

Рис. 5. Главное окно СПО АПК КМСС

Выводы

В настоящее время созданный аппаратно-программный комплекс позволяет решать широкий спектр задач по наземной обработке приборов дистанционного зондирования Земли авиационного и космического применения.

Литература

1. *Аванесов Г.А., Зиман Я.Л., Куделин М.И.* и др. Комплекс многозональной съемочной аппаратуры, разрабатываемый для КА «Метеор-М» // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса: Тез. докл. 3-й Всерос. открытой конф. Москва, ИКИ РАН, 14–17 нояб. 2005. М.: ИКИ РАН, 2005. С. 72.
2. *Жуков Б.С., Василейский А.С., Железнов М.М., Жуков С.Б., Бекренев О.В., Пермитина Л.И.* Задачи обработки многозональных видеоданных КМСС на КА «Метеор-М» // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса: Тез. докл. 3-й Всерос. открытой конф. Москва, ИКИ РАН, 14–17 нояб. 2005. М.: ИКИ РАН, 2005. С. 222.

РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ ГРАДУИРОВКА КОМПЛЕКСА МНОГОЗОНАЛЬНОЙ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ

В.А. Ваваев, М.В. Ваваев, И.В. Полянский

Институт космических исследований
Российской академии наук, Москва

Рассмотрены измерительные свойства многоспектральных съемочных устройств МСУ-100 и МСУ-50, входящих в комплекс многозональной спутниковой съемки (КМСС). Описана технологическая последовательность радиометрической градуировки спектральной чувствительности каналов МСУ по эталону спектральной плотности энергетической яркости. Приведены результаты радиометрической градуировки штатных образцов и оценена их точность.

Measuring features of the MSU-100 and MSU-50 multispectral imaging cameras of the Satellite Multispectral Imaging System (KMSS) are considered. A processing sequence of the MSU spectral sensitivity radiometric calibration by the spectral radiance reference gage is described. Results of the flight models radiometric calibration are presented together with their accuracy estimates.

В отделе оптико-физических исследований ИКИ РАН ведутся работы по созданию многозональных съемочных устройств (МСУ), предназначенных для установки на околоземные космические аппараты с круговыми орбитами. На сегодня разработан и установлен на борту метеорологического спутника серии «Метеор-М» комплекс многозональной спутниковой съемки (КМСС). КМСС включает в себя два прибора МСУ-100 и один прибор МСУ-50, которые различаются по пространственному разрешению и спектральным диапазонам чувствительности.

На рис. 1 изображена упрощенная схема видеотракта МСУ. Входное излучение собирается объективом, в фокальной плоскости которого установлены три линейки на основе прибора с зарядовой связью (ПЗС). На входном окне каждой линейки ПЗС закреплен полосовой оптический фильтр, вырезающий соответствующий спектральный диапазон, заданный техническими требованиями. Электрический сигнал с выхода ПЗС каждого спектрального канала усиливается (с коэффициентом усиления K_u) и преобразуется в

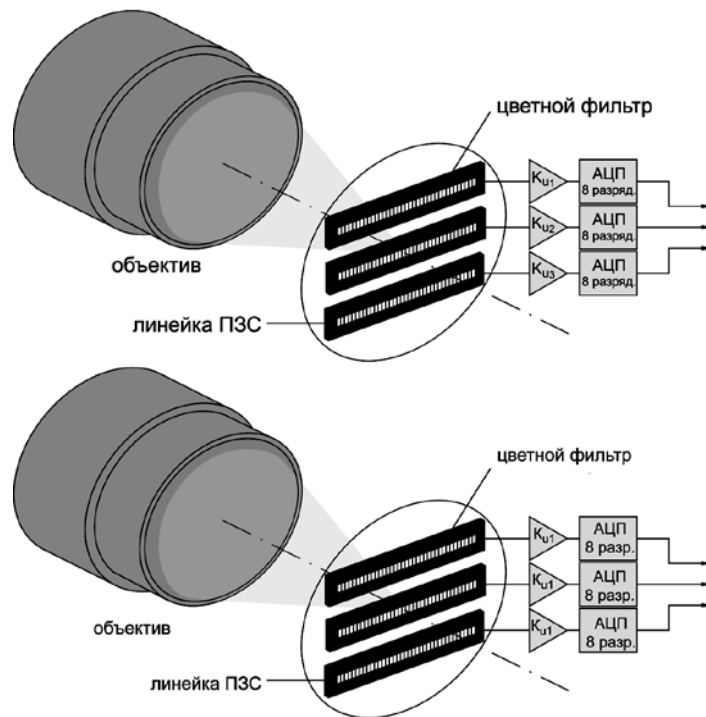


Рис. 1. Блок-схема видеотракта МСУ

восьмиразрядный цифровой код. Выбор возможных спектральных зон зависит от спектральной чувствительности линейки ПЗС, которая ограничивается общим диапазоном 360...1000 нм. Камера МСУ устанавливается на космическом аппарате таким образом, чтобы при его движении по орбите линейки ПЗС сканировали поле зрения объектива поперек направления движения.

Из схемы видеотракта (рис. 1) видно, что МСУ является классической съемочной камерой, в которой выходной сигнал элемента ПЗС зависит от яркости наблюдаемого объекта поверхности и не зависит ни от расстояния до объекта, ни от его площади (при условии, что площадь изображения объекта больше площади элемента ПЗС). Каждый канал МСУ обладает конкретными значениями эффективного от-

носительного отверстия объектива, общего спектрального пропускания оптики и чувствительности элементов линейки ПЗС, которые влияют на общую чувствительность камеры к входной яркости. Для учета указанных конструктивных и технологических особенностей видеотракта предусмотрена процедура градуировки. После проведения процедуры градуировки камера приобретает радиометрические свойства, обеспечивающие возможность сравнительного и комплексного анализа участков поверхности Земли, измеряемых одновременно (или последовательно) различной бортовой аппаратурой данного космического аппарата «Метеор-М», а в дальнейшем и других, аналогичных космических аппаратов. Это первая главная цель радиометрической градуировки.

Кроме этого, результаты наземной предполетной градуировки и калибровки (о калибровке смотри ниже) используются для выполнения операции коррекции видеоданных, получаемых с орбиты при эксплуатации комплекса КМСС. Коррекция данных предусматривает программную компенсацию систематических погрешностей, которые не могут быть исключены аппаратным путем.

Процедура градуировки всех трех каналов МСУ устанавливает однозначное соответствие между выходным сигналом в виде восьмиразрядного кода и измеряемой монохроматической яркостью для каждого мгновенного поля зрения элемента ПЗС. Результат градуировки выражается через таблицу абсолютной спектральной чувствительности канала МСУ к стандартной единице монохроматической яркости. В нашем случае, для градуировки абсолютной шкалы чувствительности МСУ используется эталон единицы спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ)*, эта единица измеряется в $[Вт/м^3 \cdot ср]$. Линейка ПЗС каждого канала МСУ имеет 8000 элементов, которые вырезают из поля зрения объектива свое элементарное поле зрения. Так как элементарные поля зрения имеют различные характеристики чувствительности, то градуировочная таблица должна быть выполнена для каждого элементарного поля зрения.

* Эталон единицы СПЭЯ хранится во Всероссийском научно-исследовательском институте оптико-физических измерений (ВНИИОФИ).

Эта особенность градуировки характерна для современных многоэлементных фотоприемников на основе ПЗС, у которых число элементов непрерывно увеличивается, а размер элемента при этом уменьшается. Прямые сравнения элементов фотоприемника с эталоном становятся практически нереальными. Для видеотракта, у которого характеристика свет-сигнал линейна в рабочем диапазоне, а относительная спектральная характеристика чувствительности неизменна для всех элементов, проблема (при любом количестве элементов фотоприемника) решается следующим образом.

Градуировка чувствительности линейного или матричного фотоприемника выполняется для одного базового участка, специально выбранного по координатам и размерам. Все остальные элементы градуируемого канала привязываются к эталону через результаты относительной калибровки прибора. Калибровка является нормировочной процедурой, в процессе которой производятся относительные сравнения значения параметра текущего элемента фотоприемника со значением параметра базового элемента (или группы элементов). По результатам калибровки рассчитывается набор безразмерных коэффициентов. Например, в нашей схеме в качестве базового участка для градуировки используется среднее значение по 5...10 элементам с известными координатами в центральной зоне линейки ПЗС. Подробно процедура калибровки рассматривается в статье* настоящего сборника (с. 562).

Нелинейность характеристики свет-сигнал увеличивает погрешность градуировки и последующей коррекции данных (особенно в нижней части шкалы). Поэтому при градуировке выбирается строго линейный участок динамического диапазона, где нелинейность имеет порядок случайных шумов. В силу специфики работы ПЗС и его усилительного тракта, как правило, нелинейность характеристики свет-сигнал наблюдается в верхней части динамического диапазона электрического сигнала (при насыщении потенциальной ямы элемента ПЗС) в режиме минимального усиления.

* Василейский А.С., Жуков В.С., Жуков С.В., Куркина А.Н., Полянский И.В. Относительная радиометрическая калибровка комплекса многозональной спутниковой съемки.

Оптимальный выбор коэффициента усиления видеотракта позволяет минимизировать ошибки за счет нелинейности передаточной характеристики свет-сигнал при сохранении достаточного отношения сигнал/шум. Если обеспечить необходимую линейность передаточной характеристики невозможно аппаратным путем, то производится измерение нелинейности с целью последующего ее учета в процедурах калибровки прибора, а затем и коррекции полученных изображений.

Собственно процедура градуировки разделяется на два этапа:

- измерение относительной спектральной чувствительности базового участка линейки ПЗС каждого канала;
- абсолютизация относительной спектральной чувствительности (базового участка линейки ПЗС каждого канала) на длине волны с максимальной чувствительностью к монохроматическому излучению.

Абсолютная спектральная характеристика чувствительности элемента поля зрения — это функциональная зависимость монохроматической чувствительности этого элемента поля зрения от длины волны входного монохроматического излучения.

Монохроматическая чувствительность — отношение приращения выходного кода к вызвавшему его приращению монохроматического входного светового сигнала. Входной сигнал для МСУ представляет собой монохроматическую яркость (или лучистость) в данной спектральной точке диапазона электромагнитного излучения. Единица измерения яркости — $[Вт/(м^2 \cdot ср)]$.

Относительная спектральная характеристика чувствительности элемента поля зрения — это спектральная характеристика элемента, нормированная к своему максимальному значению на соответствующей длине волны.

В реальности МСУ, как радиометр, реагирует на интегральную яркость в диапазоне спектральной чувствительности каждого канала.

Блок-схема измерения относительной спектральной характеристики чувствительности МСУ приведена на рис. 2.

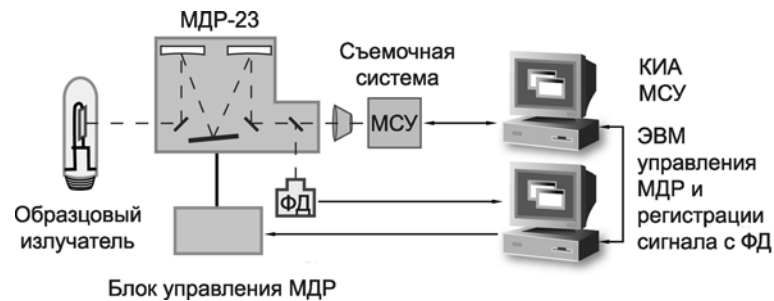


Рис. 2. Блок-схема измерения относительной спектральной характеристики чувствительности МСУ

Прибор МСУ (объектив отделен от камеры для получения возможности фокусировки) устанавливается за монохроматором и включается в непрерывный режим работы. Параллельно работает опорный канал на измерительном фотодиоде (ФД) с известной спектральной характеристикой чувствительности $S_d(\lambda)$. Как видно из схемы, персональный компьютер управляет монохроматором МДР-23, и измерения по программе проходят весь спектральный диапазон с заданной дискретностью (обычно это 5 или 2 нм). Каждая точка спектральной характеристики вычисляется по формуле:

$$S(\lambda) = U_{\text{МСУ}}(\lambda) \frac{S_d(\lambda)}{U_d(\lambda)},$$

$$s(\lambda) = \frac{S(\lambda)}{S(\lambda_m)},$$

где $S(\lambda)$ — промежуточная ненормированная характеристика; $s(\lambda)$ — относительная спектральная характеристика канала МСУ; $U_{\text{МСУ}}(\lambda)$ — выходной код МСУ; $S_d(\lambda)$ — спектральная характеристика чувствительности измерительного фотодиода; $U_d(\lambda)$ — выходной код измерительного фотодиода.

При каждом значении длины волны монохроматического излучения программа обрабатывает данные столько измерений, сколько требуется для уменьшения случайной составляющей и приближения к фотонному шуму. Обычно это ми-

нимум 100 измерений на каждом шаге. Время прохода одного канала в этой автоматизированной схеме составляет ~1 ч.

Как правило, для абсолютизации чувствительности съемочных систем применяется диффузный излучатель (типа шара Ульбрихта) с известной абсолютной СПЭЯ [1]. Диффузный излучатель градуируется по своей достаточно сложной схеме переноса СПЭЯ от образцовой лампы к шару, при этом добавляется погрешность 5...8%. Методика, применяемая для градуировки камер МСУ, была модифицирована таким образом, чтобы исключить диффузный излучатель из схемы абсолютизации спектральных измерений. В рассматриваемой далее схеме МСУ получает единицу СПЭЯ непосредственно от образцовой лампы.

Блок-схема абсолютизации относительной спектральной чувствительности приведена на рис. 3. Особенностью второго этапа является необходимость фокусировки эталонной площадки ленты образцовой лампы на базовый участок линейки ПЗС, т. е. должны регистрироваться сигналы именно от того участка ленты, который паспорттировался в ВНИИОФИ. Рассмотрим эту проблему немного подробнее.

Линейка ПЗС камеры МСУ, с размером элемента 7×7 мкм, регистрирует соответствующую полосу изображения. На рис. 4 приведено изображение ленты образцовой лампы, снятое матричной камерой (проекция линейки показана с увеличением в 25 раз). Анализ поля свечения ленты лампы показывает, что оно имеет существенную неоднородность, связанную с неравномерным нагревом и теплоотводом, а также различным коэффициентом серости светящейся

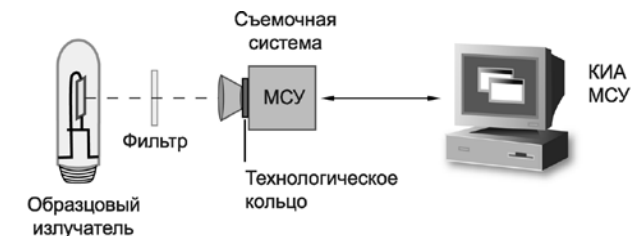


Рис. 3. Блок-схема абсолютизации монохроматической чувствительности МСУ

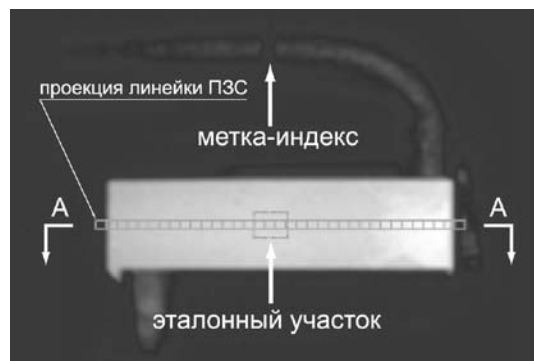


Рис. 4. Изображение ленты измерительной лампы

поверхности вольфрама. При этом общая неоднородность яркости ленты может достигать 50 %. Система зрения камеры МСУ реализует координатную привязку эталонного участка ленты в районе индекса (на рис. 4 — это прямоугольный участок в центре ленты) с погрешностью не более элемента, что на порядок точнее допуска при градуировке образцовой лампы от эталона СПЭЯ в ВНИИОФИ.

Процесс абсолютизации можно разделить на следующие технологические операции:

- фокусировка изображения ленты на линейку МСУ;
- согласование диапазонов излучения образцовой лампы и чувствительности канала;
- съемка и вычисление максимальной абсолютной чувствительности.

Рассмотрим каждую операцию более подробно.

1. Так как МСУ предназначено для съемок из космоса, его оптическая система фокусируется на бесконечность. Для того чтобы перефокусировать МСУ на расстояние порядка 1...2 м, между объективом и корпусом прибора вставляется технологическое кольцо соответствующей толщины. Процесс точной фокусировки МСУ на эталонный участок ленты производится вручную путем перемещения прибора вдоль оптической оси и контролируется визуально по изображениям профиля сигнала на экране компьютера.

2. Образцовая лампа излучает слишком много энергии в стандартном режиме тока накала, что приводит к насыщению элементов линейного детектора ПЗС. Уменьшить поток излучения можно, как минимум, двумя способами:

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

Первый способ предполагает обязательную поверку лампы во ВНИИОФИ в нужном токовом режиме и получение сертификата соответствия единице СПЭЯ (свидетельства). Второй способ подразумевает самостоятельное измерение абсолютной спектральной характеристики пропускания фильтра.

И первый, и второй способы имеют дополнительные погрешности. В первом случае лампа работает в нестандартном режиме при низких токах накала, при этом увеличивается неравномерность яркости ленты лампы и снижается отношение сигнал/шум при эталонировании. Поэтому свидетельство на лампу выдается с меньшей точностью, чем для лампы в стандартном режиме тока накала. При использовании второго способа ошибку увеличивает собственно погрешность измерения спектральной характеристики фильтра, а также неравномерность параметров фильтра по площади и зависимость этих параметров от температуры. Однако, как известно, практически в любом измерительном процессе возникают подобные проблемы. При градуировке МСУ используется разумное сочетание обоих способов ослабления излучения.

3. Производится непрерывная съемка ленты эталонной лампы с достаточной статистикой. Выделяется сигнал от элементов линейного детектора, на которые проецировался эталонный участок ленты образцового излучателя. Величина сигнала усредняется по времени и по элементам эталонного участка ленты (как правило, напротив метки-индекса), затем вычисляется максимальное значение абсолютной спектральной характеристики чувствительности МСУ на длине волны λ_m через интегральную чувствительность $S_{\text{инт}}$ этого участка к образцовому излучателю. Для того чтобы получить абсолютную максимальную чувствительность, используются следующие формулы [2]:

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

где $S_{\text{инт}} = \frac{UK_{\text{тк}}}{\int_0^{\infty} R(\lambda) d\lambda}$ — интегральная чувствительность МСУ

к образцовому излучателю; $K_{\text{тк}} = \left(\frac{A+F}{F}\right)^2$ — коэффициент

приведения сигнала к фокальной плоскости (где A — толщина технологического кольца; F — фокусное расстояние

объектива МСУ); $K_{\text{исп}} = \frac{\int_0^{\infty} s(\lambda)R(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} R(\lambda) d\lambda}$ — коэффициент ис-

пользования потока источника приёмником с относительной спектральной характеристикой $s(\lambda)$; U — значение сигнала МСУ от элементов эталонного участка образцовой лампы; $S_{\text{абс}}(\lambda_m)$ — максимальное значение абсолютной спектральной характеристики чувствительности МСУ на длине волны λ_m ; $s(\lambda)$ — относительная спектральная чувствительность приемника; $R(\lambda)$ — спектральная плотность энергетической яркости источника (СПЭЯ из свидетельства на образцовую лампу).

После подстановки и упрощения получаем

$$S_{\text{абс}}(\lambda_m) = \frac{UK_{\text{тк}}}{\int_0^{\infty} s(\lambda)R(\lambda) d\lambda}.$$

Результаты градуировки в виде графиков абсолютной спектральной характеристики чувствительности приведены для МСУ-50 на рис. 5 и МСУ-100 на рис. 6 (три канала изображены для наглядности на одном графике).

Кроме комплекса КМСС, на платформе космического аппарата «Метеор-М» установлен сканирующий радиометр МСУ-МР видимого и инфракрасного диапазона, разработанный в РНИИ КП. В процессе эксплуатации эти устрой-

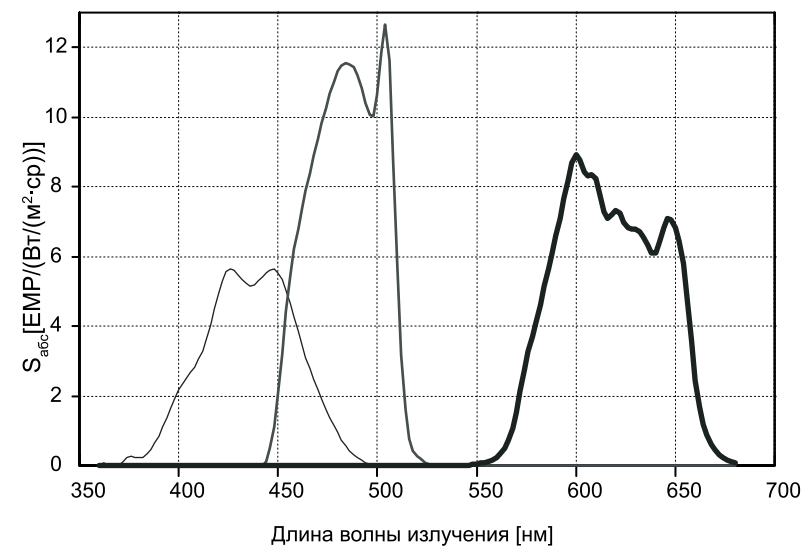


Рис. 5. Абсолютная спектральная чувствительность МСУ50

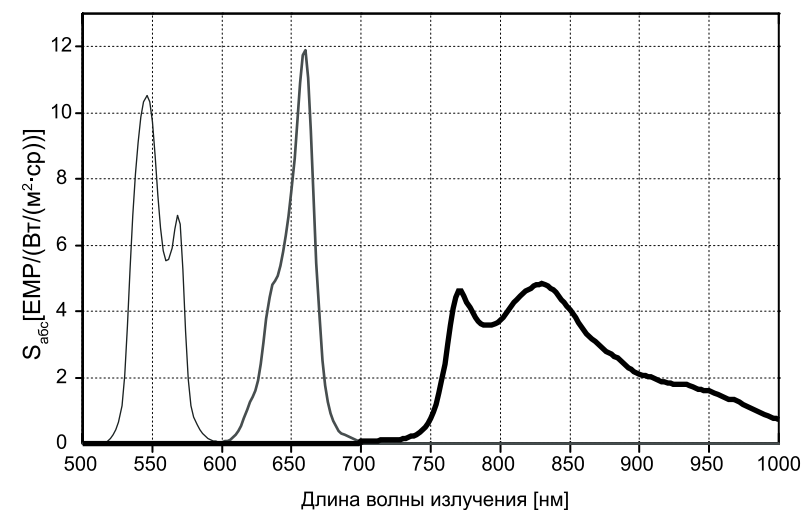


Рис. 6. Абсолютная спектральная чувствительность МСУ100

ства сканируют одноименные участки земной поверхности, но с различным пространственным разрешением. С целью взаимной привязки шкалы спектральной чувствительности приборов КМСС и МСУ-МР проведен этап градуировки приборов КМСС в части абсолютизации спектральной чувствительности. При этом в качестве эталона используется диффузный излучатель из состава радиометрического стенда «Камелия» РНИИ КП.

На рис. 7 показаны две схемы передачи эталона единицы СПЭЯ на МСУ. Для двух схем радиометрической градуировки можно вычислить дисперсии разности полученных единиц СПЭЯ для девяти различных каналов МСУ. Так как все измерения в указанных схемах — независимые, то, полагая ошибки в результатах измерений случайными, сумма дисперсий передачи эталона на МСУ в двух схемах должна быть равна дисперсии полученных разностей. Значение среднеквадратического отклонения полученных разностей по всем 9 каналам составляет 13,7 %. Тогда из равенства дисперсий следует, что перенос эталона единицы СПЭЯ на канал МСУ осуществляется со среднеквадратической погрешностью 8,6 %. Конечно, это — только оценка погрешности, так как,

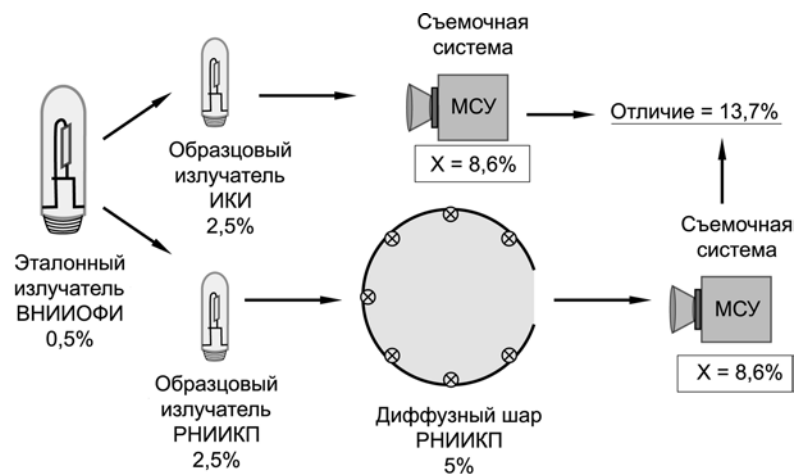


Рис. 7. Две схемы передачи эталона единицы СПЭЯ на МСУ

кроме случайных ошибок, в измерениях присутствуют и систематические ошибки, а статистика из девяти реализаций не является достаточно надежной.

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 // Многозональные аэрокосмич. съемки Земли: Сб. ст. М.: Наука, 1981. С. 93–99.
2. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Сов. радио, 1978. С. 234–235.