

# **КОРРЕКЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ ВИДЕОДАННЫХ С ЦИФРОВЫХ АЭРОСЪЕМОЧНЫХ КАМЕР, ВЫЗЫВАЕМЫХ УГЛОВЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ НОСИТЕЛЯ ПО КРЕНУ**

**А.С. Василейский**

*Институт космических исследований РАН, АНО "Космос-НТ"  
117997 Москва, Профсоюзная 84/32  
E-mail: asvas@wildcat.iki.rssi.ru*

Автоматическая геометрическая коррекция изображений земной поверхности, получаемых цифровыми аэрокамерами на линейных ПЗС-детекторах, может проводиться с использованием выдаваемых гироскопическими датчиками точных данных об угловых элементах внешнего ориентирования в моменты времени, соответствующие регистрации каждой из строк. При отсутствии или недостаточной точности таких данных предлагается проводить автоматизированную компенсацию влияния угловых колебаний по крену путем анализа самих изображений, получаемых камерой.

Разработанный метод решения такой задачи основан на оценке по методу наименьших квадратов с субпиксельной точностью величины взаимных сдвигов соседних строк изображений. Для обеспечения высокой надежности оценки, величина сдвигов оценивается по набору фрагментов строк, а затем используется медианное значение. Полученный вектор величин взаимных сдвигов строк подвергается высокочастотной и низкочастотной фильтрации для исключения шумовых составляющих.

Реализующее предложенный метод специализированное программное обеспечение позволяет автоматически корректировать искажения, вызываемые угловыми колебаниями по крену и проявляющиеся в виде характерных искривлений прямолинейных участков границ объектов, что существенно упрощает процедуры интерпретации получаемых изображений и идентификации отдельных объектов на них.

Представленные примеры автоматизированной коррекции изображений, полученных как при летных испытаниях разрабатываемой в АНО "Космос-НТ" цифровой топографической камеры ЦТК-140, так и при численном моделировании процесса съемки, подтверждают эффективность разработанного метода и позволяют оценить геометрическую точность результатов коррекции.

## **Введение**

При аэросъемке земной поверхности цифровыми камерами изображения формируются за счет построчной регистрации отраженного солнечного излучения линейными ПЗС детекторами в моменты времени, разделенные заданным интервалом. В силу собственного линейного и углового движения самолета в полете, каждая регистрируемая строка изображения характеризуется своими элементами внешнего ориентирования (ЭВО). Неизбежные возмущения движения самолета и вибрации, передающиеся съемочной системе, приводят к существенным геометрическим искажениям формируемых изображений по сравнению со снимками в центральной проекции, получаемыми традиционными кадровыми камерами [1, 2, 3]. Непрерывное изменение ЭВО в процессе сканирования усложняет последующую фотограмметическую обработку результатов съемки [1, 4].

На борту самолета камера обычно устанавливается на гиростабилизированной платформе, которая должна обеспечивать неизменность угловых ЭВО в процессе съемки, компенсируя угловые колебания самолета [2]. В реальных условиях эти колебания, а особенно их высокочастотные составляющие, компенсируются гиростабилизированной платформой с ограниченной точностью, и камера осуществляет колебания по всем трем осям (тангажа, крена и рыскания) с разными частотами и амплитудами.

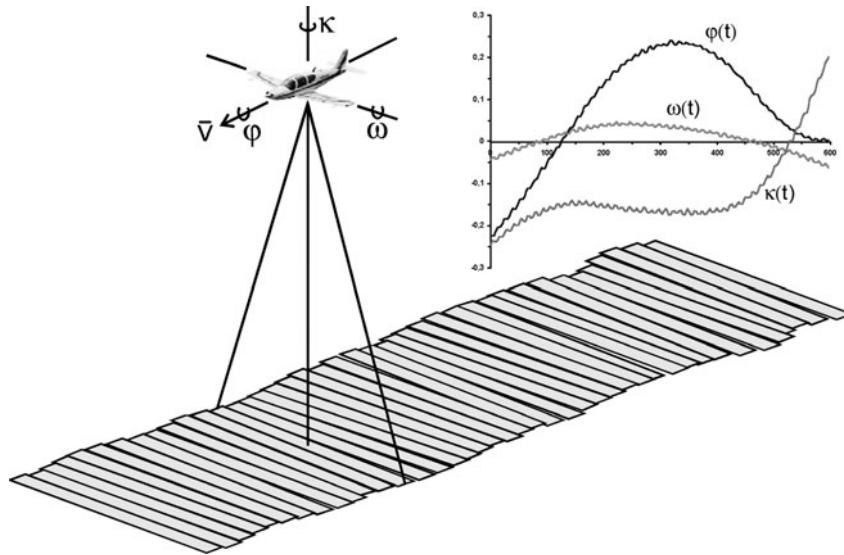


Рис. 1. Геометрические искажения изображений, получаемых аэрокамерами на линейных ПЗС детекторах, вызываемые изменением угловых и линейных ЭВО в процессе съемки.

Для автоматической компенсации описанного эффекта и геометрической коррекции получаемых изображений используют информацию с прецизионных датчиков в составе инерциальных навигационных систем и аппаратуры автономной спутниковой навигации, устанавливаемых совместно со съемочной камерой [2, 5]. Навигационная аппаратура должна обеспечивать измерения угловых и линейных ЭВО в моменты регистрации каждой из строк изображения с высокой точностью (порядка 5-10" и 10 см соответственно).

При отсутствии точных навигационных измерений геометрическая коррекция получаемых изображений может осуществляться путем их совмещения с заранее полученными фотопланами [1, 4]. Для обеспечения высокой точности при этом требуется идентификация очень большого количества опорных точек (ОТ). Искажения формы объектов на изображениях затрудняют идентификацию ОТ. Одним из путей повышения точности коррекции может являться детектирование и сопоставление прямолинейных участков границ объектов [3].

Параметры угловых колебаний самолета по трем осям существенно различаются. Каждая из составляющих углового движения оказывает свое влияние на изображение и характер привносимых ими искажений различен. Угловые колебания по крену установленной на самолете камеры во время съемки привносят наиболее заметные на глаз искажения: прямолинейные участки границ объектов принимают волнобразный вид (см. рис.3). Механизм появления таких искажений заключается в том, что при колебаниях камеры по крену соседние строки на изображении сдвигаются друг относительно друга. Описанный эффект можно частично скомпенсировать путем анализа самих изображений.

### Алгоритм коррекции

Предлагаемый метод автоматизированной геометрической коррекции искажений, вызываемых угловыми колебаниями носителя по крену, основан на оценке величины взаимных сдвигов соседних строк изображений с субпиксельной точностью и последующей компенсации этих сдвигов.

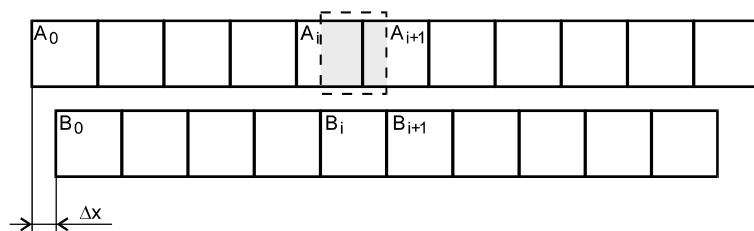


Рис. 2. Линейная комбинация значений яркости пикселов при субпиксельном сдвиге соседних строк изображения.

Оценка осуществляется по методу наименьших квадратов (МНК), при этом определяется величина сдвига соседних строк, обеспечивающая минимизацию различий соответствующих пикселов в соседних строках. Обозначим значения яркости пикселов двух соседних строк изображения  $A_i$  и  $B_i$ , где  $i=1\dots N$ ,  $N$  –

количество пикселов в строке. Предположим, что строка  $B$  сдвинута относительно строки  $A$  на неизвестную величину  $\Delta x$ , меньшую размера пикселя (см. рис.2). Предполагая сходство соответствующих пикселов соседних строк, запишем выражение линейной комбинации значений яркости:  $B_i \approx A_i \cdot (1 - \Delta x) + A_{i+1} \cdot \Delta x$ . Целевая функция  $F(\Delta x)$  для оценки величины смещения  $\Delta x$  по МНК имеет в этом случае вид:  $F(\Delta x) = \sum_i (A_i \cdot (1 - \Delta x) + A_{i+1} \cdot \Delta x - B_i)^2 \rightarrow \min$ .

Оценка сдвига строки имеет вид:

$$\Delta \hat{x} = \sum_i (B_i - A_i)(A_{i+1} - A_i) / \sum_i (A_{i+1} - A_i)^2.$$

Субпиксельной оценке предшествует оценка величины сдвигов соседних строк на пиксельном уровне корреляционным методом. При этом определяется целочисленная величина сдвига  $\Delta i$ , при которой обеспечивается максимум корреляционной функции:

$$C(\Delta i) = \frac{\sum (A_{i+\Delta i} \cdot B_i)}{\sqrt{\sum A_{i+\Delta i}^2} \sqrt{\sum B_i^2}} \rightarrow \max.$$

Наличие на изображении даже отдельных ярко выраженных диагонально ориентированных объектов может привести к неправильной оценке величины сдвига соседних строк, поскольку такие объекты будут доминировать над неконтрастными деталями на изображении. Для того чтобы избежать указанного эффекта, целесообразно проводить оценки сдвигов в пределах нескольких фрагментов строки, а затем отсеивать неправильные оценки путем медианной фильтрации.

Получаемые оценки сдвигов строк содержат неизбежные случайные ошибки. Реальные изменения угловых ЭВО имеют гармонический характер и ограниченные частоты колебаний. При установке съемочной аппаратуры на гиростабилизированной платформе низкочастотные изменения угловых ЭВО незначительны. Поэтому для устранения ошибок и повышения точности полученный вектор сдвигов строк целесообразно подвергать высокочастотной и низкочастотной фильтрации, выделяя только среднечастотную составляющую.

Таким образом, разработанный алгоритм оценки сдвигов строк изображения включает следующие этапы:

- каждая строка изображения разбивается на набор фрагментов фиксированного размера;
- для каждого из фрагментов корреляционным методом определяется целочисленная величина сдвига текущей строки относительно предшествующей;
- по методу наименьших квадратов оценивается величина дополнительного субпиксельного сдвига фрагмента строки относительно предшествующей строки;
- в качестве величины сдвига строки принимается медианное значение сдвигов, полученных для отдельных фрагментов;
- полученный вектор величин сдвигов подвергается высокочастотной и низкочастотной фильтрации для исключения шумовых составляющих.

Коррекция изображения осуществляется путем сдвига строк в соответствии с определенными величинами сдвигов. При этом все пиксели  $i$ -й строки смещаются на накопленную величину сдвига  $S_i$ :

$$S_i = \sum_{j=1}^i \Delta x_j.$$

Значения яркости пикселов результирующего изображения  $A'_i$  определяются путем линейной интерполяции:  $A'_i = A_i \cdot (1 - S_i) + A_{i+1} \cdot S_i$ .

## Программное обеспечение

Предложенный алгоритм реализован в виде специализированной программы "DeChatter", позволяющей проводить коррекцию изображений в автоматическом или интерактивном режимах. В автоматическом режиме программа "DeChatter" производит оценку величин сдвигов строк и коррекцию без участия оператора в соответствии с заданными параметрами, которые включают размер фрагмента строки, максимальный допустимый сдвиг соседних строк и размеры окон фильтров высокочастотной и низкочастотной фильтрации.

Главное окно программы "DeChatter", приведено на рис.3. В левой части отображается фрагмент подлежащего коррекции изображения, в правой приведены результаты обработки. График полученных оценок величины сдвига текущей строки относительно предшествующей показывается в увеличенном виде (помечен **a** на ри-

сунке, величины сдвигов, соответствующие одному пикселу показаны пунктирной линией). График накопленной величины сдвига строк отображается в натуральном масштабе (на рисунке помечен *b*).



Рис.3. Главное окно программы “*DeChatter*”. Слева отображается фрагмент подлежащего коррекции изображения. Приведенное изображение получено при летных испытаниях цифровой аэрокамеры ЦТК-140 (съемка с высоты 6000 м, 06.05.2004). Справа отображаются график оценки сдвиги строки относительно предыдущей (*a*) и график накопленной величины сдвига строки (*b*).

В интерактивном режиме оператор имеет возможность выполнять отдельные операции алгоритма, выбирая параметры и анализируя отображаемые на экране результаты. Для тонкой настройки параметров алгоритма перед выполнением окончательной коррекции программа выводит на экран специальное окно – “мастер”, содержащее пять вариантов коррекции с разными параметрами (см. рис. 4).

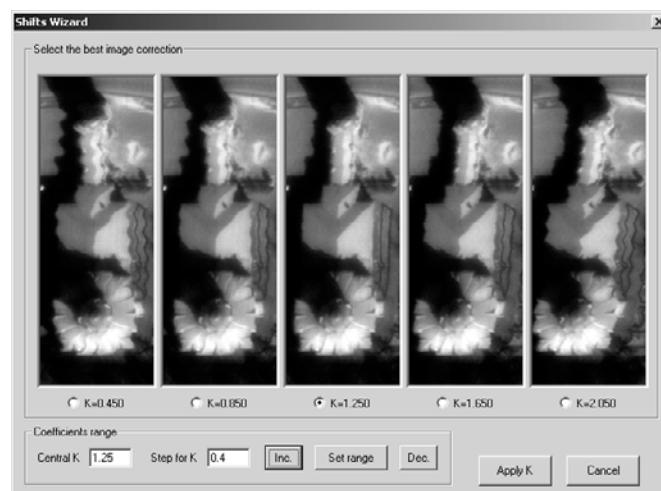


Рис.4. Окно “мастер” тонкой настройки параметров программы “*DeChatter*”.

Варьируя параметры, оператор должен добиться того, чтобы визуально лучший результат отображался в центральном окне, а расположенные по бокам окна содержали бы в одинаковой степени искаженные фрагменты.

## Оценка точности

Для оценки точности предложенного алгоритма проведена автоматическая коррекция тестового изображения, сгенерированного специализированным моделирующим программным обеспечением<sup>1</sup> в соответствии с заданным законом изменения угла крена. Фрагмент использованного тестового изображения показан на рис.5. Поверх изображения наложена сетка, демонстрирующая привнесенные при моделировании искажения. Отметим, что при автоматической коррекции использовалось изображение без этой сетки. В правом окне показаны величины сдвигов, рассчитанные в соответствии с заданным при моделировании законом изменения угла крена (график помечен цифрой 1), и полученные оценки накопленных сдвигов строк, использовавшиеся при коррекции (график помечен цифрой 2). Отметим, что полученные оценки сдвигов хорошо согласуются с внесенными при моделировании смещениями. Различия между ними практически постоянны, и поэтому не влияют на качество скорректированного изображения.

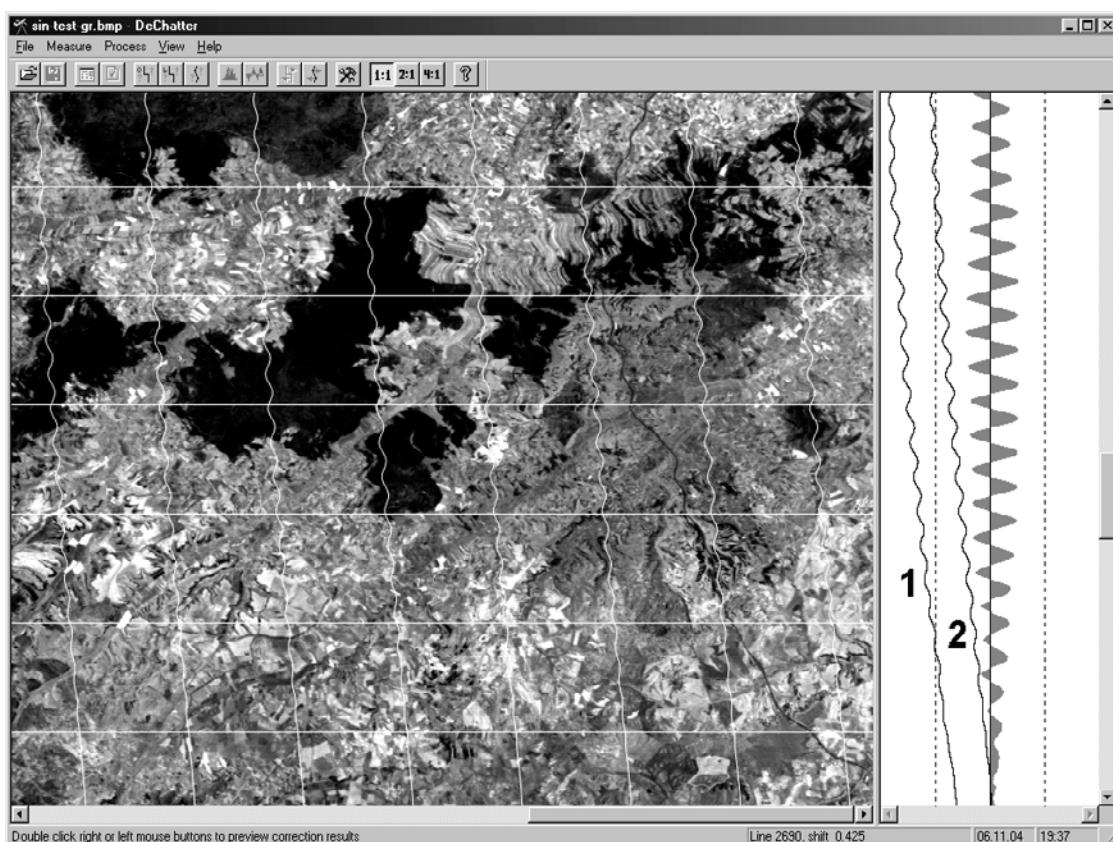


Рис.5. Оценка сдвигов строк на смоделированном тестовом изображении программой “DeChatter”.

При сравнении полученных оценок с привнесенными при моделировании сдвигами средняя ошибка определения сдвига соседних строк составила 1,9% пикселя (СКО = 2,9%). Средняя ошибка определения накопленных сдвигов строк составила 0,47 пикселя. Результат коррекции смоделированного изображения представлен на рис.6.

## Результаты коррекции

Разработанное программное обеспечение использовалось для коррекции изображений, полученных в процессе летных испытаний разрабатываемой в АНО "Космос-НТ" цифровой топографической камеры ЦТК-140 [6]. Пример изображения, полученного при съемке с высоты 6000м представлен на рис.7 слева. Справа представлен фрагмент этого изображения, скорректированного программой "DeChatter" в автоматическом режиме. Присутствовавшие искажения в виде волнообразных границ зданий и дорог практически не заметны на скорректированном изображении.

<sup>1</sup> Описание моделирующего программного обеспечения приведено в статье “Методика и программное обеспечение обработки алгоритмов геометрической коррекции изображений, получаемых цифровыми аэрокамерами”, опубликованной в настоящем сборнике.

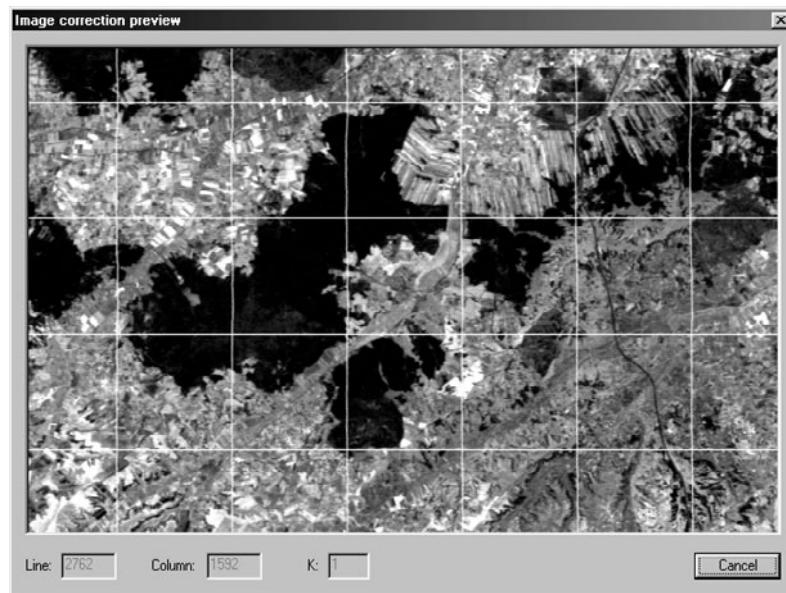


Рис. 6. Результат коррекции смоделированного изображения программой “DeChatter”.



Рис. 7. Фрагмент реального изображения, полученного при летных испытаниях камеры ЦТК-140 и скорректированного программой “DeChatter” в автоматическом режиме.

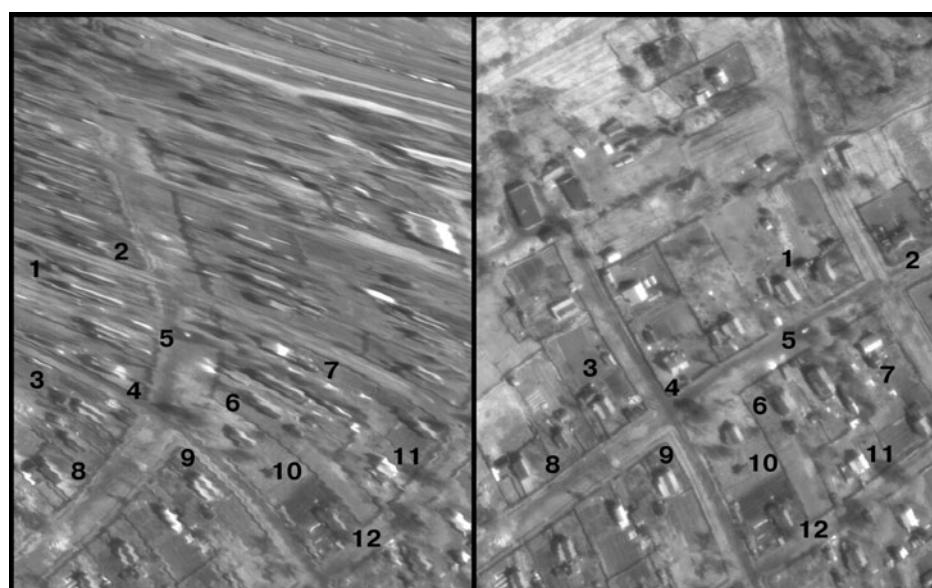


Рис. 8. Фрагмент изображения, полученного цифровой камерой ЦТК-140 на заарретированной гироплатформе при маневре самолета, и результат автоматической коррекции.

Программа "DeChatter" может использоваться и при значительно больших искажениях. Пример автоматической коррекции изображения, полученного цифровой камерой ЦТК-140 на заарретированной гироплатформе при маневре самолета, представлен на рис.8. Цифрами на рисунке обозначены соответствующие объекты на исходном и скорректированном изображениях.

## Выводы

Разработанная программа "DeChatter" реализует предложенный метод автоматизированной коррекции искажений, вызываемых угловыми колебаниями по крену цифровой аэросъемочной камеры на линейных ПЗС детекторах. Коррекция таких искажений облегчает визуальный анализ результатов съемки. Кроме того, такая коррекция позволяет существенно упростить процедуры автоматической интерпретации получаемых изображений и идентификации отдельных объектов на них. Проведенные эксперименты продемонстрировали эффективность метода и подтвердили высокую точность результатов коррекции (средняя ошибка не более 0,5 размера пикселя).

## Литература

1. *McGwire K.C.* Mosaicing airborne scanner data with the Multiquadric Rectification technique // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1998, Vol.64, № 6, P.601-606.
2. *Chen T., Shibasaki R., Shunji M.* Development and calibration of the airborne Three-Line Scanner (TLS) imaging system // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2003, Vol.69, № 1, P.71-78.
3. *Lee C., Theiss H.J., Bethel J.S., Mikhail E.M.* Rigorous mathematical modelling of airborne pushbroom imaging systems // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2000, Vol.66, № 4, P.385-392.
4. *Chen L.C., Rau J.Y.* Geometric correction of airborne scanner imagery using orthophotos and triangulated feature point matching // Int. J. Remote Sensing, 1993, Vol.14, № 16, P.3041-3059.
5. *Skaloud J., Schwarz K.P.* Accurate orientation for airborne mapping systems // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2000, Vol.66, № 4, P.393-401.
6. *Аванесов Г.А., Киенко Ю.Л.* Цифровые аэросъемочные комплексы // Геопрофи, 2004. Т.2. № 1. С.8-12.