

УДК 004.932: 528.831

ОЦЕНКА РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИХ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Еремеев В.В., д.т.н., директор НИИ «Фотон» РГРТУ

Князьков П.А., аспирант НИИ «Фотон» РГРТУ

Москвитин А.Э., к.т.н., с.н.с. НИИ «Фотон» РГРТУ, foton@rgta.ryazan.ru

Ключевые слова: дистанционное зондирование, пространственное разрешение, аэрокосмические изображения, статистический анализ, функция края, область анализа, ориентация контура, алгоритм, аппроксимация.

Введение

Пространственная разрешающая способность и отношение сигнал/шум являются важнейшими характеристиками систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Они определяют различимость объектов наблюдаемой сцены на фоне шумов. В процессе проектирования систем формирования изображений оценка этих характеристик осуществляется в лабораторных условиях путем подачи на их вход опорных сигналов и специальных мишеней. В процессе эксплуатации систем ДЗЗ выполнить эти операции не представляется возможным, и единственным способом оценки пространственной и радиометрической разрешающей способности является анализ получаемой с помощью систем ДЗЗ видеоинформации.

Известны два подхода к оценке пространственного разрешения систем ДЗЗ по формируемым ими снимкам. Первый подход рассмотрен в работах [1,2]. Он основан на размещении на поверхности Земли тест-объекта в виде шитых белых и черных полос брезента, съемки тест-объекта и анализе степени размытости его границ путем формирования функции рассеивания точки (ФРТ). Второй подход реализован в космическом проекте Quickbird II [3], где на поверхности Земли формируются тест-объекты в виде точечных оптических сигналов. О разрешающей способности судят по степени его расфокусировки на изображении. Общим недостатком этих подходов являются сложность реализации и узкая ориентация на конкретную систему ДЗЗ (на вполне определенный шаг пространственной дискретизации). В связи с этим в настоящей работе рассматривается алгоритм, в котором используется идея первого подхода, но оценка разрешения производится на основе анализа естественных объектов наблюдаемой сцены с контрастными границами.

Рассматривается также технология оценки радиометрического разрешения (отношения сигнал/шум) непосредственно по аэрокосмическим изображениям. В известных работах [4,5] в качестве адекватного описания шума используется аддитивная независимая модель $B = X + \varepsilon$, где B - репродуцируемое изображе-

Представлены две технологии оценки важнейших характеристик систем дистанционного зондирования Земли – пространственной разрешающей способности и отношения сигнал/шум на основе статистического анализа материалов аэрокосмической съемки. Приводятся результаты экспериментальных исследования этих технологий.

ние с шумом ε , X - не зашумленное изображение. Такой моделью описываются электронный шум видеодатчика, шум тракта передачи сигнала и шум квантования [6]. Оценка дисперсии D_ε подобного шума основана на анализе по последовательности отсчетов видеоданных $B_i = X_i + \varepsilon_i$, $i = \overline{1, I}$, отсчетов автокорреляционной функции (АКФ) \widehat{K}_τ , $\tau = 0, 1, 2, \dots$, в которой только нулевой отсчет подвержен искажениям:

$$\widehat{K}_\tau = \begin{cases} K_0 + D_\varepsilon, & \tau = 0; \\ K_\tau, & \tau = 1, 2, \dots, \end{cases} \quad (1)$$

где K_τ , $\tau = 0, 1, 2, \dots$, - не зашумленные отсчеты АКФ.

В настоящей работе рассматривается технология высокоточной оценки D_ε по зашумленному изображению и вопросы оценки точности решения этой задачи.

Оценка пространственной разрешающей способности

Пространственное разрешение систем ДЗЗ наиболее полно описывается через частотно-контрастную характеристику (ЧКХ), которая является модулем Фурье-преобразования функции рассеивания точки (ФРТ) $H(x, y)$. Связь функции спектральной яркости наблюдаемой сцены $E(x, y)$ с непрерывным изображением $B_n(x, y)$ и ФРТ определяется через операцию свертки: $B_n(x, y) = H(x, y) \otimes E(x, y)$, где x и y - горизонтальное и вертикальное направления осей координат. Рассматриваемый ниже алгоритм основан на получении ФРТ путем анализа контрастных границ однородных по яркости объектов изображений по направлениям x и y . Отличительным элементом алгоритма является то, что ФРТ формируется не дифференцированием дискретизованного перехода яркости, в результате чего возникают ошибки, а путем его восстановления с субпиксельной точностью и последующим дифференцированием.

Алгоритм предполагает последовательное выполнение трех этапов: получение по контрастным границам объектов изображения так называемой функции края (ФК); определение по ФК функции рассеивания точки и нахождение по ФРТ искомой ЧКХ. Переходы

$\Phi K \rightarrow \Phi P T \rightarrow \Phi K X$ строго описываются математически, так что центральной задачей является высокоточное нахождение ФК.

Получение ФК. Вначале на изображении определяется прямоугольная область анализа (ОА) $D(m, n)$, $m = \overline{1, M}$ (номер строки), $n = \overline{1, N}$ (номер столбца), которая содержит вертикально ориентированную контрастную границу, пересекающую две противоположные стороны ОА. (рис. 1). Ниже приводимые рассуждения полностью распространяются и для ОА с горизонтальной ориентацией ярких переходов.



Рис. 1. ОА с вертикальной ориентацией контура

С использованием модуля дискретной производной $P(m, n) = |D(m, n+1) - D(m, n-1)|$, $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{2, N-1}$, в ОА выделяются контурные точки $n_m = \arg \max_n P(m, n)$.

Точкам $P(m, n)$, отстоящим по строке от n_m , более чем на допустимый порог размытия контура Δ , присваивается нулевое значение $P(m, n) = 0$. Положение контура, уточненное до долей пикселя, определяется как

$$N_m = \left[\frac{\sum_{n=2}^{N-1} n \cdot P(m, n)}{\sum_{n=2}^{N-1} P(m, n)} \right] \quad (2)$$

По полученному набору координат (N_m, m) , $m = \overline{1, M}$, по МНК строится геометрическая модель контура

$$x(m) = \sum_{i=0}^S a_i m^i.$$

На основе анализа невязок $N_m - x(m)$ решается вопрос о пригодности ОА для построения ФК.

ФК $g(x)$ формируется как $g(n-x(m)) = D(m, n)$, $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N}$, т.е. аргументом этой функции является расстояние точки ОА до контура по оси n , а ее значением яркость в этой точке (рис. 2). Этой операцией и достигается получение ФК с субпиксельной точностью.

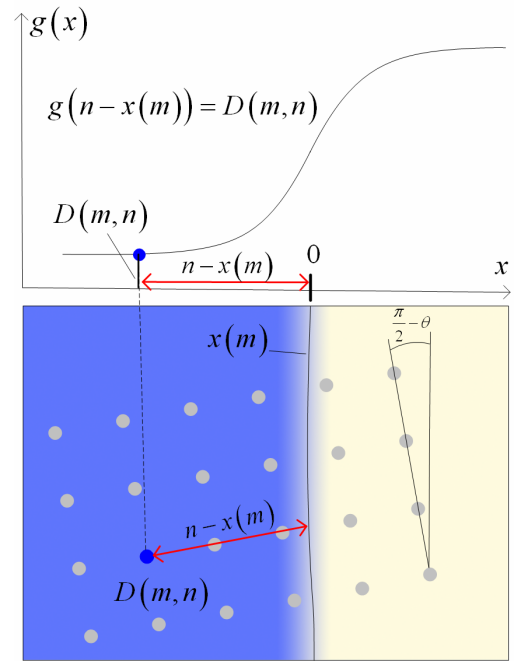


Рис. 2. Принцип формирования ФК

При анализе реальных изображений размеры используемых контуров ограничены, возникает необходимость увеличения статистической выборки для построения ФК. Эта задача решается в предположении, что система ДЗЗ является линейной и инвариантной к сдвигу. В этом случае ФК $g_s(x)$, $s = \overline{1, S}$, полученные по S областям анализа, приводятся к единому нижнему a и верхнему b уровням яркости:

$$\hat{g}_s(x) = \left(\frac{b-a}{b_s-a_s} \right) (g_s(x) - a_s) + a, \quad s = \overline{1, S}, \quad (3)$$

где $\hat{g}_s(x)$ - приведенные к единому яркостному диапазону ФК, a_s и b_s - нижние и верхние уровни $g_s(x)$.

По мере отклонения угла наклона яркостного перепада θ от вертикальной оси увеличивается масштаб ФК μ по горизонтали. Из рис. 3 следует, что $\mu = R/R_\theta = 1/\sin \theta$, где R - радиус кривизны ФРТ в окрестности точки ее встречи с яркостным перепадом.

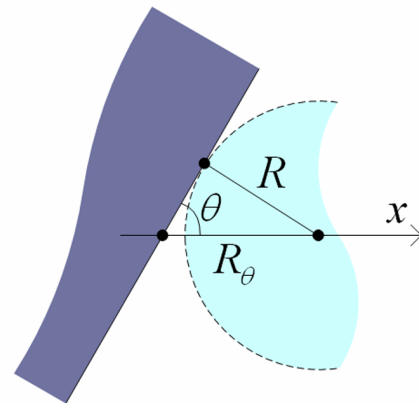


Рис. 3. Учет наклона контура

Поэтому функции края $\hat{g}_s(x)$, $s = \overline{1, S}$, полученные при различных углах θ_s , необходимо привести к $\theta = \pi/2$, сжав их по оси x в $1/\mu_s = \sin \theta_s$ раз относи-

тельно точки $x = 0$. После масштабирования функций края по двум направлениям операция их объединения становится корректной. В результате формируется совокупная функция края

$$g^*(x) = \bigcup_{s=1}^S \widehat{g}_s(x/\mu_s),$$

которая содержит измерения от всех областей анализа.

Определение ФРТ и ЧКХ. Точной оценке ФРТ по $g^*(x)$ мешают три фактора: наличие на изображении шумов; неоднородность по яркости объекта и фона; неточность описания контура $x(m)$. Для уменьшения влияния этих факторов исследованы два вида аппроксимаций ФК - кусочно-полиномиальная и параметрическая.

При кусочно-полиномиальной аппроксимации для точек, равномерно расположенных на оси x , в скользящей вдоль этой оси апертуре по МНК строятся полиномы с привлечение всех точек, попавших в апертуру. Уточненное значение отсчета ФК в центральной точке апертуры определяется через нулевой коэффициент полинома. Разности соседних уточненных отсчетов ФК определяют отсчеты ФРТ.

При параметрической аппроксимации ФК представляется аналитическими моделями вида

$$q_j(x, k) = 0.5(a+b) + |a-b|\varphi_j(x, k), \quad j=1, 2, 3, \quad (4)$$

где $\varphi_1(x, k) = \frac{1}{\pi} \arctg(kx)$,

$$\varphi_2(x, k) = 0.5 \left(\frac{e^{kx} - e^{-kx}}{e^{kx} + e^{-kx}} \right), \quad \varphi_3(x, k) = \frac{1}{k\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-y^2/2k^2} dy.$$

Параметр k и функция q_j определяются из условий:

$$e_j = \sum_x (g^*(x) - q_j(x, k))^2 = \min,$$

$$j = \arg(\min(e_1, e_2, e_3)).$$

Искомая ФРТ находится как производная выбранной q_j , а ЧКХ как нормированный модуль спектра ФРТ.

Оценка уровня шума

В соответствии с (1) оценка дисперсии шума основана на экстраполяции значения нулевого отсчета АКФ по отсчетам при $\tau = 1, 2, 3, \dots$. Для решения задачи в такой постановке необходимо выбрать модель АКФ, которая была бы адекватной и наиболее точно предсказывала искомый нулевой отсчет.

Модели автокорреляционной функции. Исходя из свойств АКФ реальных изображений, ее аналитическая модель K_τ должна удовлетворять следующим свойствам:

- 1) быть четной функцией относительно τ ($K_{-\tau} = K_\tau$);
- 2) иметь максимум в точке $\tau = 0$, ($K_0 \geq K_\tau, \tau = 1, 2, 3, \dots$);
- 3) асимптотически стремиться к нулю при увеличении τ ($K_\tau > K_{\tau+1}$ при $\tau = 0, 1, 2, \dots$ и $\lim_{\tau \rightarrow \infty} K_\tau = 0$).

С учетом этого исследованы две двухпараметрические модели АКФ:

$$K_{1\tau} = a_1 e^{-c_1 \tau^2}, \quad K_{2\tau} = \frac{a_2}{1 + c_2 \tau^2}. \quad (5)$$

Параметры моделей определяются по отчетам АКФ при $\tau = 1, 2$ как

$$a_1 = \sqrt[3]{\widehat{K}_1^4 / \widehat{K}_2}, \quad c_1 = \ln \sqrt[3]{\widehat{K}_1 / \widehat{K}_2},$$

$$a_2 = 3\widehat{K}_1 \widehat{K}_2 / (4\widehat{K}_2 - \widehat{K}_1), \quad c_2 = (\widehat{K}_1 - \widehat{K}_2) / (4\widehat{K}_2 - \widehat{K}_1), \quad (6)$$

Из (5) и (6) следуют оценки дисперсии шума соответственно для моделей $K_{1\tau}, K_{2\tau}$:

$$D_{1\epsilon} = \widehat{K}_0 - \sqrt[3]{\widehat{K}_1^4 / \widehat{K}_2}, \quad D_{2\epsilon} = \widehat{K}_0 - 3\widehat{K}_2 \widehat{K}_1 / (4\widehat{K}_2 - \widehat{K}_1). \quad (7)$$

Экспериментальные исследования, проведенные с привлечением изображений от различных сканирующих устройств, показали, что удовлетворительная точность оценки D_ϵ обеспечивается лишь при достаточно большом уровне шума. Это связано с тем, что на практике $D_\epsilon \ll K_\epsilon, \tau = 0, 1, 2, \dots$. Поэтому малые ошибки в определении K_0 приводят к значительным относительным погрешностям оценки D_ϵ . Рассмотрим подход, свободный от этого недостатка. Он основан на корреляционном анализе разностного изображения, для которого значения АКФ сопоставимы по величине с D_ϵ .

Оценка D_ϵ по разностному изображению. По исходным отсчетам яркости B_i , формируется последовательность разностей:

$$Z_i = B_i - B_{i-1} = (X_i - X_{i-1}) + (\epsilon_i - \epsilon_{i-1}). \quad (8)$$

Отсчеты АКФ \widehat{R}_τ , полученные по последовательности Z_i , равны:

$$\widehat{R}_0 = R_0 + 2D_\epsilon, \quad \widehat{R}_1 = R_1 - D_\epsilon, \quad \widehat{R}_2 = R_2, \quad \widehat{R}_3 = R_3, \quad (9)$$

где $R_\tau = -(K_{\tau-1} - 2K_\tau + K_{\tau+1})$.

Следовательно, значения R_τ численно равны второй дискретной производной от K_τ с обратным знаком. Поэтому в качестве моделей поведения R_τ логично использовать вторые производные функций $K_{1\tau}, K_{2\tau}$ (5) с противоположным знаком, которые вблизи точки $\tau = 0$ хорошо описывают корреляционные свойства разностного изображения:

$$R_{1\tau} = -K_{1\tau}'' = 2ace^{-c\tau^2} (1 - 2c\tau^2), \quad (10)$$

$$R_{2\tau} = -K_{2\tau}'' = 2ac \frac{(1 - 3c\tau^2)}{(1 + c\tau^2)^3}. \quad (11)$$

С учетом (9) для модели $R_{1\tau}$ дисперсия шума D_{R1} определяется из системы

$$\widehat{R}_{10} = 2ac + 2D_{R1},$$

$$\widehat{R}_{11} = 2ace^{-c} (1 - 2c) - D_{R1},$$

$$\widehat{R}_{12} = 2ace^{-4c} (1 - 8c) \quad (12)$$

и равна

$$D_{R1} = \frac{1}{2} \widehat{R}_{10} - \frac{\widehat{R}_{12} e^{4c}}{2(1 - 8c)}. \quad (13)$$

Для модели $R_{2\tau}$ дисперсия шума D_{R2} определяется из системы

$$\hat{R}_{20} = 2ac + 2D_{R2},$$

$$\hat{R}_{21} = \frac{2ac(1-3c)}{(1+c)^3} - D_{R2},$$

$$\hat{R}_{22} = \frac{2ac(1-12c)}{(1+4c)^3}.$$

$$\text{Она равна } D_{R2} = \frac{1}{2} \left(\hat{R}_{20} - \hat{R}_{22} \frac{(1+4c)^3}{1-12c} \right). \quad (14)$$

На основе полученных оценок дисперсии шума не представляет труда определить оценку отношения сигнал/шум, например, как $\gamma = \sqrt{(D_B - D_\epsilon)/D_\epsilon}$, либо как отношение заданного уровня сигнал к $\sqrt{D_\epsilon}$. Параметр γ определяет радиометрическое разрешение системы ДЗЗ.

Экспериментальные исследования

Рассмотренные в настоящей работе алгоритмы оценки пространственного и яркостного разрешения на основе статистического анализа изображений экспериментально исследованы с привлечением реальных космических снимков земной поверхности от различных систем ДЗЗ.

Оценка пространственного разрешения. Схема экспериментальных исследований точности оценки пространственного разрешения представлена на рис. 4.

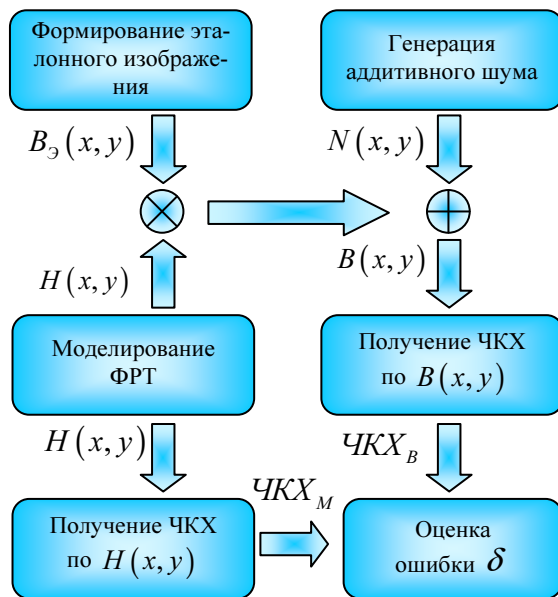


Рис. 4. Схема эксперимента

В начале формируется эталонное изображение $B_3(x, y)$, содержащее идеальный яркостной перепад. В это изображение вносятся вполне определенные искажения посредством свертки $B_3(x, y)$ и моделируемой ФРТ $H(x, y)$ и добавления аддитивного шума $N(x, y)$ с СКО σ_N . В результате формируется изображение $B(x, y)$. Путем сопоставления $ЧКХ_B$, полученной по $B(x, y)$ рассмотренным выше алгоритмом, с модельной $ЧКХ_M$ определяется относительная погрешность оценки пространственного разрешения δ . В качестве модельной ФРТ использована гауссоида

$$H(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}a} e^{-\frac{x^2+y^2}{2a^2}},$$

где a - СКО, определяющее степень размытия границ [7].

Результаты экспериментов представлены в таблице.

Таблица
Ошибка оценки разрешения δ

№ эксперимента	a	σ_N	$\delta, \%$	
			Кусочно-полином.	Параметрическая
1	0,5	1	6,2	6,1
2	0,5	1,5	10,5	8,6
3	0,7	1	6,1	6,1
4	0,7	1,5	8,5	7,2

Из таблицы следует, что кусочно-полиномиальная и параметрическая аппроксимация ФК дают близкие результаты. Однако, кусочно-полиномиальная модель дает возможность получения ЧКХ для систем с произвольной ФРТ, но является более чувствительной к шуму изображения; напротив, параметрическая модель более устойчива к шуму, но ее возможно применять только для систем, ФРТ которых могут быть достоверно представлены производной от функций q_j .

Оценка уровня шума. В результате экспериментальных исследований двух рассмотренных выше технологий оценки дисперсии шума (по исходному и разностному изображению) установлено:

- СКО оценки дисперсии шума по исходному изображению составляет для каждой из моделей АКФ примерно одинаковую величину $\sigma_D \approx 0,6$ градации яркости. Следовательно, технологию оценки уровня шума по исходному изображению можно использовать только при высоком уровне шумов, порядка $D_\epsilon \approx 5-7$ и выше. В этом случае относительная ошибка оценки D_ϵ , как правило, не будет превышать 10%.

- СКО оценки дисперсии шума по разностному изображению для модели $R_{1\tau}$ составляет порядка $\sigma_D \approx 0,25$, а для модели $R_{1\tau}$ порядка $\sigma_D \approx 0,35$ градации яркости. Следовательно, технологию определения оценки уровня шума по разностному изображению можно использовать для оценки как высоких уровней шума, так и малых уровней шумов, порядка $D_\epsilon \approx 2-3$ и выше.

Литература

1. Stanley A. Morain, Amelia M. Budge. Post-Launch Calibration of Satellite Sensors. Proceeding of the international workshop on radiometric and geometric calibration, 2-5 December 2003. Earth Data Analysis Center, University of New Mexico, Albuquerque, NM, USA.
2. Brian M. Bleeze. Modeling the MTF and Noise Characteristics of Complex Image Formation Systems // Center for Science Rochester Institute of Technology, May 15, 1998.
3. Manjunath Kempaiah Rangaswamy. Quickbird II Two-dimensional On-orbit Modulation Transfer Function Analysis Using Convex Mirror Array. South Dakota State University, 2003.
4. Ярославский Л.П. Введение в цифровую обработку изображений. М.: Сов. радио, 1979. – 312 с..
5. Liu C., Freeman W., Szeliski R., Kang S. Noise estimation from a single image // IEEE Conf. Computer Vision and Patter Recognition, 2001. – P. 901–908.
6. Schreiber W. Fundamentals of electronic imaging systems. Springer-Verlag, 1986. – 268 p.
7. Brian L. Markham. The Landsat Sensors' Spatial Responses // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-23, No. 6, November 1985.