбирается полная интегральная яркость (2). Пусть во время градуировки использовался эталонный входной сигнал $B_3(\lambda)$. Тогда коэффициент передачи (градуировочная характеристика) будет равен:

$$S_i = \frac{DN}{B_i} = \frac{\int_0^\infty B_3(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int_0^\infty B_3(\lambda)d\lambda}. \quad (7)$$

При эксплуатации прибора в ответ на произвольный входной сигнал $B(\lambda)$ прибор выдает выходной сигнал DN, определяемый (1), этот сигнал пересчитывается во входной сигнал по градуировочной формуле $B_i^r = DN/S_i$:

$$B_i^r = \frac{DN}{S_i} = \frac{\int_0^\infty B(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int_0^\infty B_3(\lambda)S(\lambda)d\lambda} \Bigg/ \frac{\int_0^\infty B_3(\lambda)d\lambda}{\int_0^\infty B_3(\lambda)S(\lambda)d\lambda} =$$

$$= \int_0^\infty B_3(\lambda)d\lambda \times \left(\frac{\int_0^\infty B(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int_0^\infty B_3(\lambda)S(\lambda)d\lambda} \Bigg/ \frac{\int_0^\infty B_3(\lambda)d\lambda}{\int_0^\infty B_3(\lambda)S(\lambda)d\lambda} \right). \quad (8)$$

Как видно, вместо желаемого значения входного сигнала, определяемого (2), получили отличное от него выражение. Только в случае, когда входной сигнал $B(\lambda)$ в точности совпадает с тем, что использовался при градуировке $B_3(\lambda)$, выражение (8) определяет ту же величину, что и (2).

2.2. Входной сигнал-заменитель – интегральная яркость источника излучения в пределах некоторого интервала $\Delta\lambda$

Если во время градуировки использовался входной сигнал $B_3(\lambda)$, то коэффициент передачи будет равен:

$$S_{\Delta\lambda} = \frac{DN}{B_{\Delta\lambda}} = \frac{\int_0^\infty B_3(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} B_3(\lambda)d\lambda}. \quad (9)$$

При подаче на вход прибора произвольного входного сигнала $B(\lambda)$ прибор выдает сигнал DN, определяемый (1), сигнал пересчитывается по градуировочной формуле $B_{\Delta\lambda}^r = DN/S_{\Delta\lambda}$ в величину

$$B_{\Delta\lambda}^r = \frac{DN}{S_{\Delta\lambda}} = \frac{\int_0^\infty B(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int_0^\infty B_3(\lambda)S(\lambda)d\lambda} \Bigg/ \frac{\int_{\Delta\lambda} B_3(\lambda)d\lambda}{\int_0^\infty B_3(\lambda)S(\lambda)d\lambda} =$$

$$= \int_{\Delta\lambda} B_3(\lambda)d\lambda \times \left(\frac{\int_0^\infty B(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int_0^\infty B_3(\lambda)S(\lambda)d\lambda} \Bigg/ \frac{\int_0^\infty B_3(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int_0^\infty B_3(\lambda)S(\lambda)d\lambda} \right).$$

Эта величина, также как и в предыдущем случае, совпадает с ожидаемым значением (3) только тогда, когда входной сигнал $B(\lambda)$ в точности совпадает с тем, который использовался при градуировке, т.е. $B_3(\lambda)$. Однако при таком варианте сигнала-заменителя имеется частный случай, когда для совпадения величин (3) и (10) точного совпадения $B(\lambda)$ и $B_3(\lambda)$ не требуется. Рассмотрим его. Пусть спектральная характеристика чувствительности датчика симметрична внутри интервала $\Delta\lambda$, и пусть спектры входного сигнала $B(\lambda)$ и спектр сигнала, использовавшегося при градуировке $B_3(\lambda)$, представляют собой линейные функции (рис. 2).

Сказанное выражается уравнениями:

$$S(\lambda^* - \lambda) = S(\lambda^* + \lambda), \quad (11)$$

$$B_3(\lambda) = a_3(\lambda) + b_3, \quad (12)$$

$$B(\lambda) = a(\lambda) + b, \quad (13)$$

где $\lambda^* = (\lambda_{\max} + \lambda_{\min})/2$ – центр симметрии; $\Delta\lambda = \lambda_{\max} - \lambda_{\min}$ – ширина полосы канала; a_3, b_3, a, b – коэффициенты.

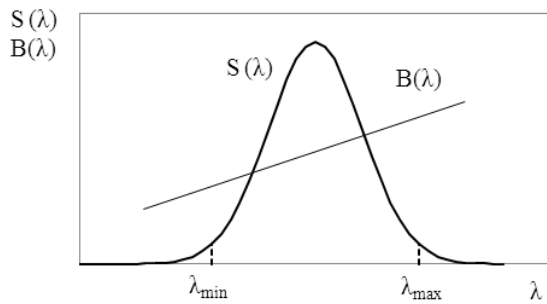


Рис. 2. Частный случай функции чувствительности и входного сигнала

Разобьем интеграл в числителе дроби (10) на два слагаемых:

$$\int_0^\infty B(\lambda)S(\lambda)d\lambda = \int_0^{\lambda^*} B(\lambda)S(\lambda)d\lambda + \int_{\lambda^*}^\infty B(\lambda)S(\lambda)d\lambda \quad (14)$$

и вычислим второй интеграл. Сделаем замену переменной интегрирования:

$$\mu = \lambda_{\max} + \lambda_{\min} - \lambda = 2\lambda^* - \lambda. \quad (15)$$

Тогда получим:

$$\lambda = 2\lambda^* - \mu; \mu(\lambda^*) = \lambda^*; \mu(\infty) = -\infty. \quad (16)$$

$$\int_{\lambda^*}^\infty B(\lambda)S(\lambda)d\lambda = - \int_{\lambda^*}^{-\infty} B(2\lambda^* - \mu)S(2\lambda^* - \mu)d\mu. \quad (17)$$

В силу симметричности функции S :

$$S(2\lambda^* - \mu) = S(\lambda^* - (\mu - \lambda^*)) = S(\lambda^* + (\mu - \lambda^*)) = S(\mu). \quad (18)$$

Подставляя в (16) выражение (18) и выражение

$$B(2\lambda^* - \mu) = a(2\lambda^* - \mu) + b = 2a\lambda^* - a\mu + b, \quad (19)$$

получим:

$$\int_{\lambda^*}^\infty B(\lambda)S(\lambda)d\lambda = \int_0^{\lambda^*} (2a\lambda^* - a\mu + b)S(\mu)d\mu. \quad (20)$$

Подставим (20) в (14) и получим:

$$\begin{aligned} \int_0^{\lambda^*} B(\lambda)S(\lambda)d\lambda &= \int_0^{\lambda^*} (a\lambda + b)S(\lambda)d\lambda + \\ + \int_0^{\lambda^*} (2a\lambda^* - a\lambda + b)S(\lambda)d\lambda &= \int_0^{\lambda^*} (2a\lambda^* + 2b)S(\lambda)d\lambda = (21) \\ &= (2a\lambda^* + 2b) \int_0^{\lambda^*} S(\lambda)d\lambda = (a\lambda^* + b) \int_0^\infty S(\lambda)d\lambda. \end{aligned}$$

Итак, найден числитель дроби (10). Знаменатель дроби можно записать по аналогии:

$$\int_0^\infty B_3(\lambda)S(\lambda)d\lambda = (a_3\lambda^* + b_3) \int_0^\infty S(\lambda)d\lambda. \quad (22)$$

Преобразуем теперь первый множитель в (10):

$$\begin{aligned} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} B_3(\lambda)d\lambda &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} (a_3\lambda + b_3)d\lambda = \\ &= (a_3\lambda^* + b_3)(\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) \end{aligned} \quad (23)$$

и вычислим окончательно выражение (10):

$$\begin{aligned} B_{\Delta\lambda}^r &= \frac{DN}{S_{\Delta\lambda}} = \left(\int_0^\infty B(\lambda)S(\lambda)d\lambda \Big/ \int_0^\infty B_3(\lambda)S(\lambda)d\lambda \right) \times \\ &\times \int_{\Delta\lambda} B_3(\lambda)d\lambda = (a_3\lambda^* + b_3) \cdot (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) \times \\ &\times (a\lambda^* + b) \int_0^\infty S(\lambda)d\lambda \Big/ \left((a_3\lambda^* + b_3) \int_0^\infty S(\lambda)d\lambda \right) = \\ &= \Delta\lambda(a\lambda^* + b). \end{aligned} \quad (24)$$

Выражение (24) определяет вычисленный по выходному сигналу DN и по градуировочной зависимости входной сигнал. В то же время интеграл от спектральной характеристики входного сигнала B(λ) в полосе Δλ по аналогии с (23) определяется как

$$\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} B(\lambda)d\lambda = (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})(a\lambda^* + b), \quad (25)$$

т.е. в точности совпадает со входным сигналом, определяемым выражением (24).

Таким образом, доказано, что в случае, если спектральная характеристика чувствительности прибора внутри некоторого интервала симметрична, используемые входные сигналы имеют линейный спектр, а в качестве входного сигнала при градуировке принимается интегральная яркость внутри этого интервала, то градуировка выполняется без методических погрешностей. Т.е. величины, определяемые по выходному сигналу прибора с помощью градуировочной характеристики, точно соответствуют заявленным, а именно интегральной яркости внутри этого интервала.

2.3. Входной сигнал-заменитель – эффективная яркость

Пусть, как и прежде, во время градуировки используется входной сигнал, имеющий спектральную характеристику $B_3(\lambda)$, а в качестве скалярного входного сигнала используется величина B_e , определяемая (4). Тогда коэффициент передачи будет равен:

$$S_e = \frac{DN}{B_e} = \int_0^\infty B_3(\lambda)S(\lambda)d\lambda \Big/ \int_0^\infty B_3(\lambda)S(\lambda)d\lambda = 1. \quad (26)$$

Тогда при подаче на вход прибора произвольного входного сигнала B(λ) получим выходной сигнал DN, определяемый (1), пересчитав который во входной сигнал по градуировочной формуле $B_e^r = DN/S_e$, получим величину

$$B_e^r = \frac{DN}{S_e} = \int_0^\infty B(\lambda)S(\lambda)d\lambda \Big/ 1 = \int_0^\infty B(\lambda)S(\lambda)d\lambda. \quad (27)$$

Т.е. получим заявленную величину, без методических погрешностей. Недостаток такого способа градуировки в том, что сигнал-заменитель – не интеграл от спектральной функции воздействующего излучения, что хотелось бы, а интеграл от взвешенной спектральной функции.

2.4. Входной сигнал-заменитель – спектральная плотность энергетической яркости $V(\lambda_x)$ на выбранной длине волны λ_x

Во время градуировки используется входной сигнал, имеющий спектральную характеристику $B_3(\lambda)$, в качестве скалярного входного сигнала используется спектральная плотность энергетической яркости $B_3(\lambda_x)$ на выбранной длине волны λ_x . Тогда коэффициент передачи будет равен:

$$S_x = \frac{DN}{B_3(\lambda_x)} = \int_0^{\infty} B_3(\lambda)S(\lambda)d\lambda / B_3(\lambda_x). \quad (28)$$

При подаче на вход прибора произвольного входного сигнала $V(\lambda)$ получим выходной сигнал DN , определяемый (1), пересчитав который во входной сигнал по градуировочной формуле $B_x^r = DN/S_x$, получим величину

$$B_x^r = \frac{DN}{S_x} = \int_0^{\infty} V(\lambda)S(\lambda)d\lambda / \left(\int_0^{\infty} B_3(\lambda)S(\lambda)d\lambda / B_3(\lambda_x) \right) = \quad (29)$$

$$= B_3(\lambda_x) \cdot \left(\int_0^{\infty} V(\lambda)S(\lambda)d\lambda / \int_0^{\infty} B_3(\lambda)S(\lambda)d\lambda \right).$$

Т.е. в общем случае рассчитанный по выходному сигналу и по градуировочной характеристике входной сигнал B_x^r не будет равен ожидаемому входному сигналу $V(\lambda_x)$.

Однако, как и в случае, когда в качестве входного сигнала выбирается интегральная яркость источника излучения в пределах некоторого интервала $\Delta\lambda$, здесь также имеется частный случай, при котором методическая погрешность отсутствует. Также требуется линейность спектров, однако уже не требуется симметричность функции чувствительности датчика. Необходимо только значение λ_x выбирать так, чтобы выполнялось равенство

$$B_x^r = V(\lambda_x). \quad (30)$$

Значение λ_x , при котором равенство (30) выполняется, существует для любых входных сигналов с линейным спектром. Найдем это значение.

Если спектры входных сигналов описываются уравнениями (12), (13), то с учетом равенства

$$B_3(\lambda_x) = a_3\lambda_x + b_3 \quad (31)$$

уравнение (30) можно переписать и дополнить условием (31):

$$B_x^r = \int_0^{\infty} (a\lambda + b)S(\lambda)d\lambda / \int_0^{\infty} (a_3\lambda + b_3)S(\lambda)d\lambda \times \quad (32)$$

$$\times (a_3\lambda_x + b_3) = V(\lambda_x) = a\lambda_x + b.$$

Из (32) находим выражение для λ_x :

$$\lambda_x = \frac{b \int_0^{\infty} (a_3\lambda + b_3)S(\lambda)d\lambda - b_3 \int_0^{\infty} (a\lambda + b)S(\lambda)d\lambda}{a_3 \int_0^{\infty} (a\lambda + b)S(\lambda)d\lambda - a \int_0^{\infty} (a_3\lambda + b_3)S(\lambda)d\lambda} =$$

$$= \int_0^{\infty} \lambda S(\lambda)d\lambda / \int_0^{\infty} S(\lambda)d\lambda.$$

Как видно из (33), значение λ_x , на котором следует выполнять градуировку, не зависит от параметров спектральных характеристик входных сигналов. Тем самым обеспечивается отсутствие методической ошибки, т.е. гарантируется, что при таком выборе входного сигнала при градуировке величина, определяемая по градуировочной характеристике, всегда будет в точности равна заявленной.

3. Экспериментальное определение методической погрешности

Оценить методическую погрешность теоретически ввиду многообразия и неаналитичности участвующих в преобразованиях функций не представляется возможным. Однако можно определить эту погрешность экспериментально, для конкретных видов входных сигналов и спектральных функций чувствительности датчиков МСУ. Такая оценка в качестве примера приводится для случая, когда для градуировки выбирается сигнал-заменитель в виде интегральной яркости источника излучения в пределах полосы $\Delta\lambda$, в которой работает конкретный канал МСУ, т.е. когда входной сигнал рассчитывается по формуле (3).

Как показано выше, для этого варианта методическая погрешность отсутствует в случае, если характеристика спектральной чувствительности симметрична в пределах полосы $\Delta\lambda$, а сигналы на входе датчика имеют линейный спектр. В качестве эталонного для градуировки будем использовать сигнал со спектром $B_3(\lambda) = 1$. В остальных условиях методическая погрешность не выполняется.

Градуировочная характеристика была определена для каналов МСУ типа ЕТМ+ спутника Ландсат-7. На рис. 3 приведены функции чувствительности некоторых каналов МСУ ЕТМ+, которые были использованы. Как видно, эти функции далеки от идеальных.

В качестве входных сигналов использовались значения реальных спектральных характеристик отражения, полученные от 68 объектов в ходе полевых измерений (рис. 4).

В данном исследовании несущественно, какая функция используется в качестве входного сигнала – функция спектральной плотности потока падающего излучения $V(\lambda)$ или спектральная характеристика отражения $\rho(\lambda)$. Последняя получается из $V(\lambda)$ в

процессе атмосферной коррекции. Поэтому далее вместо функции $B(\lambda)$ использовалась функция $\rho(\lambda)$.

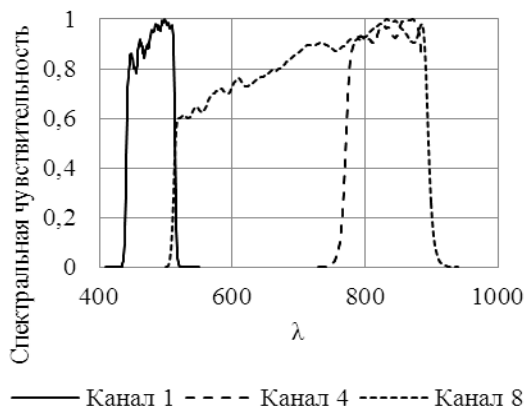


Рис. 3. Функции спектральной чувствительности МСУ ЕТМ+

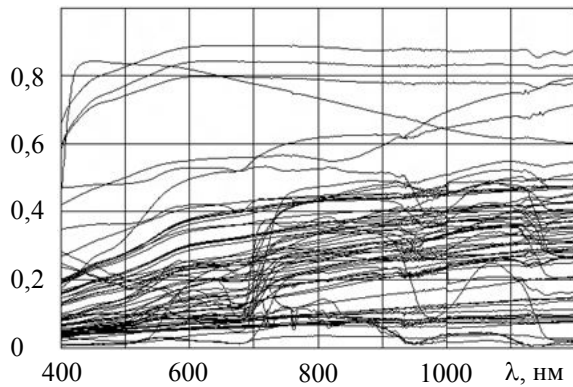


Рис. 4. Спектры тестовых объектов для определения методической ошибки

Итак, во время градуировки при подаче на вход прибора эталонного входного сигнала $B_3(\lambda) = 1$ получаем на выходе, в соответствие с формулой (1), значение

$$DN = \int_0^{\infty} B_3(\lambda)S(\lambda)d\lambda = \int_0^{\infty} S(\lambda)d\lambda. \quad (34)$$

Входной модельный сигнал, в соответствие с формулой (3), равен

$$B_{\Delta\lambda} = \int_{\Delta\lambda} B_3(\lambda)d\lambda = \Delta\lambda. \quad (35)$$

Коэффициент передачи равен

$$S_{\Delta\lambda} = \frac{DN}{B_{\Delta\lambda}} = \frac{1}{\Delta\lambda} \int_0^{\infty} S(\lambda)d\lambda. \quad (36)$$

Теперь, подавая на вход прибора произвольный сигнал со спектром $B(\lambda)$, на выходе будем получать величину DN в соответствие с (1), пересчитывать её во входной сигнал-заменитель и получать

$$B_{\Delta\lambda}^r = \frac{DN}{S_{\Delta\lambda}} = \Delta\lambda \cdot \int_0^{\infty} B(\lambda)S(\lambda)d\lambda / \int_0^{\infty} S(\lambda)d\lambda. \quad (37)$$

Выражение (37) определяет вычисленное значение сигнала-заменителя. В то же время ожидаемое значение этого сигнала определяется формулой (3). Задачей является сравнить эти величины для различных входных сигналов из набора, показанного на рис. 4.

Результаты вычислений показаны на рис. 5. Здесь построены 68 точек (ряд "Оценка"), каждая из которых соответствует одному входному сигналу из семейства сигналов, показанных на рис. 4. Абсцисса точки – это величина, определяемая формулой (3), ордината – величина, определяемая формулой (37). Данные соответствуют 8-му каналу датчика (панхроматическому) с наибольшей шириной полосы.

Здесь же построены точки, определяющие методическую ошибку – разницу между значениями (37) и (3). Абсолютная ошибка не превысила 9 единиц, относительная – 11%. Через построенные точки проведена аппроксимирующая прямая. Как видно, отклонение точек от прямой линии незначительное. На графике показана формула для аппроксимирующей зависимости и указано значение показателя качества аппроксимации R^2 . Показатель R^2 , называемый еще коэффициентом достоверности регрессии или коэффициентом детерминации, вычисляется для ряда y_i по следующей формуле:

$$R^2 = \frac{\sum_i (\hat{y}_i - \bar{y})}{\sum_i (y_i - \bar{y})}, \quad (38)$$

где \hat{y}_i – прогноз (оценка) величины y_i на основании аппроксимирующей зависимости; \bar{y} – среднее значение для всего ряда.

Естественно было ожидать, что методическая ошибка будет меньше для остальных, более узких полос. В табл. 1 приведены результаты расчета для семи полос (каналов) датчика ЕТМ+.

Для каналов 1 – 5 и 7 показатель качества аппроксимации очень высокий, не менее 0,9999.

Таблица 1
Методические ошибки градуировки

№ полосы	1	2	3	4	5	6	7	8
Абсолютная	0,31	0,21	0,09	0,05	0,30	-	0,87	8,23
Относит., %	3,11	2,73	1,05	0,38	1,00	-	2,42	10,14

Выводы

1. Рассмотрены четыре способа преобразования спектральной функции входного сигнала в скалярную величину. Для этих способов указаны частные случаи спектров входных сигналов, при которых методические погрешности, связанные с этими преобразованиями, отсутствуют. Эти частные случаи важны, поскольку обычно для спектров реальных сигналов указанные условия достаточно точно выполняются.

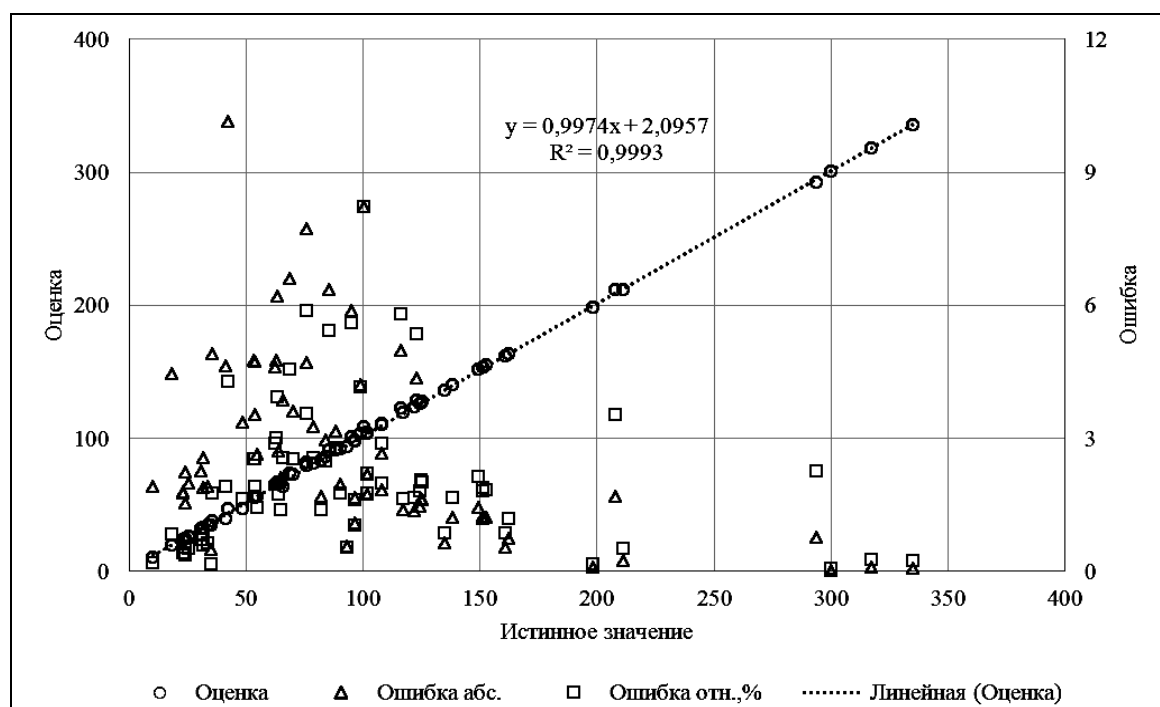


Рис. 5. Градуировочная зависимость для 8-го канала

2. Проанализирована одна из составляющих методической погрешности градуировки многозональных сканирующих устройств широкополосным сигналом, обусловленная особенностью работы прибора, как интегратора, взвешивающего входной сигнал. На примере реальных данных показано, что даже для широкополосного канала эта погрешность незначительна, около 10%. Для остальных каналов она значительно меньше – около 3%. Однако необходимо учитывать, что для достижения такой погрешности необходимо возможно точнее знать границы спектрального диапазона, в котором выполняется интегрирование спектральной плотности энергетической яркости на входе МСУ.

2. Михеенко Л.А. Метрологическое обеспечение радиометрической калибровки оптико-электронных устройств дистанционного зондирования земли / Л.А. Михеенко, В.Н. Боровицкий // *Космична наука і технологія*. – 2009. – Т. 15, № 5. – С. 3-15.

3. Относительная радиометрическая калибровка комплекса многозональной спутниковой съемки (КМСС) / А.С. Василейский, Б.С. Жуков, С.Б. Жуков и др. // *Всероссийская научно-техническая конференция "Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов"*: Сборник трудов. – Россия, Таруса. 22-25 сентября 2008 г. ИКИ РАН. – С. 562-574.

4. Малинников В.А. *Спектрометрирование аэроландшафта: Учебное пособие для студентов* / В.А. Малинников, А.Ф. Стеценко, А.Е. Алтынов, С.М. Попов. – М.: Изд. МНИИГАиК. УПП "Репрография", 2008. – 120 с.

Список литературы

1. Привязка космических радиометрических данных оптического диапазона длин волн к международной системе единиц СИ / А.С. Панфилов, А.А. Бурдакин и др. // *Исследование Земли из космоса*. – 2009. – Т. 6, № 1. – С. 282-287.

Поступила в редколлегию 18.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.П. Деденок, Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, Харьков.

МЕТОДИЧНІ ПОМИЛКИ ГРАДУЮВАННЯ БАГАТОЗОНАЛЬНИХ СКАНУЮЧИХ ПРИБОРІВ ШИРОКОПОЛОСНИМ СИГНАЛОМ

М.О. Авдєєв, С.В. Чорний

Розглянуто варіанти вирішення задачі одержання градуювальних характеристик багатозональних скануючих пристроїв, виведені відповідні формульні залежності для оцінки методичних помилок, проаналізовано окремі випадки, при яких помилки відсутні, на прикладі реальних даних визначено методичні помилки градуювання.

Ключові слова: багатозональні скануючі пристрої, радіометрична калібрування, градуювальні характеристики.

METHODOLOGICAL ERRORS IN THE CALIBRATION OF MULTISPECTRAL SCANNING DEVICE OF THE WIDEBAND SIGNAL

M.A. Avdeev, S.V. Chorny

The options for resolving problem of obtaining calibration characteristics of multispectral scanning devices have been discussed, the appropriate evaluation equations of methodological errors are derived, have been analyzed the particular cases in which there are no errors, methodological errors was determined on the basis of the real data.

Keywords: multi-spectral scanning devices, radiometric calibration, the calibration characteristics.