

Энергетическая градуировка измерительных видеосистем

М.В. Ваваев, В.А. Ваваев

Институт космических исследований РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
E-mail: msva@iki.rssi.ru

В отделе оптико-физических исследований ИКИ РАН ведутся работы по созданию многозональных сканирующих устройств (МСУ), предназначенных для метеорологических и природно-ресурсных исследований Земли из космоса. На данный момент в отделе созданы две модификации прибора – МСУ 100 и МСУ 50. Приемными устройствами в этих приборах являются три линейных детектора на основе ПЗС для разных спектральных диапазонов.

Все три детектора одновременно ведут сканирование полосы земной поверхности. Каждый объект поверхности или атмосферы Земли имеет свой спектр отраженного солнечного излучения, по которому можно судить о его физических свойствах. МСУ должен обеспечивать возможность анализа полученных данных об этих объектах, обеспечивать их воспроизводимость и позволять проводить сравнение с данными об одноименных объектах полученных от других видеосистем. Для этого необходимо провести калибровку МСУ.

Калибровка видеосистемы проходит в два этапа:

1. Энергетическая градуировка выбранной группы элементов линейного детектора по чувствительности.
2. Пространственная взаимная калибровка, устанавливающая соответствие свет-сигнальных характеристик всех элементов линейного детектора. Измерения проводятся на диффузном излучателе, который создает равномерную яркость по всему полю зрения прибора. Результатом измерений является получение корректирующих коэффициентов для каждого элемента линейного детектора.

Энергетическая градуировка, в свою очередь тоже проходит в два этапа:

3. Измерение относительной спектральной чувствительности элементов линейного детектора.
4. Измерение абсолютной чувствительности выбранной группы элементов на длине волны максимума чувствительности.

Поэтапная схема калибровки МСУ показана на рис. 1.

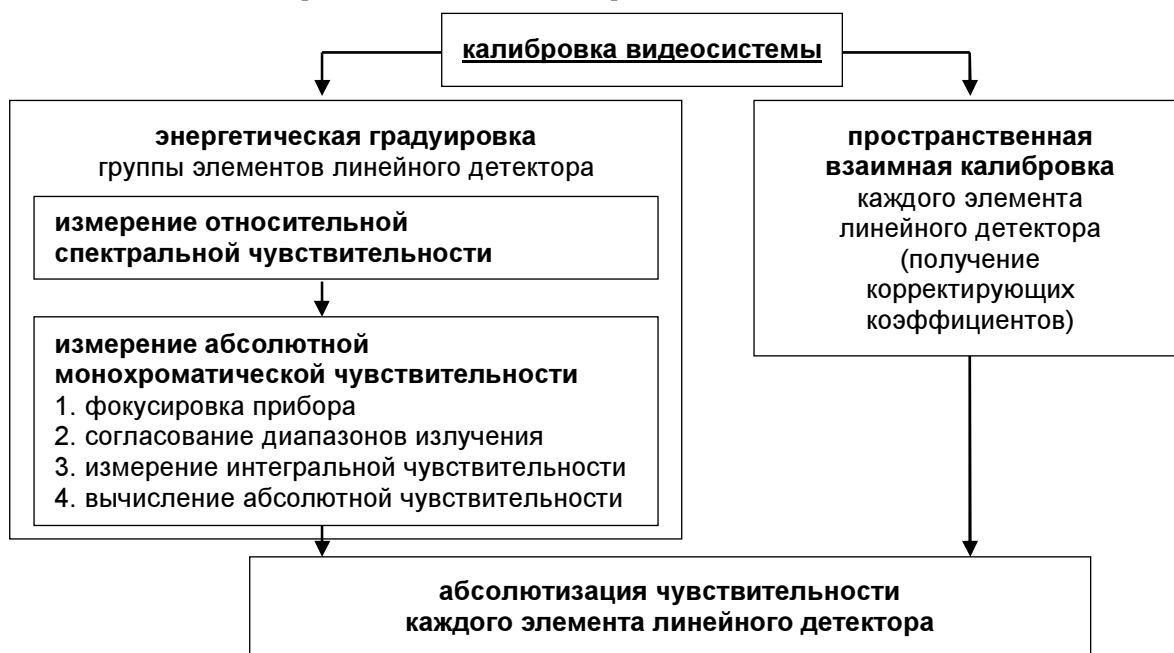


Рис. 1. Поэтапная схема калибровки прибора МСУ

Доклад более подробно рассматривает методику градуировки, и уделяет основное внимание измерению абсолютной чувствительности выбранной группы элементов линейного детектора.

В России с 1976 года, после появления ГОСТа 8.196-76, принято при градуировке пользоваться эталоном спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ), который хранится в ВНИИОФИ. Вскоре после появления государственного специального эталона СПЭЯ специалистами ВНИИОФИ была разработана методика энергетической градуировки съемочных систем [1]. Рассмотрим кратко предложенную методику.

Для измерения относительной спектральной чувствительности применяется схема, приведенная на рис. 2.

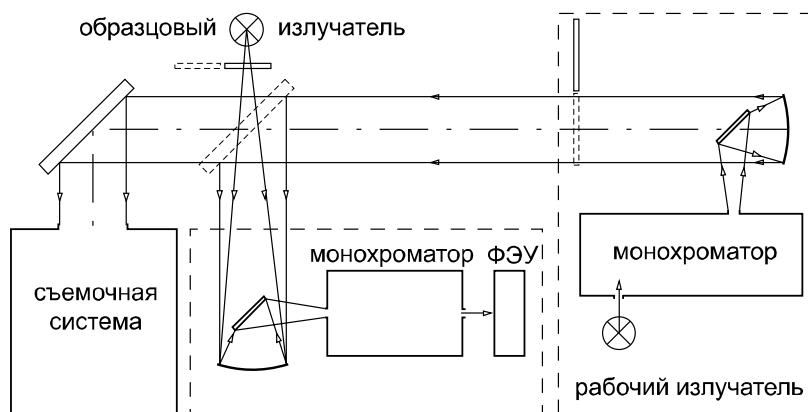


Рис. 2. Схема измерения относительной спектральной чувствительности

В качестве рабочего излучателя используется источник монохроматического излучения, состоящий из монохроматора, высокостабильного источника сплошного спектра, перекрывающего спектральный диапазон чувствительности градуируемой съемочной системы (СС), и оптической системы, формирующей параллельный пучок. Относительная спектральная чувствительность канала СС определяется как отношение сигнала на выходе канала к спектральной яркости рабочего монохроматического излучателя. При этом спектральная яркость монохроматического излучателя определяется путем сравнения с яркостью образцовой лампы, при помощи второго монохроматора и блока фотоприемников. В качестве образцового излучателя используется высокостабильная лампа ленточного типа, тело накаливания которой представляет собой вольфрамовую ленту.

Для измерения абсолютной монохроматической чувствительности используется схема, приведенная на рис. 3:

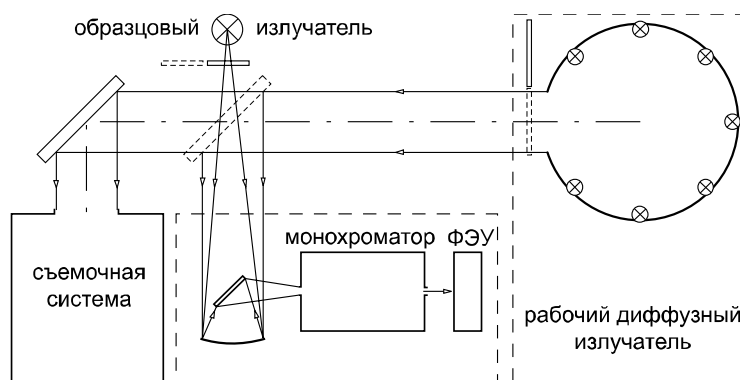


Рис. 3. Схема измерения абсолютной монохроматической чувствительности

Абсолютная чувствительность СС определяется, как чувствительность к СПЭЯ рабочего излучателя на длине волны максимума чувствительности. В качестве рабочего излучателя применяется фотометрический (диффузный) шар. Величина СПЭЯ диффузного излучателя измеряется

путем сравнения со спектральной яркостью образцовой лампы, при помощи второго монохроматора и блока фотоприемников.

Рассмотренная схема достаточно универсальна, как в отношении типов градуируемых радиометров-яркометров, так и в части используемых рабочих излучателей и фотоприемников, для которых не требуется ни градуировка, ни длительная стабильность. Основные источники ошибок в этой схеме - погрешности связанные с передачей единицы СПЭЯ от образцовой лампы рабочим средствам, а затем от них к градуируемому радиометру. Схема по габаритам требует рабочего пространства не менее 6x4 метра, достаточно трудоемка в настройке, юстировке и поддержании постоянной работоспособности.

Как правило, для различных задач эту классическую схему можно разбить на составляющие и, при обеспечении долговременной стабильности основных элементов, упростить методику. Так, при наличии градуированного высокостабильного по спектру фотоприемника соответствующей точности, схема измерения относительной спектральной чувствительности МСУ вырождается в один монохроматор, стабильный источник излучения и эталонированный стабильный фотоприемник (см. рис. 4).

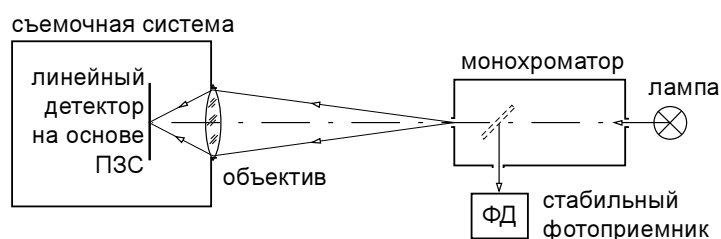


Рис. 4. Схема измерения относительной спектральной чувствительности канала МСУ

С помощью объектива МСУ, пучок лучей с выходной щели монохроматора фокусируется на несколько элементов одного из линейных детекторов. На каждой длине волны сигнал от этих элементов, после статистической обработки, нормируется в соответствии с опорным сигналом от высокостабильного фотодетектора с известной спектральной характеристикой и затем регистрируется. Предполагается равная для всех элементов линейки ПЗС относительная спектральная чувствительность.

Методика измерения абсолютной чувствительности МСУ была модифицирована таким образом, чтобы исключить диффузный излучатель из схемы абсолютизации спектральных измерений. Процесс измерения абсолютной чувствительности спектральных каналов МСУ можно разделить на следующие технологические операции :

Фокусировка изображения ленты образцового излучателя на линейку МСУ.

1. Согласование диапазонов излучения образцовой лампы и чувствительности канала.
2. Измерение интегральной чувствительности выбранной группы элементов к излучению образцовой лампы.

3. Вычисление максимальной абсолютной чувствительности.

1. Фокусировка изображения ленты на линейку МСУ. Образцовая лампа внутри стеклянной колбы имеет специальную метку-индекс в виде приваренного кусочка проволоки, который указывает, в каком месте излучающей ленты находится эталонный участок (см. рис. 5). Именно этот участок ленты нужно сфокусировать на линейный детектор МСУ.

Так как МСУ предназначено для съемок из космоса, его оптическая система фокусируется на бесконечность. Для того, чтобы перефокусировать МСУ на расстояние порядка 1-2 метров, между объективом и корпусом прибора вставляется технологическое кольцо соответствующей толщины. Процесс точной фокусировки производится вручную, путем перемещения прибора вдоль оптической оси и контролируется визуально по изображениям профиля сигнала на экране компьютера. Качество фокусировки характеризует крутизна фронтов профиля сигнала (см. рис. 6). После проведения измерений, технологические кольца снимаются и прибор окончательно собирается для выходного контроля и приемо-сдаточных испытаний.



Рис. 5. Изображение ленты образцового излучателя



Рис. 6. Профиль яркости ленты (сечение А-А) образцовый лампы

2. Необходимость согласования диапазонов излучения образцовой лампы и спектральных каналов МСУ является следствием того, что в рабочем диапазоне токов лампа излучает слишком много энергии, что приводит к пересветке и соответственно насыщению элементов линейного детектора ПЗС. Уменьшить поток излучения можно, как минимум, двумя способами:

- а) уменьшить ток через образцовый излучатель,
- б) поставить на пути лучей ослабляющий фильтр, например из цветного стекла.

Первый способ подразумевает обязательную поверку лампы в ВНИИОФИ в нужном токовом режиме и получение свидетельства. Второй способ подразумевает самостоятельное измерение абсолютной спектральной характеристики пропускания фильтра.

И первый, и второй способы несут в себе дополнительные ошибки. В первом случае лампа работает в нестандартном режиме при низких токах, при этом увеличивается неравномерность яркости ленты лампы и снижается отношение сигнал-шум при эталонировании, поэтому сертификат соответствия единице СПЭЯ на нее выдается с меньшей точностью, нежели для режима рабочих токов. При использовании второго способа, ошибку увеличивает погрешность измерения спектральной характеристики фильтра, а также неравномерность параметров фильтра по площади и их зависимость от температуры. Однако, все эти проблемы существуют практически для любого измерительного процесса. При градуировке МСУ используется разумное сочетание обоих способов ослабления излучения.

3. Интегральная чувствительность измеряется по схеме, приведенной на рис. 7.

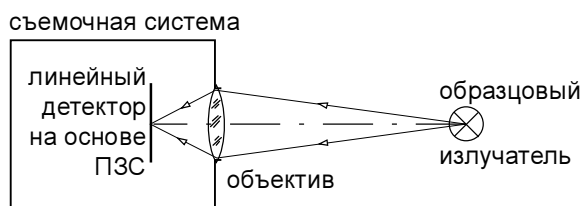


Рис. 7. Схема измерения интегральной чувствительности канала МСУ

Лента образцового излучателя фокусируется на один из линейных детекторов МСУ. От группы элементов линейного детектора, на которые проецировался эталонный участок ленты, регистрируется выходной сигнал. Величина сигнала усредняется по выбранной группе элементов и вычисляется интегральная чувствительность $S_{\text{инт}}$ этих элементов в рабочей спектральной полосе МСУ к яркости образцового излучателя, которая известна.

4. Вычисление максимальной абсолютной чувствительности. При съемке ленты образцового излучателя, на выходе получается интегральная чувствительность группы элементов линейного детектора МСУ к яркости образцового излучателя. Для того чтобы, получить абсолютную макси-

мальную чувствительность на соответствующей длине волны, используется следующая формула:

$$S_{абс}(\lambda_m) = \frac{S_{инт}}{K_{исп}}, \text{ где}$$

$S_{абс}(\lambda_m)$ – максимальное значение абсолютной характеристики чувствительности; приемника на длине волны λ_m ;

$$S_{инт} = \frac{U \cdot K_{бк}}{\int_0^{\infty} R(\lambda) \cdot d\lambda} \text{ – интегральная чувствительность приемника;}$$

U – значение сигнала МСУ от элементов эталонного участка образцовой лампы;

$$K_{бк} = \left(\frac{A + F}{F} \right)^2 \text{ – коэффициент приведения сигнала к фокальной плоскости, где}$$

A – толщина технологического кольца;

F – фокусное расстояние объектива МСУ

$$K_{исп} = \frac{\int_0^{\infty} s(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} R(\lambda) \cdot d\lambda} \text{ – коэффициент использования потока источника приёмником с относительной спектральной характеристикой } s(\lambda);$$

$s(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность приемника;

$R(\lambda)$ – спектральная характеристика излучения источника (из свидетельства на образцовую лампу).

В отделе была проведена градуировка нескольких приборов МСУ. На рисунке 8 изображены абсолютные спектральные характеристики трех каналов прибора МСУ-100. Величина по оси ординат представлена в единицах младшего разряда на Вт на квадратный метр на стер. По оси абсцисс – длина волны в нм. Дискретность длины волны 2 нм.

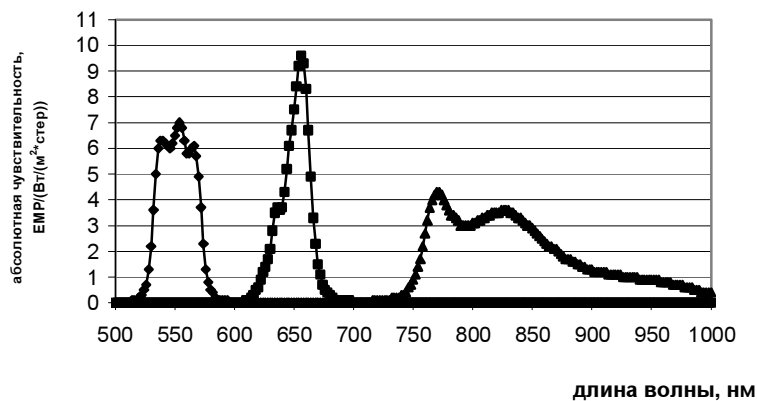


Рис. 8. Абсолютная спектральная чувствительность прибора МСУ-100

Экспериментальная среднеквадратическая погрешность передачи единицы СПЭЯ непосредственно от образцовой лампы к МСУ не превышает 3%. Предложенная методика энергетической градуировки увеличивает точность при одновременном упрощении схемы и процесса измерений.

Литература

1. Богданов А.А., Ковальский В.Я., Самойлов Л.Н., Саприцкий В.И., Сычев А.Г., Тарнопольский В.И. Энергетическая градуировка съемочных систем, используемых в дистанционных исследованиях Земли // Сборник статей "Многозональные аэрокосмические съемки Земли". М.: Наука, 1981. С. 93–99.