

Комбинированный метод коррекции последствий неравномерности чувствительности датчиков спутниковой съемочной системы сканового типа

В. Гусев

Московский авиационный институт (НИУ), Москва, Россия
gusev3@mail.ru

Аннотация

Радиометрическая коррекция первичных спутниковых изображений является весьма актуальной задачей. К этому классу относится коррекция вертикальных полос на спутниковых изображениях, возникающих ввиду деградации характеристик датчиков. Существующие методы выравнивания яркости по столбцам изображения не идеальны, и не всегда способны учитывать сильные естественные изменения яркости на изображении из-за рельефа местности или облачности. Предлагается комбинированный метод коррекции, который сводится к корректировке перепада яркости по двумерной гистограмме яркостей пар пикселей между столбцами, либо к анализу особенностей изображения с помощью рассмотрения локальных статистических характеристик разностей столбцов изображения. Подобный анализ позволил определять одноименные гладкие участки, по которым можно точнее определить искусственный скачок яркости.

Ключевые слова: обработка спутниковых изображений, радиометрическая коррекция, яркостные искажения, структурные искажения, космические изображения, удаление вертикальных полос.

1. ВВЕДЕНИЕ

Особенностью рассматриваемой спутниковой съемки является ее скановый принцип. Для регистрации изображения используется линейка из ПЗС матриц, расположенных в два ряда с перекрытиями. Из-за рассогласования чувствительности датчиков появляются вертикальные полосы различной ширины на изображениях.

Коррекцию подобных искажений можно выполнять с помощью двух технологий: по данным бортовой калибровки датчиков и путем статистического анализа изображения, искаженного структурным шумом [1]. Однако технология коррекции изображений по данным бортовой калибровки требует периодического, довольно частого проведения сеансов калибровки, так как характеристики датчиков могут значительно изменяться за несколько дней [1]. Также не всегда бывают доступны данные бортовой калибровки. Поэтому требуются надежные статистические методы. Сложность создания таких методов заключается в том, что при определении искусственного перепада яркости между столбцами изображения могут оказывать большее влияние естественные перепады, вызванные изменениями в характере местности (например, при появлении облаков). Требуется определенный способ селекции и обработки данных о яркостях пикселей для правильного выравнивания вертикальных полос.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Модель искажений представляется в виде

$$g(x,y) = a(x) \cdot f(x,y) + b(x), \quad (1)$$

где $f(x,y)$ – изображение без помех высотой h и шириной w пикселей; $g(x,y)$ – изображение с искажениями; $a(x)$, $b(x)$ – коэффициенты, зависящие от номера столбца. Задачей является получение приближенного неискаженного изображения. На изображении искажения представляются в виде вертикальных полос по всей высоте. На рис. 1 приводится пример изображения, полученного спутником Ресурс-ДК, с искажениями яркости.

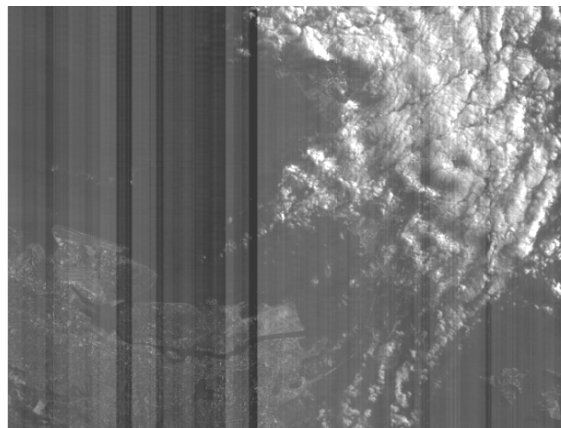


Рис. 1. Исходное изображение с искажениями

3. МЕТОД КОРРЕКЦИИ

Используется известное предположение [2], что разность яркостей соседних пикселей описывается с помощью функции плотности вероятности

$$p_{LG}(v; \theta) = Ap_L(v; s) + (1-A)p_G(v; \sigma^2), \quad (2)$$

где вектор параметров $\theta = [s; \sigma^2; A]$; v – разность яркостей, а p_L и p_G – следующие функции распределения вероятностей Лапласа и Гаусса:

$$p_L(v; s) = \frac{1}{2s} \exp\left(-\frac{|v|}{s}\right), \quad p_G(v; \sigma^2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{v^2}{2\sigma^2}\right). \quad (3)$$

В случае искажений по формуле (1), при рассмотрении разностей пар пикселей соседних столбцов с фиксированным значением яркости пикселей одного из столбцов, разности будут описываться по подобному закону со смещением математического ожидания (МО). Тогда, отдельно для каждого уровня яркости пикселей первого столбца по максимуму гистограммы можно определить соответствующий уровень яркости во втором столбце.

Обработка ведется по столбцам. В каждый момент времени рассматриваются два очередных соседних столбца. Обозначим как p_1 и p_2 два соседних столбца пикселей эталонного изображения $f(x,y)$, а \bar{p}_1 и \bar{p}_2 – соответствующие столбцы из $g(x,y)$. Будем считать, что пиксели \bar{p}_1 имеют эталонный уровень яркости, а пиксели из \bar{p}_2 искажены $\bar{p}_2 = a_2 p_2 + b_2$.

Далее строится двумерная гистограмма H_{12} яркостей для \bar{p}_2 и \bar{p}_1 . Значение H_{12} в некоторой позиции (v_1, v_2) соответствует числу соседних пар пикселей, для которых яркость первого пикселя v_1 , второго – v_2 .

Для уровней яркости $q = \overline{0, V_{max} - 1}$ пикселей первого столбца, где V_{max} – число градаций яркости, находится соответствующий уровень яркости пикселей второго столбца $m(q) = \operatorname{argmax}_j [H_{12}(q, j)]$. Данный процесс соотносится с нахождением пика распределения и оценки МО, рассмотренного ранее распределения.

Задача – определить оценки коэффициентов \hat{a}_2 и \hat{b}_2 линейного преобразования яркостей. Имея массив найденных соответствий яркостей q и $m(q)$, применяя модель линейной регрессии и метод наименьших квадратов, находим данные коэффициенты.

Практическая реализация требует учета различных факторов, вводится ряд дополнительных условий. Так, например, вследствие обработки по столбцам, когда все предыдущие коэффициенты учитываются в общей формуле

$$a_{общ.} := a_2 \cdot a_{общ.}, b_{общ.} := a_2 \cdot b_{общ.} + b_2, \quad (4)$$

то для предотвращения накопления ошибок важно надежное вычисление коэффициентов. Для этого производится фильтрация исходных пар пикселей и вводится ряд ограничений: на допустимые значения коэффициентов a_2 и b_2 , на минимальные учитываемые значения в гистограмме H_{12} , на минимальную ширину диапазона значений при использовании линейной регрессии и т.д. Другим способом снижения вероятности ошибок является уменьшение количества раз использования формулы (4). Если величины \hat{a}_2 и \hat{b}_2 такие, что $\hat{a}_2 p_2 + \hat{b}_2$ практически не отличается от p_2 , то можно оставить коэффициенты $a_{общ.}$ и $b_{общ.}$ без изменений для текущего столбца. Так, например, для $|\hat{b}_2|$ можно задать порог, равный 1, только после которого будут учитываться значения корректировок. Полосы с перепадом менее чем в 1 значение яркости остаются практически незаметны глазу.

Если из-за ограничений вычисление корректировки невозможно, то применяется альтернативный метод коррекции.

Суммарно алгоритм с псевдокодом:

1. Сглаживание $g(x, y)$ вертикальной усредняющей маской.
2. Устанавливаются пороги: `porog_sko`, `porog_num`, `porog_range`, `porog_a`, `porog_b`.
3. $a_{общ.} = 1$, $b_{общ.} = 0$.
4. For $j=2$ to w .
5. Получаем два соседних столбца \bar{p}_1 и \bar{p}_2 , соответствующих позициям $j-1$ и j .
6. Вычисляем МО и СКО (среднеквадратическое отклонение) для разностей пикселей \bar{p}_2 и \bar{p}_1 .
7. Инициализируем массив двумерной гистограммы H_{12} и массивы m_1 и m_2 для линейной регрессии, $k=0$;
8. For $i=1$ to h .

9. if $(\bar{p}_1(i) > 0$ and $\bar{p}_1(i) < V_{max} - 1$ and $\bar{p}_2(i) > 0$ and $\bar{p}_2(i) < V_{max} - 1$ and $|\bar{p}_2 - \bar{p}_1 - MO| < CKO \cdot porog_sko$).
10. $H_{12}(\bar{p}_1(i), \bar{p}_2(i)) = H_{12}(\bar{p}_1(i), \bar{p}_2(i)) + 1$.
11. For $i=0$ to $V_{max} - 1$.
12. $v = \operatorname{argmax}_q [H_{12}(i, q)]$, $num = H_{12}(i, v)$.
13. if $(num > porog_num)$ $k=k+1$, $m_1(k)=i$, $m_2(k)=v_{2m}$ End.
14. End.
15. if (массивы m_1 и m_2 не пустые).
16. if $(\max(m_1) - \min(m_1) > porog_range)$ // (для надежного вычисления диапазон не должен быть узким).
17. По МНК для модели линейной регрессии по массивам m_1 и m_2 находим коэффициенты a_2 и b_2 .
18. if $(|a_2 - 1| > porog_a)$ $a_2=1$, $b_2 = \frac{\sum_{i=1}^k (m_2(i) - m_1(i))}{k}$
19. End // (ограничение на значения a_2 , сильно отличающиеся от 1).
20. Else.
21. $a_2=1$, $b_2 = \frac{\sum_{i=1}^k (m_2(i) - m_1(i))}{k}$.
22. End.
23. Else.
24. Альтернативный метод коррекции.
25. End.
26. if $(|b_2| > porog_b)$ $a_{общ.} = a_2 \cdot a_{общ.}$, $b_{общ.} = a_2 \cdot b_{общ.} + b_2$.
27. End // (корректируем, если превышено минимальное значение яркостного сдвига).
28. $\hat{f}(j, y) = \frac{g(j, y) - b_{общ.}}{a_{общ.}}$ для всех y .
29. End.
30. Постобработка.
31. Поправка общего уровня яркости $\hat{f}(x, y) := \hat{f}(x, y) + \frac{\sum_{j=1}^w \sum_{i=1}^h (g(j, i) - \hat{f}(j, i))}{hw}$.

4. АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ МЕТОД КОРРЕКЦИИ

Если из-за каких-то введенных ограничений невозможно применение основного алгоритма коррекции для текущего столбца, то для него используется альтернативный метод на основе анализа локальных характеристик [3]. В данном случае осуществляется корректировка только яркостного сдвига. Используется стратегия, заключающаяся в том, что искусственный перепад яркости следует определять на одноименных объектах изображения, тогда будет убрано влияние естественных изменений яркости.

В каждой точке y двух столбцов p_1, p_2 вычисляется локальная дисперсия разностей яркостей пикселей между столбцами

$$D_{p_1, p_2}(y) = \frac{\sum_{i=y-a_h}^{y+a_h} (p_2(i) - p_1(i) - E_{p_1, p_2}(y))^2}{2a_h + 1}, \text{ где локальное среднее}$$

$$E_{p_1, p_2}(y) = \frac{\sum_{i=y-a_h}^{y+a_h} (p_2(i) - p_1(i))}{2a_h + 1}, \quad y = \overline{a_h + 1, h - a_h}.$$

Точки с граничными значениями яркостей 0 и $V_{max} - 1$ не учитываются. Такие области игнорируются, поскольку в них истинное значение яркости может выходить за пределы диапазона.

Сначала происходит сортировка массива E_{p_1, p_2} . Получается отсортированная последовательность E_{p_1, p_2}^S и соответствующе упорядоченная последовательность D_{p_1, p_2}^S . Данные массивы укорачиваются с обоих концов в равных долях, пока диапазон значений для E_{p_1, p_2}^S не будет меньше допустимой величины η_1 . Получаем новые соответствующие массивы $E_{p_1, p_2}^C, D_{p_1, p_2}^C$. Из элементов E_{p_1, p_2}^C выбираются те,

которым соответствует маленькая локальная дисперсия $D_{p_1, p_2}^c(i) < p_D$, и по ним, как среднее, вычисляется корректировка \hat{b}_2 . Это позволяет более точно определять величину коррекции. Идея состоит в том, что если локальные участки столбцов принадлежат одноименным объектам, то соответствующие локальные дисперсии разностей яркостей пикселей будут иметь малые значения.

Предварительная фильтрация связанных массивов D_{p_1, p_2} и E_{p_1, p_2} по массиву E_{p_1, p_2} приводит к более стабильным результатам. Это объясняется тем, что медианное значение разностей пикселей соседних столбцов будет оценкой смещения яркости при достаточно большой выборке, стремящейся к бесконечности с учетом функции распределения разностей (2) и модели искажения яркости в виде сдвига. Давая допуск в районе медианы на отбор нужных участков по дополнительным эвристическим критериям, удалось повысить качество обработки, когда выборка не является столь большой.

Кроме этого, введен минимальный порог на количество отбираемых из массива E_{p_1, p_2}^c значений, по которым вычисляется средняя разность (не меньше $\eta_2=10\%$ от общего числа для столбца), в противном случае корректировка \hat{b}_2 вычисляется по всем пикселям $\hat{b}_2 = \frac{\sum_{i=1}^h (p_2(i) - p_1(i))}{h}$.

5. ПОСТОБРАБОТКА

Предлагается этап постобработки. Производится повторная более грубая корректировка $g(x, y)$ с удалением только явно выделяющихся полос (к примеру, если перепад средних значений яркости более 10), получаем изображение $\bar{f}(x, y)$. По значениям $\sum_{i=1}^h \bar{f}(x, i)$ для всех x строится массив значений A_1 скользящего среднего с довольно большим окном. Задание большого окна позволяет учесть на изображении общую информацию о яркости и сгладить влияние оставшихся полос. Далее подобное скользящее среднее A_2 строится по $\bar{f}(x, y)$, и затем значения $\hat{f}(x, y)$ обновляются $\hat{f}(x, y) := \bar{f}(x, y) + A_1(x) - A_2(x)$. Это во многом решает проблемы неустойчивой коррекции, возникающие в процессе обработки изображений предложенными методами в случае накопления ошибок.

На рис. 2. приведен пример обработки неоднородного по текстуре изображения, представленного ранее. Видно, что коррекция на сложных участках выполняется верно.

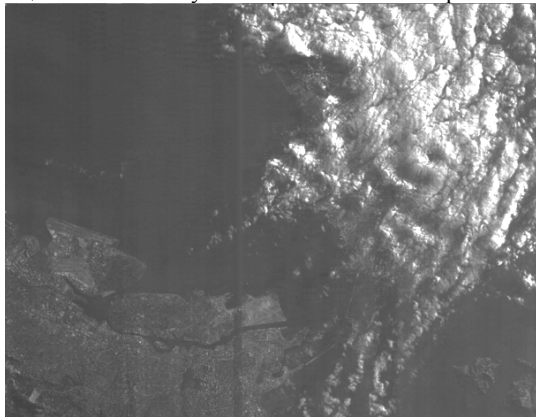


Рис. 2. Результат обработки изображения

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена проблема радиометрической коррекции спутниковых изображений. Предложен метод удаления вертикальных полос на изображениях, отличающийся повышенной надежностью благодаря комбинированному подходу, дополнительному контролю и улучшению корректировок яркостей. Используется вычисление корректировок с применением двумерной гистограммы яркостей пикселей соседних столбцов, либо локальный метод на основе рассмотрения статистических характеристик фрагментов разностей столбцов изображения. Подобный локальный анализ позволил определять одноименные гладкие участки столбцов изображения, по которым можно корректнее определить искусственный скачок яркости, свободный от влияния естественных изменений сюжета изображения в строчном направлении. Дополнительный контроль с использованием скользящего среднего по средним яркостям столбцов для сопоставления исходного и скорректированного изображения позволяет исправить возможную неправильную коррекцию в глобальном масштабе. Все это позволило обрабатывать изображения с существенными нерегулярными перепадами яркости, характерными для спутниковых изображений. Также метод является достаточно быстрым и нетребовательным к размеру оперативной памяти, поскольку в каждый момент времени требуются только соседние столбцы изображения.

7. ССЫЛКИ

1. Злобин В.К., Еремеев В.В. Обработка аэрокосмических изображений. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 288 с.
2. Odoma D., Milanfar P. Modeling Multiscale Differential Pixel Statistics. Electrical Engineering Department, University of California, Santa Cruz CA. 95064 USA.
3. Гусев В.Ю. К вопросу фильтрации структурных искажений на космических оптико-электронных изображениях // Геодезия и картография, 2012. – № 12. – М.: ФГУП “Государственный картографический и геодезический центр”. – С. 111 - 114.

Об авторах

Гусев Владимир – аспирант Московского авиационного института (НИУ).

E-mail: gusev3@mail.ru