

## К оценке линейного разрешения цифровых аэрокосмических снимков

С. А. Станкевич

Центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины, Киев

Отмечены некоторые недостатки традиционного для аналоговых аэросъемочных систем подхода к оценке разрешающей способности цифровых изображений, а также затронуты аспекты статистического оценивания линейного разрешения цифровых аэрокосмических снимков.

Повсеместное внедрение цифровых технологий в отрасль дистанционного наблюдения [3] приводит к настоящей необходимости количественного оценивания качества получаемых цифровых изображений. Наличие десятилетиями разрабатываемых, апробированных и выверенных методик оценки качества фотографических изображений способно создать иллюзию возможности адаптации известных методов оценки линейного разрешения на местности к цифровым снимкам без существенной модификации. Однако это не так, и вот почему.

1. Понятие «пространственная разрешающая способность» применима к дискретным системам регистрации изображений в неизменном виде только в случае существенного превосходства разрешения дискретного приемного элемента над разрешением аналоговой части (например, оптики) системы.

2. В этом случае к дискретной системе в полном объеме применим классический аппарат оценки разрешающей способности, основанный на частотном анализе звеньев передачи оптического сигнала. Однако развитие современных технологий изготовления дискретных фотоприемных устройств, в основном полупроводниковых линеек и матриц ПЗС еще не достигло указанного уровня. Кроме того, сама цель выполнения аэрокосмической съемки диктует необходимость работы на предельно возможном для цифровой системы разрешении — порядка размера элемента дискретизации.

3. В случае же превосходства разрешающей способности аналоговой части системы регистрации говорить об увеличении эквивалентного размера элемента дискретизации цифрового изображения [1], как представляется, не совсем корректно с точки зрения физического смысла такого увеличения. При сопоставимых величинах разрешающих

способностей использование частотных методов допустимо и оправданно, особенно при решении задач синтеза систем.

4. Речь скорее должна идти об определении порога обнаружимости отдельного элемента дискретизации на фоне других по его радиометрическим характеристикам — светимости, радиационному или оптическому контрасту и т. д. Поэтому при оценке линейного разрешения следует рассматривать не выявление на изображении объектов, размеры которых сопоставимы с геометрической проекцией элемента разрешения на местность, а границ раздела радиометрически однородных полей, шириной заведомо меньшей, нежели отдельный элемент дискретизации.

5. С учетом стохастического характера возможного местоположения объекта регистрации в системе элементов дискретного растра, а также важности шумов полупроводниковых приемников оптического сигнала, представляется логичным использование для оценки качества цифрового снимка классических методов статистического обнаружения детерминированного сигнала на фоне аддитивной гауссовской помехи [7].

Рассмотрим процесс формирования оптического сигнала на элементе разрешения дискретной системы регистрации (рис. 1).

Если облученность объектов наблюдения составляет  $E_0$ , а коэффициенты отражения разделяемых полей —  $\rho_1$  и  $\rho_2$ , то оптические сигналы  $E_1$  и  $E_2$  на отдельном элементе дискретизации линейного размера  $a$  составят

$$E_1 = \rho_1 a^2 E_0, \quad E_2 = \rho_2 a^2 E_0. \quad (1)$$

Интерес представляет оптический сигнал  $E_{12}$  на элементе дискретизации, соответствующем границе раздела полей:

$$E_{12} = [\rho_1 a x + \rho_2 a(a - x)] E_0. \quad (2)$$

Так как местоположение границы раздела на аэроснимке, и следовательно, величина сдвига  $x$  являются случайными, определим среднее значение

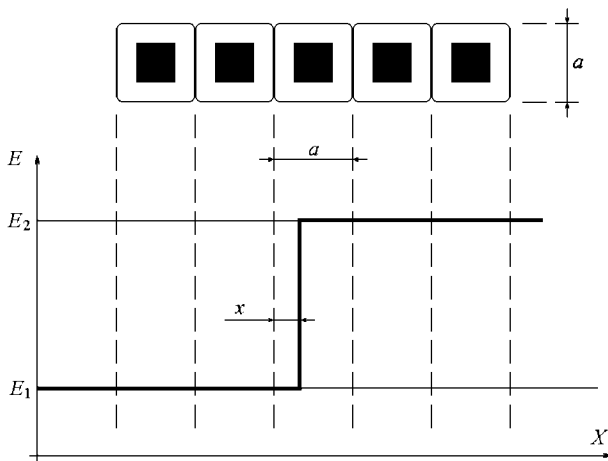


Рис. 1. Формирование оптического сигнала

переходного оптического сигнала  $E_{12}$  как

$$E_{12} = \frac{1}{a} \int_0^a E_{12}(x) dx = \frac{1}{a} \int_0^a [\rho_1 ax + \rho_2 a(a-x)] E_0 dx = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} a^2 E_0. \quad (3)$$

Если производится линейное преобразование оптического сигнала  $E$  в цифровой код  $w$  с коэффициентом преобразования  $k_w$  [8], то соответствующие поля цифрового изображения опишутся как

$$w_1 = k_w \tau_0 \rho_1 a^2 E_0, \quad w_2 = k_w \tau_0 \rho_2 a^2 E_0, \quad (4)$$

где  $\tau_0$  — обобщенный коэффициент передачи оптического сигнала от объекта.

Так как в процессе дистанционного наблюдения реальные поля яркости, как правило, обладают стохастической субпиксельной текстурой [9], и на оптический сигнал оказывает влияние множество случайных факторов, справедливым представляется радиометрическое описание полей цифрового изображения нормальными распределениями с математическими ожиданиями  $w_1$  и  $w_2$  и дисперсией  $\sigma_w^2$ , которую можно считать постоянной [5, 6] вследствие незначительности различий между  $w_1$  и  $w_2$  с учетом (3).

Теперь задача разделения полей свелась к статистической проверке гипотез с простой альтернативой, которая в общем случае имеет порог принятия решений  $w_{\text{пор}}$  вида [2]

$$w_{\text{пор}} = \frac{w_1 + w_2}{2} + \frac{\sigma_w^2 \ln \psi}{n(w_2 - w_1)}, \quad (5)$$

где  $n$  — объем статистической выборки, а параметр  $\psi$  определяется критерием принятия решения (таблица).

Наибольшее практическое применение обычно находят критерии максимума правдоподобия и

Статистический параметр принятия решения

Критерий	Параметр
Байесовский	$\psi = \frac{c_{11} - c_{12} p_1}{c_{22} - c_{21} p_2}$
Максимума апостериорной вероятности	$\psi = \frac{p_1}{p_2}$
Максимума правдоподобия	$\psi = 1$
Неймана—Пирсона	$P\left\{\frac{f_2(w)}{f_1(w)} \geq \psi\right\} = \alpha$

Примечание.  $c_{ij}$  — плата за принятое решение,  $p_1$  и  $p_2$  — априорные вероятности гипотез,  $\alpha$  — вероятность ошибки 1 рода («пропуск цели»),  $\beta$  — вероятность ошибки 1 рода («ложная тревога»),  $f(\cdot)$  — функция распределения плотности вероятности.

Неймана—Пирсона. Они позволяют по значениям допустимых вероятностей ошибок  $\alpha$  и  $\beta$  определить минимальный необходимый размер статистической выборки  $n_{\text{min}}$ .

Для критерия максимального правдоподобия (5) переходит в

$$w_{\text{пор}} = \frac{w_1 + w_2}{2}, \quad (6)$$

а вероятности ошибок —

$$\alpha = \beta = 1 - \Phi\left(\frac{w_2 - w_1}{2\sigma_w} \sqrt{n}\right), \quad (7)$$

где

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-u^2/2} du, \quad (8)$$

— табулированный интеграл Лапласа [4]. Из (7) следует, что

$$\sqrt{n_{\text{min}}} = \frac{2\sigma_w}{w_2 - w_1} \Phi^{-1}(1 - \alpha). \quad (9)$$

Для критерия Неймана—Пирсона производится раздельный учет заданных допустимых вероятностей ошибок 1 и 2 рода. При этом

$$w_{\text{пор}} = w_1 + \frac{\sigma_w \Phi^{-1}(1 - \alpha)}{\sqrt{n}}, \quad (10)$$

и

$$\sqrt{n_{\text{min}}} = \frac{\sigma_w}{w_2 - w_1} [\Phi^{-1}(1 - \alpha) + \Phi^{-1}(1 - \beta)]. \quad (11)$$

Для часто используемых типовых значений  $\alpha = 0.05$  и  $0.025$   $\Phi^{-1}(1 - \alpha) \equiv 1.65$  и  $1.96$  соответственно.

Опыт практической интерпретации цифровых аэрокосмических снимков свидетельствует, что ошибки второго рода встречаются крайне редко и могут не учитываться при оценке качества изображений. По-видимому, это связано с адапционными особенностями зрительного аппарата человека-наблюдателя. Поэтому приемлемым представляется

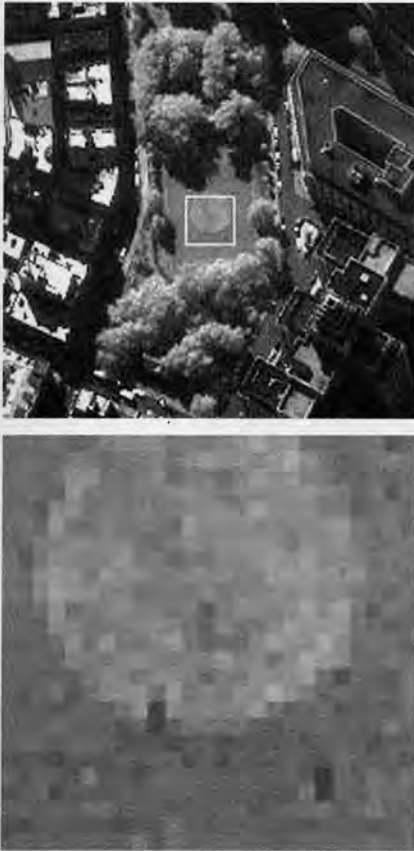


Рис. 2. Тестовый цифровой космический снимок: а — исходное изображение, б — выделенный фрагмент с увеличением

использование наиболее простого статистического критерия — критерия максимального правдоподобия.

Таким образом, при оценке линейного разрешения цифровых аэрокосмических снимков следует исходить из следующих ограничений:

1. Геометрический размер элемента изображения на местности неизменен и определяется только законами построения изображения и параметрами полета носителя.

2. Система регистрации изображений по своей природе дискретна, т. е. при дешифрировании объектов оперировать возможно только целым числом пикселей. Дополнительного исследования требует

влияние шумов дискретизации на форму объектов, размеры которых находятся в области предельных разрешений. В частности, имеются серьезные сомнения в правомерности использования формулы Живичина (или ей подобных), опирающейся на статистические исследования процесса дешифрирования аналоговых фотографических изображений.

3. Минимальная мощность выборки по любому из статистических критериев  $n_{\min}$  имеет физический смысл числа связанных пикселей объекта, обнаруживаемых на изображении совместно, как единый реальный элемент разрешения цифрового изображения, а величина  $a\sqrt{n_{\min}}$  — искомое линейное разрешение цифрового аэрокосмического снимка соответственно.

Процесс обнаружения границы раздела полей цифрового аэрокосмического снимка иллюстрируется рис. 2.

Отношение «сигнал-шум» выбранной области составляет 3.18. Выполненные непосредственно на цифровом изображении измерения дают следующие оценки статистических характеристик:

$$w_1 = 145.05, w_2 = 169.53, \sigma_w^2 = 59.41.$$

Расчет по формулам (9) и (6) дает приведенное линейное разрешение цифрового аэроснимка  $\sqrt{n_{\min}} = 2.47$  пиксела (что неплохо согласуется с визуальной оценкой рис. 2, б) при пороге принятия решения  $w_{\text{пор}} = 157.29$ .

1. Кононов В. И. Обоснование методики оценки величины разрешения на местности аэрокосмических систем с дискретными фотоприемниками // *Космічна наука і технологія*.—2002.—8, № 2/3.
2. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. — М.: Радио и связь, 1989.—656 с.
3. Москаленко И. Состояние и ближайшие перспективы рынка ДДЗ // *ArcReview: современные геоинформационные технологии*.—2001.—№ 2 (17).—С. 4—5.
4. Поллард Дж. Справочник по вычислительным методам статистики: Пер. с англ. — М.: Финансы и статистика, 1982.—344 с.
5. Сивяков И. Н. Расчет разрешения оптико-электронных систем // *Оптический журн.*—1998.—65, № 2.—С. 60—63.
6. Станкевич С. А. Оценка качества синтезированных цифровых изображений // *Информационные технологии в дешифрировании изображений: классификация и оценка эффективности*. — Киев: МО Украины, 1995.—С.36—51.
7. Цветков Э. И. Основы теории статистических измерений. — Л.: Энергоатомиздат, 1986.—256 с.
8. Шлихт Г. Ю. Цифровая обработка цветных изображений: Пер. с нем. — М.: ЭКОМ, 1997.—336 с.
9. Gimelfarb G. L. Gibbs Fields with Multiple Pairwise Interactions in Texture Simulating and Segmenting // *Tech. Rep.* — Sophia Antipolis: INRIA, 1997.—60 p.

влияние шумов дискретизации на форму объектов, размеры которых находятся в области предельных разрешений. В частности, имеются серьезные сомнения в правомерности использования формулы Живичина (или ей подобных), опирающейся на статистические исследования процесса дешифрирования аналоговых фотографических изображений.

3. Минимальная мощность выборки по любому из статистических критериев  $n_{\min}$  имеет физический смысл числа связанных пикселей объекта, обнаруживаемых на изображении совместно, как единый реальный элемент разрешения цифрового изображения, а величина  $a\sqrt{n_{\min}}$  — искомое линейное разрешение цифрового аэрокосмического снимка соответственно.

Процесс обнаружения границы раздела полей цифрового аэрокосмического снимка иллюстрируется рис. 2.

Отношение «сигнал-шум» выбранной области составляет 3.18. Выполненные непосредственно на цифровом изображении измерения дают следующие оценки статистических характеристик:

$$w_1 = 145.05, w_2 = 169.53, \sigma_w^2 = 59.41.$$

Расчет по формулам (9) и (6) дает приведенное линейное разрешение цифрового аэроснимка  $\sqrt{n_{\min}} = 2.47$  пиксела (что неплохо согласуется с визуальной оценкой рис. 2, б) при пороге принятия решения  $w_{\text{пор}} = 157.29$ .

Рис. 2. Тестовый цифровой космический снимок: а — исходное изображение, б — выделенный фрагмент с увеличением

использование наиболее простого статистического критерия — критерия максимального правдоподобия.

Таким образом, при оценке линейного разрешения цифровых аэрокосмических снимков следует исходить из следующих ограничений:

1. Геометрический размер элемента изображения на местности неизменен и определяется только законами построения изображения и параметрами полета носителя.

2. Система регистрации изображений по своей природе дискретна, т. е. при дешифрировании объектов оперировать возможно только целым числом пикселей. Дополнительного исследования требует

1. Кононов В. И. Обоснование методики оценки величины разрешения на местности аэрокосмических систем с дискретными фотоприемниками // *Космічна наука і технологія*.—2002.—8, № 2/3.
2. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. — М.: Радио и связь, 1989.—656 с.
3. Москаленко И. Состояние и ближайшие перспективы рынка ДДЗ // *ArgReview: современные геоинформационные технологии*.—2001.—№ 2 (17).—С. 4—5.
4. Поллард Дж. Справочник по вычислительным методам статистики: Пер. с англ. — М.: Финансы и статистика, 1982.—344 с.
5. Сивяков И. Н. Расчет разрешения оптико-электронных систем // *Оптический журн.*—1998.—65, № 2.—С. 60—63.
6. Станкевич С. А. Оценка качества синтезированных цифровых изображений // *Информационные технологии в дешифрировании изображений: классификация и оценка эффективности*. — Киев: МО Украины, 1995.—С.36—51.
7. Цветков Э. И. Основы теории статистических измерений. — Л.: Энергоатомиздат, 1986.—256 с.
8. Шлихт Г. Ю. Цифровая обработка цветных изображений: Пер. с нем. — М.: ЭКОМ, 1997.—336 с.
9. Gimelfarb G. L. Gibbs Fields with Multiple Pairwise Interactions in Texture Simulating and Segmenting // *Tech. Rep.* — Sophia Antipolis: INRIA, 1997.—60 p.