

**ПЕРЕДАЧА И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ**

УДК 004.932.2

**В.В. Еремеев, В.А. Зенин****МОДЕЛИ КОРРЕКЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ СТРУКТУРНЫХ ИСКАЖЕНИЙ НА КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ**

*Рассмотрены модели описания и коррекции на космических изображениях земной поверхности структурных искажений, обусловленных изменением во времени чувствительностей фотоприемных элементов видеодатчиков. В основу коррекции подобных искажений положено сопоставление характеристик корректируемой строки изображения и окружающей ее апертуры. Проведен анализ точности для различных моделей коррекции структурного шума. Выполнены экспериментальные исследования предложенных алгоритмов с использованием реальных изображений.*

**Ключевые слова:** *времязависимый структурный шум, коррекция, чувствительность, методическая ошибка.*

**Введение.** В практике дистанционного зондирования Земли широкое применение нашли сканирующие устройства, построенные на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС). Несмотря на высокие технические характеристики таких приборов, им присущ серьезный недостаток. Из-за различий передаточных характеристик (чувствительностей и темновых сигналов) отдельных фотоприемников видеодатчика на изображении появляются искажения в виде характерной «полосатости».

Для изображений, сформированных ПЗС-линейками или ПЗС-матрицами, адекватной считается константная линейная модель искажений, предполагающая неизменность на протяжении сеанса съемки чувствительностей и темновых сигналов фотоприемных элементов датчика. На основе этого предположения построены различные алгоритмы статистической коррекции структурных искажений [1,2,3].

Однако экспериментально установлено, что фотоприемные элементы по аналогии с человеческим зрением при переходе от светлых объектов к темным изменяют свою чувствительность. Сигнал от поверхности Земли представляет собой случайное поле, аналитически описать которое практически невозможно. Поэтому предлагаются статистические модели структурных искажений и алгоритмы их коррекции, которые учитывают изменение

чувствительностей фотоприемных элементов во времени. Будем рассматривать изображения с размером раstra  $N$  строк и  $M$  столбцов, сформированные одноэлементным сканирующим устройством. Полученные результаты легко распространяются на случай многоэлементных видеодатчиков. Через  $B_{mn}$  обозначим яркость пикселя на пересечении строки с номером  $n = \overline{1, N}$  и столбца с номером  $m = \overline{1, M}$ .

Целью данной работы являются разработка моделей времязависимых структурных помех, анализ их точности и условий применения, а также алгоритмов коррекции подобного рода искажений.

**Времязависимая полиномиальная модель.** Будем считать, что в пределах строки изображения изменение чувствительности датчика носит мультипликативный характер и может быть представлено полиномом:

$$P_n(m) = \alpha_{0n} + \alpha_{1n}m + \alpha_{2n}m^2 + \dots \quad (1)$$

Коэффициенты полинома (1) можно отыскать, минимизируя различия между корректируемой строкой и окружающей ее симметричной апертурой из  $(2a+1)$  строк, принимаемой за эталон:

$$R_n = \sum_{m=1}^M \sum_{i=-a}^a [B_{mn}P_n(m) - B_{m,n+i}]^2 = \min \quad (2)$$

Коэффициенты полинома находятся из системы

$$\sum_{m=1}^M \sum_{i=-a}^a [B_{mn} P_n(m) - B_{m,n+i}] B_{mn} m^j = 0, \quad j = \overline{0, J},$$

где  $J$  - степень полинома.

Эта система приводится к линейной относительно  $\alpha_{jn}$ ,  $j = \overline{0, J}$ :

$$\begin{aligned} \alpha_{0n} \sum_{m=1}^M B_{mn}^2 m^j + \alpha_{1n} \sum_{m=1}^M B_{mn}^2 m^{j+1} + \alpha_{2n} \sum_{m=1}^M B_{mn}^2 m^{j+2} + \dots = \\ = \frac{1}{2a+1} \sum_{m=1}^M \left( B_{mn} m^j \sum_{i=-a}^a B_{m,n+i} \right), \quad j = \overline{0, J}. \end{aligned}$$

Мультипликативная модель, хотя и является адекватным описанием времязависимых структурных искажений, но при значительном уровне видеосигнала приводит к значительным ошибкам. Это связано с тем, что малые ошибки в определении коэффициентов полинома приводят к значительным ошибкам коррекции видеоданных.

Рассмотрим менее чувствительную к погрешностям аддитивную полиномиальную модель, основываясь на том факте, что мультипликативные изменения сигнала могут быть скомпенсированы аддитивными добавками в виде соответствующего полинома. В этом случае по аналогии с (2) запишем:

$$R_n = \sum_{m=1}^M \sum_{i=-a}^a [B_{mn} + P_n(m) - B_{m,n+i}]^2 = \min, \quad (3)$$

откуда следует система линейных уравнений для определения коэффициентов полинома:

$$\begin{aligned} \alpha_{0n} \sum_{m=1}^M m^j + \alpha_{1n} \sum_{m=1}^M m^{j+1} + \alpha_{2n} \sum_{m=1}^M m^{j+2} + \dots = \\ = \frac{1}{2a+1} \sum_{m=1}^M \left[ m^j \sum_{i=-a}^a B_{m,n+i} \right] - \sum_{m=1}^M m^j B_{mn}, \quad j = \overline{0, J}. \end{aligned}$$

Для оценки точности полиномиальной модели рассмотрим более общий случай аддитивно-мультипликативного описания структурных искажений с учетом шумовой компоненты:

$$\sum_{m=1}^M [(B_{nm} + \varepsilon_{nm}) K_n(m) + C_n(m) - B_{nm}^*]^2 = \min, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_{nm}$  - значение шума в  $m$ -м элементе  $n$ -й строки;  $K_n(m) = \sum_{i=0}^P p_i m^i$  - функция изменения чувствительности для  $n$ -й строки в виде полинома степени  $P$ ;

$C_n(m) = \sum_{j=0}^S s_j m^j$  - функция изменения темнового сигнала в виде полинома

степени  $S$ ;  $B_{nm}^*$  - эталонный сигнал, найденный по апертуре из  $(2a+1)$  строк, в которой  $n$ -я строка центральная.

Найдем коэффициенты полиномов  $K_n(m)$  и  $C_n(m)$  из условий:

$$\frac{\partial R_n}{\partial p_i} = 0, \quad \frac{\partial R_n}{\partial s_j} = 0, \quad i = \overline{0, P}, \quad j = \overline{0, S}. \quad (5)$$

Для нахождения коэффициентов полинома  $K_n(m)$  преобразуем первое уравнение из (5) с

учетом соотношений  $\sum_{m=1}^M B_{nm} \varepsilon_{nm} K_n(m) m^i = 0$ ,

$$\sum_{m=1}^M C_n(m) \varepsilon_{nm} m^i = 0, \quad \sum_{m=1}^M B_{nm} \varepsilon_{nm} m^i = 0, \quad i = \overline{0, P}.$$

В результате получим:

$$\sum_{m=1}^M [B_{nm}^2 K_n(m) + C_n(m) B_{nm} - B_{nm}^* B_{nm}] m^i + \Delta = 0,$$

где  $\Delta = \sum_{m=1}^M \varepsilon_{nm}^2 K_n(m) m^i$  - методическая ошибка,

обусловленная шумом  $\varepsilon_{nm}$  с дисперсией

$$D_\varepsilon = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \varepsilon_{nm}^2.$$

Влияние шума усиливается с повышением степени полинома  $K_n(m)$ , поскольку резко возрастает  $m^i$ , а  $K_n(m) \approx 1$ .

Шум не оказывает влияния на точность определения коэффициентов полинома  $C_n(m)$ . Это становится понятно, если преобразовать второе уравнение в (5) к виду:

$$\sum_{m=1}^M B_{nm} K_n(m) m^j + \sum_{m=1}^M C_n(m) m^j - \sum_{m=1}^M B_{nm}^* m^j = 0.$$

Полиномиальные модели с высокой точностью описывают изменение характеристик фотодатчика во времени, но имеют методическую ошибку, зависящую от интенсивности случайного шума и степени полинома. Последнее, в частности, обязывает ограничить степень полинома сверху, что приводит к погрешностям на динамичных сюжетах, требующих для своего описания функций с большим числом степеней свободы. В данном случае более высокое качество коррекции времязависимых искажений могут обеспечить кусочно-линейные модели.

**Кусочно-линейная мультипликативная модель.** На практике установлено, что рассматриваемые времязависимые искажения вызваны изменением чувствительности (коэффициента

усиления) фотодатчика. С учетом этого факта разумно описать коррекцию структурного шума в виде мультипликативного коэффициента  $k_{nm}$  для каждого пикселя изображения.

Рассмотрим на изображении скользящую прямоугольную апертуру, состоящую из  $(2a + 1)$  строк и  $(2b + 1)$  столбцов. При соответствующем выборе  $b$  можно считать, что чувствительность фотодатчика  $\alpha_q$  ( $q$  - номер строки) постоянна для каждой строки апертуры. Корректируемым является центральный пиксель апертуры с координатами  $(n, m)$  в системе координат изображения и  $(0, 0)$  в системе координат апертуры.

Поскольку фотоприемник при неизменном темновом сигнале  $c$  преобразует входной сигнал  $E_{qv}$  ( $v$  - номер столбца) в яркость:

$$B_{qv} = \alpha_q E_{qv} + c, \quad (6)$$

то

$$\mu_q = \frac{1}{2b} \sum_{v=-b}^{b-1} B_{qv} B_{q,v+1} - \frac{1}{4b^2} \sum_{v=-b}^{b-1} B_{qv} \sum_{v=-b}^{b-1} B_{q,v+1},$$

где  $\mu_q$  - автоковариационная функция (АКФ) яркостей пикселей изображения, связанная с АКФ входного сигнала  $\mu_q^*$ , как  $\mu_q = \alpha_q^2 \mu_q^*$ . Приняв в качестве эталонной АКФ

$\mu_0^* = \left( \frac{1}{2a+1} \sum_{q=-a}^a \sqrt{\mu_q} \right)^2$ , найдем корректирующий множитель для центрального пикселя апертуры:

$$k_{nm} = \frac{1}{\alpha_q} = \sum_{q=-a}^a \sqrt{\mu_q} / \left[ (2a+1) \sqrt{\mu_0} \right], \quad (7)$$

после чего скорректированное значение яркости  $B_{nm}^*$  вычисляется как

$$B_{nm}^* = \text{ent}(B_{nm} k_{nm} + 0,5). \quad (8)$$

Достоинством кусочно-линейной мультипликативной модели является нечувствительность к величине темнового сигнала  $c$ .

Визуально структурные искажения в виде «полосатости» снимка воспринимаются как неоднородности средней яркости, в то время как процедура (8) направлена на коррекцию СКО яркости в центральной строке по отношению к СКО яркости апертуры. Поэтому кусочно-мультипликативную модель можно модифицировать так, чтобы направить ее на коррекцию именно средней яркости.

С учетом (6)  $B_q = \alpha_q E_q + c$  - это средняя

яркость  $q$ -й строки апертуры ( $E_q$  - среднее значение входного сигнала). Тогда средняя яркость по всей апертуре  $\bar{B} = \frac{1}{2a+1} \sum_{q=-a}^a \alpha_q E_q + c$ .

Выравнивание средней яркости можно обеспечить мультипликативным коэффициентом:

$$k_{nm} = \frac{\bar{B}}{B_q} = \frac{\sum_{q=-a}^a \alpha_q E_q + c}{(2a+1)(\alpha_0 E_0 + c)}. \quad (9)$$

Подставив (6), записанное в системе координат изображения, в (8), получим:

$$B_{nm}^* = (\alpha_{nm} E_{nm} + c) k_{nm} = \alpha_{nm}^* E_{nm} + c^*. \quad (10)$$

Как видим, по (10) корректируется не только чувствительность  $\alpha_{nm}^* = k_{nm} \alpha_{nm}$ , но и темновой сигнал фотоприемника  $c^* = k_{nm} c$ . Но в силу того, что  $k_{nm} \approx 1$ , а  $c \ll B_q$ , методическая ошибка, связанная с изменением темнового сигнала, незначительна. Она может проявиться только при низких значениях яркости, когда  $c$  и  $B_q$  сопоставимы.

Для повышения устойчивости алгоритма коррекции целесообразно заменить в (9) вычисление средней яркости на вычисление медианного значения, так как медиана менее чувствительна к различного рода помехам и дает лучшие результаты при малых выборках сигнала.

Как отмечалось ранее, небольшие погрешности в определении мультипликативного коэффициента при значительном уровне сигнала могут приводить к снижению качества коррекции. В данном случае кусочно-линейная мультипликативная модель путем соответствующего выбора размеров апертуры может быть заменена кусочно-линейной аддитивной моделью, дающей более устойчивое по точности решение.

**Кусочно-линейная аддитивная модель.** Покажем, что мультипликативную модель в пределах апертуры можно заменить аддитивной. Пусть на вход фотоприемника с чувствительностью  $\alpha$  и темновым сигналом  $c$  поступает входной сигнал  $E$ . На выходе имеем  $B = \alpha E + c$ . После уточнения чувствительности  $\alpha \rightarrow \alpha^*$ ,  $B^* = \alpha^* E + c = (\alpha + \Delta\alpha) E + c = B + \Delta\alpha E$ . В первом приближении аддитивная модель коррекции может быть выполнена как  $B^* = B + \Delta\alpha \bar{E}$ , где  $\bar{E}$  - среднее значение входного сигнала. Такое приближение доста-

точно точно описывает искажения, поскольку изменения  $E$  в апертуре незначительны по отношению к флуктуациям  $\bar{E}$ , что практически всегда подтверждается.

Следовательно, искажения, вызванные изменением чувствительности  $\alpha$  вдоль строки, могут быть компенсированы с использованием кусочно-аддитивной модели коррекции. Для центральной (корректируемой) строки апертуры определим медианное значение яркости  $B_0 = \text{med}_{v \in [-b, b]} B_{0,v}$ , а для всей апертуры  $\bar{B} = \text{med}_{\substack{q \in [-a, a] \\ v \in [-b, b]}} B_{qv}$ . Корректирующая аддитивная

добавка для центрального пикселя апертуры может быть найдена как  $\Delta_{nm} = \bar{B} - B_0$ . После этого коррекция яркости выполняется как

$$B_{nm}^* = \text{ent}(B_{nm} + \Delta_{nm} + 0,5). \quad (11)$$

При резких перепадах яркости внутри апертуры статистические характеристики центральной строки могут значительно отличаться по отношению к аналогичным характеристикам апертуры. В этом случае необходима дополнительная фильтрация измерений  $\Delta_{nm}$  по множеству соседних положений апертуры. Экспериментально установлено, что хорошие результаты дает медианный фильтр, который заменяет значение  $\Delta_{nm}$ , найденное в конкретной апертуре, медианным значением  $\Delta_{nm}^*$  измерений, найденным по окружающим апертурам:  $\Delta_{nm}^* = \text{med}_m \Delta_{nm}$ .

**Выводы.** Рассмотренные модели динамических структурных искажений применялись для обработки изображений инфракрасного диапазона с космического аппарата «Метеор-М». В процессе эксперимента уточнялись параметры корректирующих алгоритмов: размеры скользящей апертуры, степени полиномов. В качестве примера на рисунке 1 представлен фрагмент исходного изображения (сюжет Калифорния), а на рисунке 2 - результат его обработки, выполненной с использованием кусочно-линейной аддитивной модели.

Исследование времязависимых искажений на космических снимках земной поверхности позволило создать математические модели для их описания, а также алгоритмы их коррекции.

Предложенные модели обладают математической строгостью и с высокой точностью описывают времязависимые структурные искажения в «идеальных» условиях: при отсутствии шумов, достаточно представительной выборке и ста-

тистической однородности сюжета. На практике приходится иметь дело со снимками, имеющими различные особенности, формальный учет которых представляет значительную сложность: случайный шум, динамично изменяющийся сюжет, импульсные помехи др. Рассмотренные ранее модели имеют различную чувствительность к подобного рода особенностям, что и определяет область их использования на практике. В частности, полиномиальные модели имеют методическую ошибку, зависящую от уровня случайного шума. Кусочно-линейная мультипликативная модель при небольших объемах выборки не обеспечивает необходимого качества коррекции в силу больших флуктуаций значений АКФ, а ее модификация, учитывающая среднюю яркость, имеет методическую ошибку, которая становится заметной при высоких значениях темного сигнала фотодатчика и при снижении средней яркости изображения.

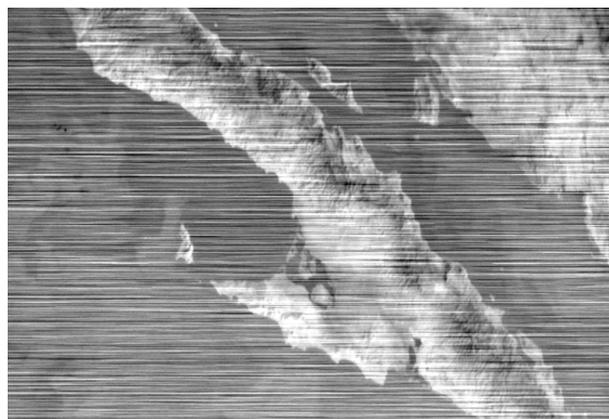


Рисунок 1 – Исходное изображение

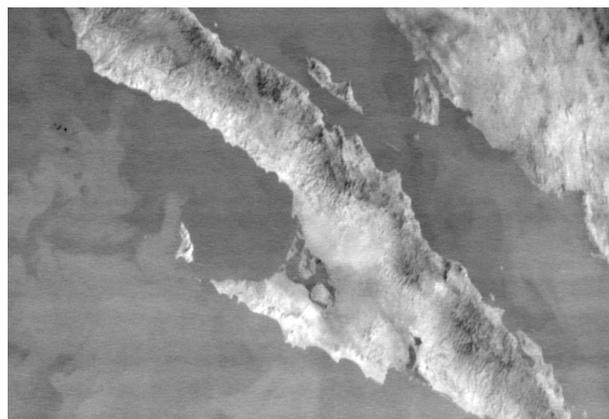


Рисунок 2 – Обработанное изображение

Обработка натурной информации со спутника «Метеор-М» подтвердила, что предложенные модели и алгоритмы позволяют устранять времязависимые структурные искажения на изображениях, когда традиционные константные алгоритмы коррекции оказываются неработоспособными. Следовательно, предложенные модели могут быть использованы для повы-

шения качества изображений от существующих и вновь проектируемых сканирующих устройств, в которых наблюдается изменение чувствительности фотоприемников в зависимости от резкого изменения яркости объектов наблюдаемой сцены.

#### **Библиографический список**

1. Злобин В.К., Еремеев В.В. Обработка аэрокосмических изображений. М.: Физматлит, 2006. – 288 с.

2. Еремеев В.В., Зенин В.А. Радиометрическая нормализация изображений от многоматричных сканирующих устройств // Цифровая обработка сигналов. Вып. 3. 2009. – С. 31-35.

3. Teillet, P. M., Holben, B. N., Towards Operational Radiometric Calibration of NOAA AVHRR Imagery in the Visible and Near-Infrared Channels // Canadian Journal of Remote Sensing. 1994. Vol. 21. № 4. P. 374-387.

УДК 004.932.2

**Н.А. Егюшкин, А.Э. Москвитин**

## **ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ КОРРЕКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ СКАНИРУЮЩЕГО ЗЕРКАЛА**

*Рассмотрены математические модели уточнения закона сканирования видеодатчиков, осуществляющих съемку всего диска земной поверхности с высоты порядка 35000 км с полем зрения  $20 \times 20^\circ$ . Выполнен точностной анализ этих моделей, приведены результаты экспериментальной апробации.*

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, обработка изображений, геометрическая коррекция, модель съемки, измерение углов.

**Постановка задачи.** Глобальные системы наблюдения Земли ориентированы на периодическое получение изображений всего диска Земли на фоне окружающего космоса. Существуют два вида подобных систем: геостационарные и полярно-орбитальные. Особенность таких систем состоит в том, что собственного движения спутника по орбите не достаточно для организации развертки изображений. Поэтому для получения изображений необходимо использовать другие подходы, например механическую развертку на основе вращающегося зеркала. На таком принципе построен современный датчик МСУ-ГС космического аппарата Электро-Л [1].

На закон движения сканирующего зеркала влияет множество случайных и детерминированных факторов: внешние и внутренние вибрации, неравномерность вращения электродвигателей, люфт подшипников и др. Их действие может существенно снизить геометрическое качество формируемых изображений. Поэтому в состав приводов сканирования включаются высокоточные датчики углового положения (ДУП). Показания ДУП используются как сигнал обратной связи для управления электродвигателями привода сканирующего зеркала, а также сохраняются в служебной части изображения для использования при геометрической коррекции.

**Цель настоящей работы** состоит в полу-

чении моделей фильтрации измерений ДУП для повышения точности определения углового положения сканирующего зеркала. Результаты фильтрации позволяют повысить качество калибровки ДУП и последующей геометрической коррекции изображений.

**Математическая модель измерений ДУП.** Центральная задача, которую необходимо решить для повышения точности формирования и коррекции изображений, заключается в определении положения сканирующего зеркала в момент формирования каждой строки. Положение зеркала однозначно характеризуется двумя углами его поворота. Этой информации достаточно для осуществления геометрической коррекции изображений [2]. Рассмотрим процедуру определения одного из углов.

ДУП измеряет угол поворота сканирующего зеркала  $\alpha(t)$  в момент времени формирования  $l$ -й строки изображения, что можно описать некоторой функцией

$$t = T(l). \quad (1)$$

В результате на основе калибровочной характеристики ДУП

$$\alpha = A(D) \quad (2)$$

определяется однозначно соответствующий углу  $\alpha(t)$  код угла  $D(l)$ .

Из-за ошибок измерений на выходе ДУП формируется искаженный целочисленный код угла

$$\hat{D}(l) = D(l) + \delta(l), \quad (3)$$

где  $\delta(l)$  – ошибка ДУП, приведенная к выходу.

Выражения (1)-(3) описывают процесс измерения углов. При заданной функции (1) из выражений (2) и (3) следуют две задачи интерпретации показаний ДУП:

- определение калибровочной характеристики ДУП в виде (2);
- минимизация действия ошибок  $\delta(l)$ .

Получение характеристики (2) основано на калибровке ДУП в лабораторных условиях, обычно с использованием лазерного динамического гониометра (ЛДГ). Общая схема калибровки ДУП в упрощенном виде показана на рисунке 1.

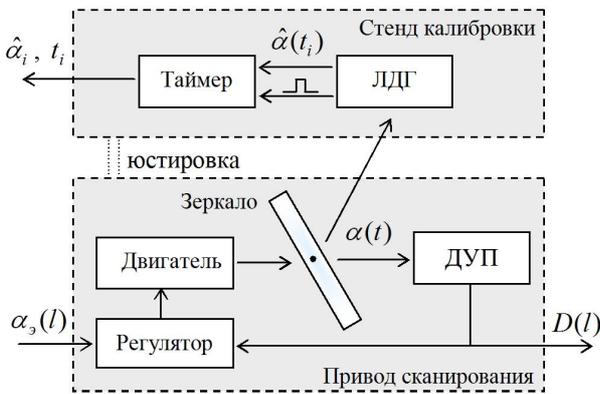


Рисунок 1 – Схема калибровки ДУП

Закон движения зеркала  $\alpha(t)$  определяется работой замкнутой системы регулирования, состоящей из электродвигателя, зеркала, ДУП и регулятора, составляющей в целом привод сканирования. Регулятор проектируется так, чтобы несмотря на действие случайных факторов, реальный закон движения зеркала  $\alpha(t)$  был бы в определенном смысле максимально близок к заданному эталонному закону  $\alpha_3(l)$ .

Для оценки (2) и параметров работы привода ЛДГ измеряет фактический угол сканирующего зеркала  $\alpha(t)$  в дискретные моменты времени  $t_i$ , формируя ряд оценок значений угла  $\hat{\alpha}_i$ :

$$\hat{\alpha}_i = \alpha(t)|_{t=t_i} + \varepsilon_i, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_i$  – совокупная погрешность  $i$ -го измерения угла ЛДГ, связанная с ошибками ЛДГ, юстировки привода на стенде и др.

Измерения ЛДГ осуществляются периодически в дискретные моменты. Частота измерения углов ЛДГ многократно ниже частоты строк.

Начальная фаза и период взятия выборок не постоянны, поэтому в особом таймере (см. рисунок 1) фиксируются моменты измерений  $t_i$ . В результате значения угла  $\hat{\alpha}_i$  сопровождаются моментами времени  $t_i$  их измерения.

Ставится задача сопоставления данных измерений  $\hat{\alpha}_i, t_i, \alpha_3(l), \hat{D}(l)$  для оценки калибровочной характеристики ДУП и закона сканирования привода.

**Статическая калибровка ДУП.** В статическом режиме калибровки задается  $\alpha_3(l) = \text{const}$ , привод стабилизирует зеркало в заданном положении. После окончания переходных процессов выполняется несколько измерений ЛДГ и ДУП, затем вычисляются средние значения. Благодаря процедуре усреднения можно достичь пренебрежимо малого влияния случайных составляющих ошибок  $\varepsilon_i$  и  $\delta_i$ . Путем повторения данной процедуры для различных  $\alpha_3(l)$  формируется набор достаточно точных выборок  $\alpha_i, D_i$  из калибровочной характеристики ДУП, после чего оценка характеристики (2) получается путем линейной интерполяции дискретных отчетов:

$$\hat{\alpha}(D) = \alpha_i + (\alpha_{i+1} - \alpha_i)(D - D_i)/(D_{i+1} - D_i), \quad (5)$$

где  $i$  выбрано так, чтобы  $D_i \leq D < D_{i+1}$ .

**Динамическая калибровка ДУП.** В динамическом режиме закон движения зеркала  $\alpha_3(l)$  соответствует штатной работе привода (формированию изображений). В этом режиме для каждой строки можно получить только одно измерение угла, однако режим калибровки максимально близок к штатному режиму работы сканера. Повышение точности оценок достигается за счет выполнения нескольких сканирований.

Для каждого момента времени измерения гониометра  $t_i$  находится соответствующий номер строки  $l_i$ :

$$l_i = F^{-1}(t_i). \quad (6)$$

Тогда измеренному ЛДГ углу  $\hat{\alpha}_i$  соответствует код ДУП  $\hat{D}_i = \hat{D}(l_i)$ . Поскольку  $l_i$  не целочисленные, то выполняется интерполяция дискретных значений аналогично (5).

В результате объединения данных, полученных за  $K$  сканирований, формируется таблица выборок из (2) вида  $\hat{D}_{ik}, \hat{\alpha}_{ik}, k = \overline{1, K}$ . В отличие от статической калибровки данные отчеты зашумлены. Зато их количество и плотность взятия выборок гораздо выше.

Для получения приемлемой по точности оценки характеристики выполняется сглаживание измерений:

$$\hat{\alpha}(D) = \frac{\sum_{|D_{ik}-D|<I} \hat{\alpha}_{ik}}{\sum_{|D_{ik}-D|<I} 1}, \quad (7)$$

где  $I$  – размер апертуры сглаживания. Минимальное значение  $I$  выбирается исходя из условия монотонности оценки калибровочной характеристики (7).

**Оценка точности статической калибровки.** В ходе статической калибровки получают достаточно точные выборки  $\alpha_i$ ,  $D_i$  из калибровочной характеристики, однако их количество невелико. Поэтому возникает вопрос: адекватна ли интерполяция отчетов (5) реальной характеристике? Для проверки этой гипотезы выполняется повторная статическая калибровка ДУП, причем калибруется короткий участок характеристики в области наиболее быстрого изменения функции. На рисунке 2 показан фрагмент оценки калибровочной характеристики ДУП МСУ-ГС (модуль видимого диапазона, нелинейная составляющая) [1].



Рисунок 2 – Характеристика ДУП (статическая калибровка, фрагмент)

Из рисунка 2 следует, что:

– различия между двумя оценками калибровочных характеристик составляют более 3 угл. сек. (1 пиксель);

– при повторной калибровке на узком участке наблюдается многократно большая скорость изменения калибровочной функции.

По всей видимости, эти противоречия вызваны дрейфом, т.е. наличием в ошибках  $\varepsilon_i$ ,  $\delta(l)$  медленно меняющейся составляющей. Калибровка проводится несколько часов, и на коротких участках дрейф превалирует над малой амплитудой движения сканирующего зеркала. Поэтому, хотя точность получения отдельных отчетов калибровочной характеристики высока, её оценка в целом недостаточно точна. Количественно величину дрейфа можно оценить как

$$\beta_{op} = \max_i \{\alpha_i\} - \min_i \{\alpha_i\}, \quad (8)$$

где  $\alpha_i$  получены при статической калибровке короткого участка характеристики ДУП.

**Оценки точности динамической калибровки.** Совокупное действие ошибок измерения гониометром углов  $\varepsilon_i$  и кодов ДУП  $\delta_i$  можно охарактеризовать среднеквадратическим отклонением:

$$E = \sqrt{\sum_{i,k} (\hat{\alpha}(\hat{D}_{ik}) - \hat{\alpha}_{ik})^2 / \sum_{i,k} 1}, \quad (9)$$

где  $\hat{\alpha}(D)$  – оценка, полученная по (7). Суммирование здесь идет по индексам, для которых  $\hat{D}_{ik}$  и  $\hat{\alpha}_{ik}$  определены. Значения  $E$  для ДУП МСУ-ГС достаточно велики (несколько пикселей), поэтому необходим более детальный анализ характера и возможных причин появления ошибок.

Оценим изменение систематической составляющей ошибок ЛДГ (приписав к нему ошибки ДУП) от сканирования к сканированию как

$$\bar{\varepsilon}_k = p_k - \bar{p}, \quad \bar{p} = \sum_{k=1}^K p_k / K, \quad (10)$$

где  $p_k = \sum_i \hat{\alpha}_{ik} / \sum_i 1$  – среднее значение угла в  $k$ -м сканировании.

На рисунке 3 показан график  $\bar{\varepsilon}_k$  при калибровке ДУП МСУ-ГС [1].

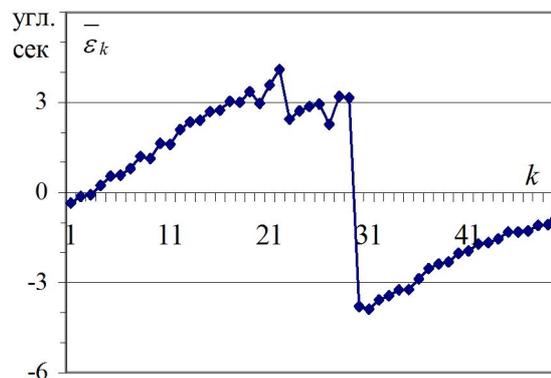


Рисунок 3 – Дрейф систематической составляющей ошибки ЛДГ за 50 сканирований

Из рисунка 3 можно сделать вывод, что в ходе динамической калибровки наблюдается медленный дрейф систематической составляющей ошибок измерения, что подтверждает ранее сделанное предположение о наличии дрейфа при проведении статической калибровки. Конечно, медленный дрейф не исключает наличия резких скачков из-за ударных воздействий на испытательный стенд или перерывов в работе (см. рисунок 3).

Для уменьшения влияния дрейфа на точ-

ность калибровки необходимо выполнить его компенсацию:

$$\alpha_{ik}^* = \hat{\alpha}_{ik} - \bar{\varepsilon}_k. \quad (11)$$

Скорректированные измерения  $\alpha_{ik}^*$  используются вместо  $\hat{\alpha}_{ik}$  в формулах (7), (9). При этом значения оценки погрешности (9) уменьшаются до значений, обусловленных только шумом квантования ДУП.

Оценки дрейфа по (10) определяются с некоторой погрешностью. В первую очередь, это связано с тем, что в разных сканированиях измерения ЛДГ выполняются в разные моменты времени. В альтернативном алгоритме значения  $\bar{\varepsilon}_k$ ,  $k = \overline{1, K}$ , находятся по МНК из условий

$$E(\bar{\varepsilon}_1, \dots, \bar{\varepsilon}_K) = \min, \quad \sum_{k=1}^K \bar{\varepsilon}_k = 0, \quad (12)$$

где  $E(\bar{\varepsilon}_1, \dots, \bar{\varepsilon}_K)$  – оценка (9), в которой используются скорректированные по (11) измерения ДУП и соответственно скорректированная оценка (7).

Теперь оценим точность нахождения калибровочной кривой (7). Пусть  $\hat{A}_j(D)$ ,  $j = \overline{1, J}$ , – независимые оценки калибровочной кривой. Они могут быть найдены в динамике по данным различных сканирований. Это также могут быть характеристики, полученные в статическом режиме и в динамике. Тогда максимальное расхождение

$$G = \max_{D, i, j} (\hat{A}_i(D) - \hat{A}_j(D)) \quad (13)$$

характеризует итоговую погрешность оценок калибровочной характеристики (1).

Наиболее достоверна оценка (13), в которой сопоставляются характеристики, полученные в разные дни совершенно разными способами: в статическом и в динамическом режимах. Однако при этом может потребоваться коррекция искажений статических характеристик  $\hat{A}_j(D)$  из-за дрейфа: вместо  $\hat{A}_j(D)$  необходимо использовать разность  $\hat{A}_j(D) - q_Q(D)$ , где  $q_Q(D)$  – корректирующая дрейф кусочно-линейная функция аргумента  $D$ , зависящая от вектора параметров  $Q$ . Оценка погрешности в данном случае находится как

$$G = \min_Q \max_{D, i, j} (\hat{A}_i(D) - \hat{A}_j(D)). \quad (14)$$

При этом количество разрывов  $q_Q(D)$  должно быть достаточно малым.

На рисунке 4 показаны оценки калибровочной характеристики, полученные в разные

дни в динамике и в статике. У статической характеристики на одном из участков был исправлен дрейф. Из рисунка 4 можно сделать вывод о том, что точность оценивания калибровочных характеристик  $G$  составляет доли угл. сек. Также видно, что при статической калибровке скачкообразно меняется скорость дрейфа, что вероятно вызвано перерывом в работе.

#### Оценка качества закона сканирования.

Помимо калибровочной характеристики ДУП, интерес представляет работа привода сканирования в целом, т.е. реальный закон движения зеркала. На него действует ряд случайных факторов, поэтому закон движения  $\alpha_k(t)$  при  $k$ -м сканировании представляет собой реализацию случайной функции  $\alpha(t)$ , которая может быть охарактеризована оценками:

– среднего закона сканирования

$$\bar{\alpha}(t) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \alpha_k(t);$$

– поточечного среднеквадратического

$$\text{отклонения } S(t) = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (\alpha_k(t) - \bar{\alpha}(t))^2};$$

– среднеквадратической нестабильности

$$\text{развертки } S = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} S^2(t) dt}, \quad \text{где } \tau \text{ – время}$$

сканирования;

– среднеквадратического отклонения от эталонного линейного закона сканирования

$$L(t) = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (\alpha_k(t) - \alpha_s(t))^2}.$$

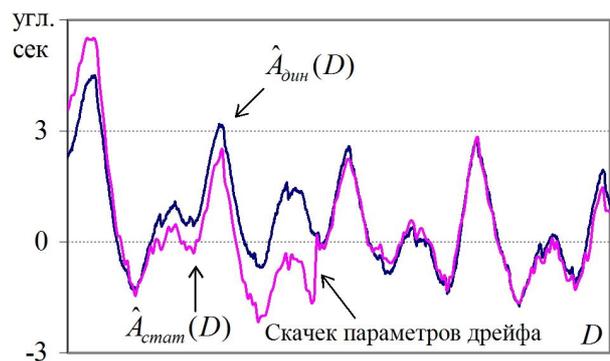


Рисунок 4 – Характеристики ДУП, полученные в статике и в динамике

Последний критерий может быть использован при проектировании регулятора привода сканирования. Однако для качественного формирования изображений важна равномерность движения зеркала. В идеальном случае  $\omega(t) = d\alpha(t)/dt = \text{const}$ . Нарушение этого соотношения характеризуется мерой изменения размера пикселя

$$B = \max_t \left| \frac{\omega(t)}{v} - 1 \right|, \quad v = \frac{1}{\tau_0} \int \omega(t) dt. \quad (15)$$

Плавность движения зеркала определяется:

- отношением инерционности сканирующего зеркала как физического тела к мощности электродвигателя;
- законом регулирования, заложенным в приводе сканирования;
- шумами ДУП;
- негладкостью калибровочной характеристики ДУП.

На рисунке 5 показан график  $\omega(t)/v$  для привода видимого диапазона (ВД) МСУ-ГС [1].

Как видим, размер пикселя скачкообразно меняется больше чем в два раза. Это связано с низкой скоростью сканирования: инерционности зеркала не достаточно, чтобы обеспечить плавность его движения. По этой причине геометрическая коррекция изображения требует больших вычислительных затрат, так как необходимо выполнить построчную обработку изображений вместо пофрагментной [2]. Поэтому при проектировании регулятора в качестве критерия следует использовать (15), даже если при этом возникнет проигрыш в других показателях. Если изображение сопровождается информацией от ДУП, увеличение нелинейности и нестабильности развертки может быть легко скомпенсировано в ходе геометрической коррекции.

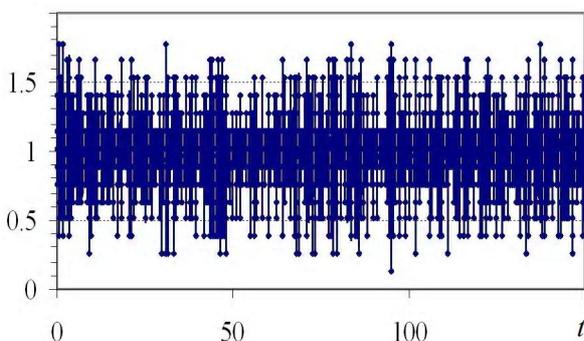


Рисунок 5 – Угловой размер пикселя

Следует отметить, что в модуле инфракрасного (ИК) диапазона МСУ-ГС [1] такой проблемы не возникает, поскольку скорость вращения зеркала многократно выше, и за счет его инерции размер пикселя  $\omega(t)/v$  изменяется не более чем на 10 %.

**Оценка качества и фильтрация измерений ДУП при геометрической коррекции.** Эта операция выполняется в такой последовательности.

*Шаг 1.* Проверка контрольных полей служебной части изображения, извлечение кодов ДУП  $\hat{D}(l)$ .

*Шаг 2.* С использованием найденной по рассмотренным выше методикам калибровочной характеристики  $A(D)$  измерения ДУП пересчитываются в оценки углов:  $\hat{\alpha}(l) = A(\hat{D}(l))$ .

*Шаг 3.* Выявляются и отбрасываются измерения ДУП, для которых отклонение от эталонного закона  $|\hat{\alpha}(l) - \alpha_s(l)| > M$ , где  $M$  – порог отбраковки.

*Шаг 4.* Если на предыдущем шаге было отбраковано более определенного процента измерений ДУП, то информация от ДУП не используется. Вместо неё используется оценка среднего закона сканирования  $\bar{\alpha}(t)$ .

*Шаг 5.* Измерения  $\hat{\alpha}(l)$  сглаживаются скользящим МНК - фильтром. За счет этого значительно снижается влияние шумов ДУП  $\delta(l)$ , а также получается непрерывная функция изменения угла  $\alpha(t)$ . Порядок сглаживающих полиномов и апертура определяются на основании критерия максимального качества нормализованных изображений.

*Шаг 6.* Полученная на предыдущем шаге функция  $\alpha(t)$  проверяется на монотонность. Если монотонность нарушена, то вместо  $\alpha(t)$  используется оценка среднего закона сканирования  $\bar{\alpha}(t)$ .

Найденная таким образом функция  $\alpha(t)$  используется для описания закона сканирования датчика и нормализации изображений [2].

**Выводы.** Рассмотренные модели и алгоритмы позволяют уточнить процесс формирования изображений от систем глобального наблюдения Земли. Отличительной особенностью предложенных моделей является то, что они ориентированы на интерпретацию измерений положения зеркала ДУП с точностью до долей угловой секунды.

Рассмотренные модели реализованы программно, используются при калибровке приводов сканирующих зеркал МСУ-ГС и вошли в состав программного комплекса нормализации изображений от КА «Электро-Л» [1].

#### Библиографический список

1. Гектин Ю.М., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е. и др. Вопросы проектирования программно-методического обеспечения наземной калибровки съемочной аппаратуры // Сб. научных статей «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». М.: Физматлит, 2008. С. 248-255.
2. Воронин А.А., Егошкин Н.А., Еремеев В.В. и др. Геометрическая обработка данных космических систем глобального наблюдения земли // Вестник РГРТУ. 2009. № 1. Вып. 27. С. 12-17.

УДК 528.088: 004.932.2

*А.Е. Кузнецов, В.И. Пошехонов***МЕТОДИКА ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ КОМПЛЕКСА МНОГОЗОНАЛЬНОЙ СКАНЕРНОЙ СЪЕМКИ КА «МЕТЕОР-М»**

*Рассматривается задача геометрической калибровки комплекса многозональной сканерной съемки с целью повышения точности стереофотограмметрической обработки видеоданных. Предлагается методика автоматической калибровки по опорным и общим точкам спектрозональных изображений на основе полиномиальной модели съемочного устройства сканового принципа действия. Приводятся полученные оценки точности геодезической привязки видеоданных, а также расчета высоты по стереоизображениям.*

**Ключевые слова:** геометрическая калибровка, съемочное устройство, ПЗС-линейка, математическая модель геопривязки, стереоизображение.

**Введение.** Комплекс многозональной сканерной съемки (КМСС), размещенный на российском гидрометеорологическом космическом аппарате (КА) «Метеор-М» [1], предназначен для наблюдения подстилающей поверхности в шести диапазонах видимой и ближней ИК областях спектра и решения ряда хозяйственных и научных задач [2]. В состав комплекса входят два съемочных устройства МСУ-100 и одно МСУ-50, идентичные по принципу функционирования и конструктивным решениям, отличающиеся только фокусным расстоянием объективов.

Каждое съемочное устройство формирует три полутонных изображения  $I_\lambda(m, n)$ ,  $\lambda = \overline{1,3}$  в соответствующих спектральных диапазонах при помощи трех ПЗС-линеек, установленных в фокальной плоскости с небольшим смещением друг относительно друга вдоль направления полета спутника. В результате наблюдение одних и тех же объектов в разных спектральных каналах происходит с временной задержкой и под разными углами от надира. С учетом этого в работе [3] была предложена технология стереофотограмметрической обработки спектрозональных изображений для определения высоты верхней границы облачных образований и скорости их движения поперек трассы полета КА, а также получены оценки точности формируемых информационных продуктов – карт метеобстановки.

Поскольку определение высоты основано на восстановлении пространственного положения визирных лучей, сформировавших изображения одноименных объектов, то к точности опре-

деления геометрических параметров съемочной системы предъявляются повышенные требования по сравнению с другими задачами тематической обработки изображений. Поэтому с целью достижения теоретических значений точностных характеристик выходных информационных продуктов стереообработки в настоящей статье рассматривается методика геометрической калибровки съемочных устройств КМСС.

В следующем разделе формулируется задача геометрической калибровки, для выполнения которой предлагается использовать не строгую физическую модель функционирования съемочного устройства, а ее полиномиальное приближение, что позволяет обеспечить высокую геометрическую точность при минимальном числе неизвестных параметров. Рассматривается алгоритм автоматического поиска на изображениях общих и опорных точек и определения калибруемых параметров по методу наименьших квадратов. В заключение приводятся полученные по реальным данным оценки точности геодезической привязки видеоданных, а также расчета высоты по стереоизображениям.

**Постановка задачи.** Для стереофотограмметрической обработки спектрозональных изображений, формируемых аппаратурой МСУ-100/50, необходимо для произвольного пикселя  $(m, n)$  определить в гринвичской геоцентрической системе координат  $OX_T Y_T Z_T$  единичный вектор  $\mathbf{r}_T(m, n) = (r_x, r_y, r_z)^T$  направляющих косинусов соответствующего визирного луча. Искомый вектор  $\mathbf{r}_T$  зависит от ряда параметров:

внутреннего ориентирования съёмочных устройств и углов их установки на платформе КА, линейного и углового положения спутника в момент формирования  $t$  заданной строки  $n$  изображения,

$$t = t_0 + n/f,$$

где  $t_0$  – время начала формирования видеоданных,  $f$  – строчная частота сканирования.

Для определения элементов внешнего ориентирования на КА «Метеор-М» предусмотрены две измерительные системы. Первая – штатная, используемая для управления ориентацией спутника в процессе полета, предусматривает определение пространственного положения КА по данным орбитального прогноза, а его угловой ориентации – на основе построителя местной вертикали. При этом углы крена, тангажа и рыскания измеряются с частотой 10 Гц и погрешностью порядка  $10'$ . Такая точность оказывается не достаточной не только для выполнения геометрической калибровки съёмочных устройств, но и для последующей стереообработки спектрональных изображений.

Поэтому в дальнейшем будем использовать только данные от экспериментального комплекса координатно-временного обеспечения (ККВО), в состав которого входят: аппаратура спутниковой навигации АСН-М-М (приемник GPS/ГЛОНАСС) для определения линейного положения КА; прибор астроориентации (блок определения координат звезд БОКЗ-М) для определения угловой ориентации. Среднеквадратическая ошибка ( $1\sigma$ ) определения пространственного положения КА составляет 15 м, измерения выполняются с частотой 1 Гц. Точность определения углового положения оптической оси БОКЗ-М ( $1\sigma$ ) составляет  $2''$ , вокруг оптической оси –  $20''$ . Период определения ориентации – 3 с.

Интерполируя навигационные измерения комплекса ККВО, получаем для произвольного момента времени  $t$ : вектор  $\mathbf{p}(t)$  пространственного положения КА в гринвичской геоцентрической системе координат; матрицу поворота  $\mathbf{R}_{ИБ}(t)$ , связывающую приборную систему координат БОКЗ-М с инерциальной системой координат стандартной эпохи J2000. С учетом этого запишем математическое выражение, связывающее искомым вектор  $\mathbf{r}_Г(m, n)$  с направлением визирного луча  $\mathbf{r}_П(m)$  в приборной системе координат съёмочного устройства,

$$\mathbf{r}_Г(m, n) = \mathbf{R}_{ГИ}(t) \mathbf{R}_{ИБ}(t) \mathbf{R}_{БК} \mathbf{R}_{КП} \mathbf{r}_П(m), \quad (1)$$

где  $\mathbf{R}_{КП}$  – матрица перехода от приборной системы координат съёмочного устройства к базовой системе КА;  $\mathbf{R}_{БК}$  – матрица перехода от базовой системы координат КА к приборной системе БОКЗ-М;  $\mathbf{R}_{ГИ}(t)$  – матрица перехода от инерциальной к гринвичской системе координат для заданного момента времени  $t$ .

Компоненты вектора  $\mathbf{r}_П$  для каждого пикселя  $m$  рассчитаем на основе известных номинальных значений фокусного расстояния объектива, физического размера светочувствительного элемента, расположения ПЗС-линейки в фокальной плоскости. Матрицу  $\mathbf{R}_{ГИ}(t)$  определим по известным моделям прецессии, нутации и вращения Земли. Матрицы  $\mathbf{R}_{КП}$  и  $\mathbf{R}_{БК}$  рассчитаем на основе конструктивных углов установки съёмочного устройства  $(\alpha, \omega, \kappa)_П$  и прибора астроориентации  $(\alpha, \omega, \kappa)_Б$  соответственно на платформе КА, измеряемых по данным предполетной калибровки.

Для геодезической привязки изображения найдем для произвольного пикселя  $(m, n)$  координаты точки пересечения соответствующего визирного луча с выбранным референц-эллипсоидом, задаваемой вектором  $\mathbf{p}_Г$ . С этой целью запишем уравнение

$$\mathbf{p}_Г(m, n) = \mathbf{p}(t) + s \mathbf{r}_Г(m, n), \quad (2)$$

и решим его относительно параметра  $s$ , определяющего длину вектора визирного луча, совместно с уравнением эллипсоида,

$$X^2 + Y^2 + Z^2 + \varepsilon_2^2 Z^2 = a, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_2^2 = (a^2 - b^2)/b^2$  – квадрат второго эксцентриситета эллипсоида;  $a$ ,  $b$  – большая и малая полуоси.

Экспериментальная апробация рассмотренной модели на реальных данных показала, что точность геодезической привязки изображений КМСС, а значит и карт метеообстановки, оказывается достаточно низкой – от 5 до нескольких десятков километров. При этом погрешности расчета высоты достигают 2-3 км и кроме того распределены в строчном направлении на снимке не равномерно. Исследования показали, что причинами этого являются систематические и случайные ошибки, обусловленные:

– погрешностями внутреннего ориентирования съёмочных устройств КМСС, включая дисторсию оптической схемы объектива;

– низкой точностью задания конструк-

тивных углов установки съемочных устройств  $(\alpha, \omega, \kappa)_П$  и прибора астронавигации  $(\alpha, \omega, \kappa)_Б$  на платформу КА;

– ошибками определения элементов внешнего ориентирования.

Так, погрешности определения времени начала формирования видеоданных  $t_0$  могут достигать нескольких секунд. Учитывая, что скорость движения КА, приведенная к поверхности Земли, составляет порядка 6.6 км/с, это приводит к значительным ошибкам определения как вектора пространственного положения КА  $\mathbf{p}(t)$ , так и матрицы ориентации  $\mathbf{R}_{ИБ}(t)$ , для заданной строки изображения  $n$ . При этом необходимо обратить внимание, что временная привязка исходных навигационных измерений комплекса ККВО обладает высокой точностью.

Отсюда с целью повышения точности геодезической привязки изображений и их стереообработки встает задача геометрической калибровки съемочных устройств КМСС, направленная на устранение систематических ошибок за счет уточнения установочных углов и элементов внутреннего ориентирования съемочной системы.

**Методика калибровки.** Заметим, что уточнение названных параметров по опорной картографической информации представляет сложную техническую задачу, поскольку: во-первых, на координатные рассогласования в опорных точках влияют как статические ошибки геометрии съемочной системы, так и динамические ошибки навигационных измерений; во-вторых, искомые параметры, определяющие геометрию съемочной системы, взаимосвязаны между собой и разделить их влияние оказывается весьма затруднительно. По этим причинам применение традиционного метода дифференциального уточнения калибруемых параметров с использованием моделей (1), (2) вызывает определенные сложности.

Однако среди методов калибровки кадровых камер [4] известны модели неявной калибровки на основе некоторого набора параметров, не имеющих четкой физической интерпретации, которые, однако, выражают суммарное влияние ряда факторов и позволяют таким образом определить искомую геометрию съемочной системы. При этом обычно становится возможным сократить до минимума число калибруемых параметров, что упрощает последующую процедуру их определения.

Поэтому для калибровки съемочных устройств КМСС будем использовать неявную модель, в которой вектор  $\mathbf{r}_П$  направления визирного луча в приборной системе координат

съемочного устройства описывается в зависимости от номера  $m$  светочувствительного элемента ПЗС-линейки полиномиальной функцией,

$$\mathbf{r}_П(m) = \sum_{i=0}^N \mathbf{a}_i m^i, \quad \mathbf{a} = (a_x, a_y, a_z)^T.$$

Степень полинома  $N$  выберем в ходе калибровки как минимально необходимую для адекватного описания геометрии съемочной системы. Заметим, что матрицы преобразования  $\mathbf{R}_{КП}$ ,  $\mathbf{R}_{БК}$  также могут быть включены в рассмотренную модель. Представив параметры калибровки в матричной форме  $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_0 \mathbf{a}_1 \dots \mathbf{a}_N]$ , получим новую модель, задающую направление визирного луча  $\mathbf{r}_Б = \mathbf{R}_{БК} \mathbf{R}_{КП} \mathbf{r}_П$  в приборной системе координат БОКЗ-М,

$$\mathbf{r}_Б(m) = \mathbf{A} \mathbf{m}, \quad \mathbf{m} = (1, m, m^2, \dots, m^N)^T. \quad (4)$$

С учетом этого искомое направление  $\mathbf{r}_Г$  визирного луча в гринвичской геоцентрической системе координат определим выражением

$$\mathbf{r}_Г(m, n) = \mathbf{R}_{ГИ}(t) \mathbf{R}_{ИБ}(t) \mathbf{A} \mathbf{m}. \quad (5)$$

Для определения элементов матрицы  $\mathbf{A}$  используем опорные точки  $(m, n)$  на изображении с известными геоцентрическими координатами  $\mathbf{g} = (X, Y, Z)^T$ , которые равномерно распределены как по номеру светочувствительного элемента  $m$ , так и по времени формирования  $t$ . Учитывая, что для стереообработки видеоданных большое значение имеет точность взаимной ориентации съемочных устройств, дополнительно используем общие точки на изображениях от разных ПЗС-линейк одного съемочного устройства. Таким образом, методика калибровки каждого съемочного устройства КМСС включает выполнение следующих основных шагов:

– подготовка опорной информации и автоматический поиск на спектрально-зональных изображениях опорных и общих точек;

– определение начального приближения элементов матриц  $\mathbf{A}_\lambda$ ,  $\lambda = \overline{1, 3}$ , соответствующих каждой ПЗС-линейке калибруемого съемочного устройства, с использованием физической модели (1), (2);

– уточнение искомых параметров путем минимизации невязок – расстояния между визирным лучом и точкой на местности для опорных точек и кратчайшего расстояния между двумя визирными лучами, соответствующих общим точкам;

– анализ результатов калибровки, уточнение

степени полинома  $N$  для каждого съемочного устройства.

Вначале рассмотрим процедуру определения начального приближения элементов матриц  $\mathbf{A}_\lambda$ . Для каждого светочувствительного элемента  $m = \overline{1, M}$  ПЗС-линейки с номером  $\lambda$  запишем уравнение

$$\mathbf{A}_\lambda \mathbf{m} = \mathbf{R}_{БК} \mathbf{R}_{КП} \mathbf{r}_{П\lambda}(m), \quad (6)$$

где  $\mathbf{r}_{П\lambda}(m)$  определяется по физической модели съемочного устройства.

Отсюда по методу наименьших квадратов,

$$\mathbf{A}_\lambda^T = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \mathbf{V}, \quad (7)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & m & m^2 & \dots & m^N \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}, \quad \mathbf{V} = \begin{bmatrix} \dots \\ \mathbf{v}_m^T \\ \dots \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{v}_m = \mathbf{R}_{БК} \mathbf{R}_{КП} \mathbf{r}_{П\lambda}(m).$$

Рассмотрим далее алгоритм уточнения матриц  $\mathbf{A}_\lambda$  на основе опорных точек местности (ОТМ). Применим сквозную нумерацию ОТМ, тогда номер точки  $k = \overline{1, K}$  однозначно определяет её геоцентрические координаты  $\mathbf{g}_k = (X_k, X_k, Y_k)^T$ , а также соответствующие пиксельные координаты  $(m_k, n_k)$  на изображении, сформированном сканером с номером  $\lambda$ , на  $j$ -м витке.

В качестве критерия минимизации выберем квадрат кратчайшего расстояния  $|\mathbf{d}_{ОТМ}(k)|^2$  между точкой  $\mathbf{g}_k$  и восстановленным по навигационным измерениям и калибровочным коэффициентам  $\mathbf{A}_\lambda$  проектирующим лучом, сформировавшим изображение соответствующей точки  $(m_k, n_k)$  на снимке. Введем обозначения,

$$\mathbf{p}_{j,k} = \mathbf{p}(t_{j,k}), \quad \mathbf{B}_{j,k} = \mathbf{R}_{ГИ}(t_{j,k}) \mathbf{R}_{ИБ}(t_{j,k}),$$

$$t_{j,k} = t_{0j} + n_k / f.$$

Тогда координаты  $\hat{\mathbf{g}}_k$  ближайшей точки, лежащей на визирном луче,

$$\hat{\mathbf{g}}_k = \mathbf{p}_{j,k} + s_k \mathbf{r}_k,$$

где  $s_k = (\mathbf{g}_k - \mathbf{p}_{j,k}) \mathbf{r}_k / |\mathbf{r}_k|^2$ ,  $\mathbf{r}_k = \mathbf{B}_{j,k} \mathbf{A}_\lambda \mathbf{m}_k$ .

Отсюда

$$\mathbf{d}_{ОТМ}(k) = \mathbf{g}_k - \hat{\mathbf{g}}_k.$$

Как было отмечено ранее, значения  $t_{0j}$

времени начала формирования видеоданных могут содержать значительные погрешности. Очевидно, что время  $t_{0j}$ , определяющее элементы внешнего ориентирования КА в момент съемки каждой строки изображения, и искомые параметры  $\mathbf{A}_\lambda$ , задающие геометрию съемочного устройства, коррелированы между собой. Ошибка по времени приводит главным образом к смещению определяемого линейного положения  $\mathbf{p}(t)$  вдоль орбиты полета КА. Однако введение поправки  $\Delta t_j$  ко времени  $t_{0j}$  перед выполнением процедуры калибровки приводит к изменению получаемых в результате значений невязок. На рисунке 1 представлена зависимость среднеквадратического отклонения (СКО) невязок  $\sigma$  в опорных точках от величины коррекции времени  $\Delta t_j$  начала видеоданных для одного из витков  $j$ ,

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |\mathbf{d}_{ОТМ}(k)|^2}.$$

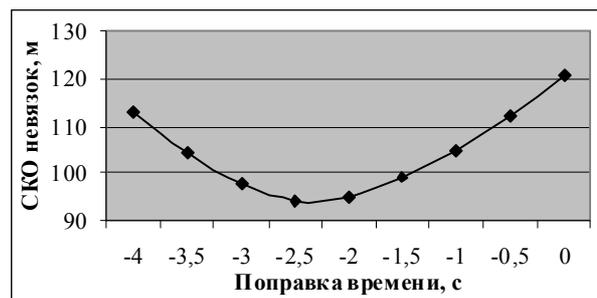


Рисунок 1 – Зависимость СКО невязок  $\sigma$  от величины коррекции времени  $\Delta t_j$

Полученный график имеет выраженный минимум, что показывает возможность уточнения времени  $t_{0j}$  совместно с параметрами  $\mathbf{A}_\lambda$  в процессе калибровки. Отсюда искомые параметры, задаваемые множеством  $Q = \{\mathbf{A}_\lambda, t_{0j}\}$ ,  $\lambda = \overline{1, 3}$ ,  $j = 1, 2, \dots$ , могут быть найдены на основе минимизации функционала

$$\sum_{k=1}^K |\mathbf{d}_{ОТМ}(k)|^2 \rightarrow \min_Q. \quad (8)$$

Для более точного определения взаимной ориентации ПЗС-линеек используем дополнительно общие точки (ОТ). Для каждой ОТ  $c = \overline{1, C}$  минимизируем квадрат кратчайшего расстояния  $|\mathbf{d}_{ОТ}(c)|^2$  между двумя визирными лучами, которые соответствуют одноименным точкам с пиксельными координатами  $(m_{c1}, n_{c1})$  и  $(m_{c2}, n_{c2})$ , сформированным на витках  $j1$  и  $j2$ ,

сканерами  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  соответственно. Введем обозначения,

$$\mathbf{r}_{c1} = \mathbf{B}_{j_1,c1} \mathbf{A}_{\lambda_1} \mathbf{m}_{c1}, \quad \mathbf{r}_{c2} = \mathbf{B}_{j_2,c2} \mathbf{A}_{\lambda_2} \mathbf{m}_{c2},$$

$$\mathbf{r}_c = \frac{\mathbf{r}_{c1} \times \mathbf{r}_{c2}}{|\mathbf{r}_{c1} \times \mathbf{r}_{c2}|}, \quad \mathbf{p}_c = \mathbf{p}_{j_2,c2} - \mathbf{p}_{j_1,c1}.$$

Тогда вектор  $\mathbf{d}_{OT}(c)$  определим исходя из координат  $\hat{\mathbf{g}}_{c1}$ ,  $\hat{\mathbf{g}}_{c2}$  ближайших точек двух визирных лучей,

$$\hat{\mathbf{g}}_{c1} = \mathbf{p}_{j_1,c1} + [(\mathbf{p}_c \times \mathbf{r}_{c2}) \mathbf{r}_c] \mathbf{r}_{c1},$$

$$\hat{\mathbf{g}}_{c2} = \mathbf{p}_{j_2,c2} + [(\mathbf{p}_c \times \mathbf{r}_{c1}) \mathbf{r}_c] \mathbf{r}_{c2},$$

$$\mathbf{d}_{OT}(c) = \hat{\mathbf{g}}_{c2} - \hat{\mathbf{g}}_{c1}.$$

Окончательно процедуру уточнения калибруемых параметров с использованием общих и опорных точек сформулируем в виде задачи минимизации функционала

$$R = \sum_{k=1}^K |\mathbf{d}_{OTM}(k)|^2 + \sum_{c=1}^C |\mathbf{d}_{OT}(c)|^2 \rightarrow \min. \quad (9)$$

Поскольку данная задача не линейна относительно искомым параметрам  $Q$ , решим ее с помощью итерационного алгоритма Левенберга-Марквардта.

**Подготовка и обработка опорной информации.** При определении калибруемых параметров по рассмотренному алгоритму необходимо измерить на изображениях большое число опорных точек. По этой причине ручная процедура измерения координат, например, с использованием электронных карт не подходит для решения данной задачи. Отсюда важным является вопрос подготовки опорной информации, на основе которой можно полностью автоматизировать процесс получения опорных точек  $\{(m_k, n_k), \mathbf{g}_k\}$ ,  $k = 1, 2, \dots$ .

Заметим, что точность измерения геоцентрических координат опорных точек должна соответствовать пространственному разрешению изображений, формируемых калибруемым съемочным устройством, а также точности определения элементов внешнего ориентирования КА. Поэтому географические координаты  $(\varphi, \lambda)$  опорных точек будем определять по изображениям от съемочного устройства ETM+, размещенного на борту КА Landsat 7, а высоту местности  $h$  в соответствующей точке по цифровой модели рельефа (ЦМР) SRTM. Изображения Landsat разрешением 28.5 м трансформированы в картографическую проекцию UTM с учетом рельефа местности и позволяют измерять географические координаты с погрешностью ( $1\sigma$ ) не более 50 м [5].

Разрешение ЦМР SRTM составляет 3", абсолютная погрешность определения высоты в 90% случаев ( $1.6\sigma$ ) не превышает 9 м [6]. Таким образом, нет необходимости выполнять съемку специальных калибровочных полигонов, поскольку изображения Landsat и ЦМР SRTM доступны практически на всю территорию земной поверхности и обеспечивают достаточную для калибровки съемочных устройств КМСС точность измерения координат.

Для идентификации опорных точек вначале выберем множество снимков Landsat  $\{I_i(x, y)\}$ ,  $i = 1, 2, \dots$ , покрывающих регион съемки обрабатываемого изображения КМСС  $I(m, n)$  и имеющих наиболее близкий спектральный диапазон наблюдения. Здесь и далее используется грубая геодезическая привязка изображений КМСС по физической модели с использованием номинальных значений конструктивных параметров.

Для каждого изображения  $I_i(x, y)$  выполним далее следующую последовательность шагов. На первом шаге осуществим геометрическое трансформирование изображения  $I_i(x, y)$  в систему координат  $I(m, n)$  с целью устранения масштабных искажений и взаимного разворота, что позволит в дальнейшем для идентификации одноименных точек использовать алгоритм площадной корреляции. Трансформирование выполним по обратному закону с использованием функций геодезической привязки данных КМСС  $\varphi = \Phi(m, n)$ ,  $\lambda = F(m, n)$  и соответствующих обратных функций  $\Phi_i^{-1}$ ,  $F_i^{-1}$  для  $i$ -го изображения Landsat,

$$\begin{cases} x = \Phi_i^{-1}[\Phi(m, n), F(m, n)], \\ y = F_i^{-1}[\Phi(m, n), F(m, n)]. \end{cases}$$

На полученном изображении  $I_i(m, n)$  сформируем равномерную сетку точек  $(jw, lw)$ ,  $j, l = 1, 2, \dots$  с некоторым шагом  $w$ , для которых далее идентифицируем одноименные точки на снимке  $I(m, n)$ . Для повышения надежности идентификации в небольшой окрестности точки  $(jw, lw)$  вначале выполним поиск характерных объектов. Вокруг полученной таким образом точки с координатами  $I_i(m'_k, n'_k)$  выберем эталонный фрагмент  $B$ , а оптимальное смещение координат на изображении  $I(m, n)$  определим по максимуму нормализованной кросс-корреляционной функции  $\max K(B, P)$ , вычисляемой для всех фрагментов  $P$  внутри некоторой области поиска. После отбраковки ненадежных

значений выполним субпиксельное уточнение координат одноименной точки  $I(m_k, n_k)$ .

В результате получим множество одноименных точек на изображении  $I(m, n)$  КМСС и трансформированном снимке  $I_i(m, n)$  Landsat:  $\{I(m_k, n_k), I_i(m'_k, n'_k)\}$ ,  $k=1, 2, \dots$ . Для каждой точки  $(m'_k, n'_k)$  перейдем в систему координат исходного снимка  $I_i(x, y)$ , в которой становится возможным определить соответствующие геодезические координаты  $(\varphi_k, \lambda_k)$  на эллипсоиде WGS84.

Для точки  $(\varphi_k, \lambda_k)$  вычислим далее ортометрическую высоту  $h_k^o$  по ЦМР SRTM, а также высоту  $\Delta h_k$  превышения геоида над эллипсоидом с использованием модели EGM96, после чего найдем искомую геодезическую высоту местности  $h_k = h_k^o + \Delta h_k$ .

Наконец, определим геоцентрические координаты  $\mathbf{g}_k = (X_k, Y_k, Z_k)^T$  опорной точки на основе полученных геодезических координат  $(\varphi_k, \lambda_k, h_k)$  по формулам,

$$X = (L + h) \cos \varphi \cos \lambda, \quad Y = (L + h) \cos \varphi \sin \lambda, \\ Z = [(1 - e^2)L + h] \sin \varphi, \quad L = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}},$$

где  $e$  – эксцентриситет эллипсоида;  $L$  – радиус кривизны первого вертикала на широте  $\varphi$ ;  $a$  – большая полуось эллипсоида.

В результате получим множество искомых опорных точек  $\{(m_k, n_k), \mathbf{g}_k\}$ ,  $k=1, 2, \dots$ . Заметим, что среди данных точек, полученных с помощью полностью автоматического алгоритма, число

бракованных составляет, как правило, не более 1%. Это позволяет исключить их в дальнейшем на основе соответствующих значений невязок в процессе итерационного определения калибруемых параметров.

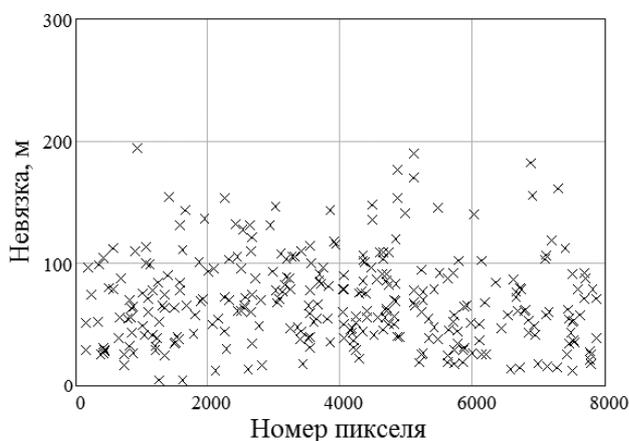
**Результаты.** На рисунках 2, 3 на примере первого канала съемочных устройств МСУ-100 №2 и МСУ-50 представлены полученные в результате калибровки значения невязок в зависимости от номера светочувствительного элемента  $m$ . Из рисунков видно, что в случае МСУ-100 достаточно использовать линейную модель калибровочных параметров  $A_\lambda$ , обеспечиваемая точность которой ( $\sigma = 84.1$  м) отличается от квадратичной ( $\sigma = 78.4$  м) незначительно. Тогда как для МСУ-50, очевидно, необходимо использовать квадратичную модель, для которой получено значение СКО невязок  $\sigma = 93.2$  м.

Величина невязок для опорных точек обусловлена рядом факторов, среди которых выделим следующие основные:

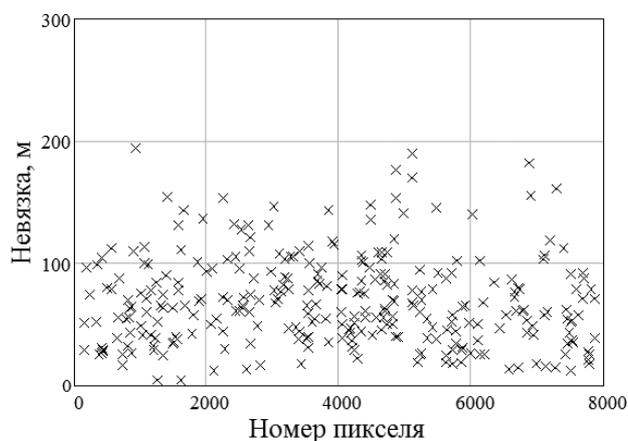
- погрешность определения углового положения КА по навигационным измерениям БОКЗ-М, составляющая 2/20 угловых секунд в зависимости от оси, с учетом высоты полета КА «Метеор-М» 832 км приводит к ошибкам определения координат на поверхности Земли порядка  $\sigma_B = 80$  м;

- погрешность идентификации одноименных точек  $\sigma_u$ , которую примем равной половине разрешения съемочного устройства – 30 м для МСУ-100, 60 м для МСУ-50;

- ошибка измерения координат опорных точек по снимкам Landsat  $\sigma_L = 50$  м.



а



б

Рисунок 2 – Результат калибровки МСУ-100 №2, канал №1:  
а – линейная модель  $N=1$ , б – квадратичная модель  $N=2$

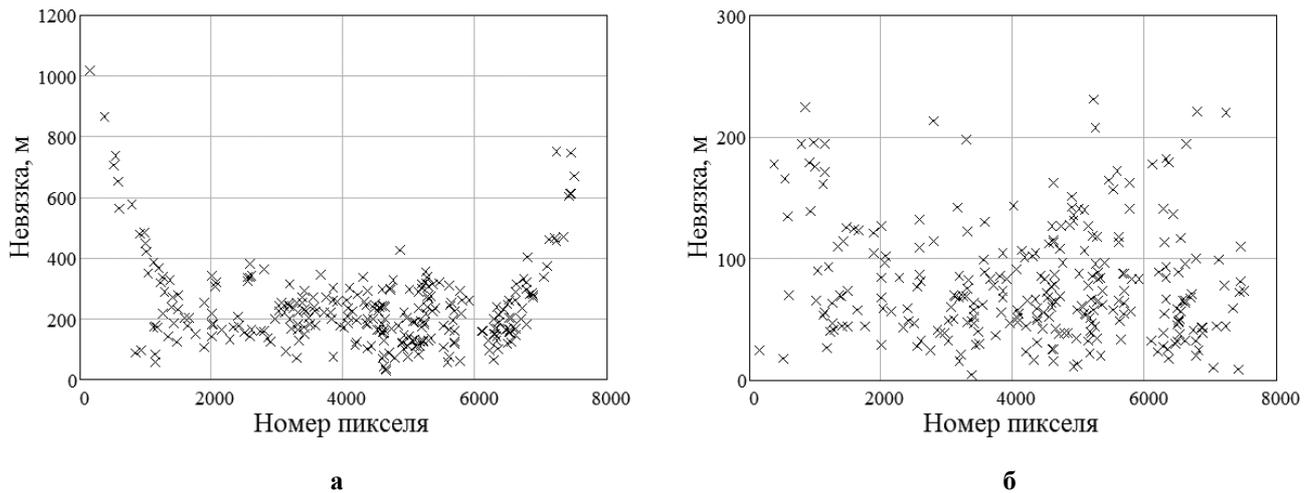


Рисунок 3 – Результат калибровки МСУ-50, канал №1:  
а – линейная модель  $N=1$ , б – квадратичная модель  $N=2$

Названные источники ошибок независимы между собой, поэтому их суммарное воздействие определим  $\sigma = \sqrt{\sigma_B^2 + \sigma_u^2 + \sigma_L^2}$ . В результате имеем:  $\sigma = 99.0$  м для МСУ-100 и  $\sigma = 111.8$  м для МСУ-50. Отсюда, учитывая полученные в результате калибровки значения невязок, можно сделать вывод о том, что рассмотренная полиномиальная модель неявной калибровки адекватно описывает геометрию съемочной системы, обеспечивая точность определения пространственного положения визирных лучей, соответствующую точности исходных данных.

После выполнения калибровки съемочных устройств была произведена оценка точности расчетов высоты объектов с помощью прямой фотограмметрической засечки. Для этого на изображениях первого и третьего каналов, обеспечивающих наибольшую стереобазу, каждого съемочного устройства идентифицировались одноименные точки, соответствующие объектам земной поверхности. После расчета геодезических координат  $(\varphi, \lambda, h)$  вычислялась невязка  $\delta = h - \hat{h}$  по сравнению с истинной высотой  $\hat{h}$ , полученной для заданных координат  $(\varphi, \lambda)$  по цифровой модели рельефа SRTM. Таким образом, среднеквадратическая ошибка расчета высоты составила 215.3 м для МСУ-50 и 275.0 м для МСУ-100, что согласуется с полученными ранее теоретическими оценками [3].

**Закключение.** Рассмотренная в настоящей статье методика позволила в автоматическом режиме выполнить геометрическую калибровку комплекса многозональной сканерной съемки. Полученные в результате оценки точности показали адекватность предложенной полино-

миальной модели съемочного устройства сканового принципа действия. Применение откалиброванной модели съемочных устройств совместно с навигационными измерениями комплекса ККВО позволяет использовать изображения КМСС для оперативного определения высоты верхней границы облачности и скорости ее движения, а также для формирования цветосинтезированных изображений.

#### Библиографический список

1. Акопов Г.А., Семенов В.Т., Чуркин А.Л. Задачи, решаемые космическим аппаратом «Метеор-М» по мониторингу Земли и околоземного космического пространства // Солнечно-земная физика. 2004. Вып.5. С. 40-42.
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» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: «ООО «Азбука-2000», 2007. Вып.4. Т.1. С.222-228.
3. Кузнецов А.Е., Пошехонов В.И. Оценка высоты облачности по данным комплекса многозональной сканерной съемки КА «Метеор-М» // Цифровая обработка сигналов. 2009. №3. С. 41-46.
4. Remondino F., Fraser C. Digital camera calibration methods: considerations and comparisons // International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and the Spatial Sciences, 2006, 36(5). С. 266-272.
5. Tucker C.J., Grant D.M., Dykstra J.D. NASA's global orthorectified landsat data set // Photogramm. Eng. Remote Sens., 2004, 70(3). С. 313-322.
6. Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E., Chapin E.C., Martin J.M., Daffer W., Hensley S. An assessment of the SRTM topographic products, Technical Report JPL D-31639, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 2005.