

УДК 528.8:004.932

### СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ ЦИФРОВЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВЫСОКОГО И НИЗКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Кононов В.И., Станкевич С.А.

Обычно полагают, что информативность аэрокосмических изображений зависит от обеспечиваемого линейного разрешения на местности. Однако общий объем информации, содержащийся в цифровом изображении, определяется его цифровой емкостью, то есть, при фиксированных масштабе съемки и числе градаций – размерами полосы обзора.

Считается, что информативность цифровых аэрокосмических снимков высокого (единицы метров) разрешения заведомо больше, чем информативность снимков низкого (сотни – тысячи метров) пространственного разрешения на местности. При этом как-то в стороне остается тот факт, что ширина полосы обзора орбитальных систем высокого разрешения не превышает десятков километров, в то время как для систем низкого разрешения этот параметр обычно составляет тысячи километров [1]:

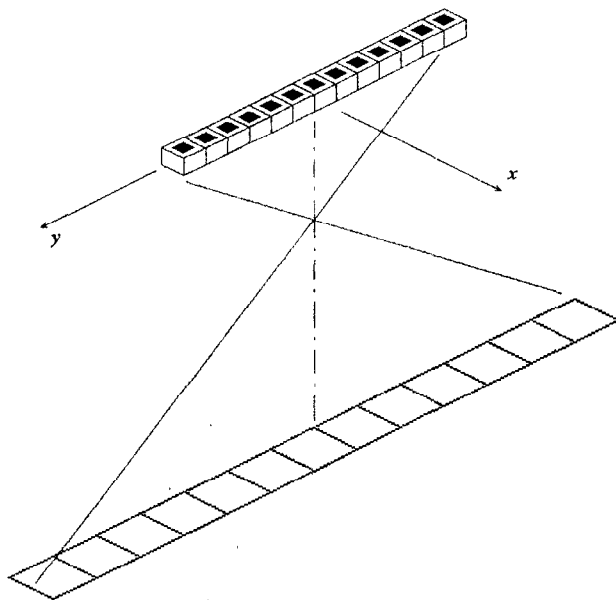


Рис.1. Формирование цифрового аэрокосмического изображения

Таблица 1.  
Характеристики спутниковой бортовой аппаратуры дистанционного наблюдения

Спутник	Аппаратура	Количество спектральных каналов	Пространственное разрешение, м	Ширина полосы обзора, км
NOAA-15,16	AVHRR	4	1100	2900
Terra	MODIS	36	250 .. 1000	2330
LandSat-7	ETM+	7	30	185
		1	15	180
Ikonos-2	SCT	4	4	13
		1	1	11
OrbView-2,3	MSI	4	8	8
		1	1	8
RadarSat-1,2	SAR	1	20 .. 60	28 .. 100
ERS-1,2	AMI	1	30	100
Spot-5A/5B	HRG	4	10 .. 20	117 .. 174
		1	5	60
Eros-A,B	WISP	1	1 .. 1,5	14 .. 20
IRS-4C/4D	LISS-3	3	23	142
	WiFS	2	188	810
	Pan	1	5,8	70
Алмаз-1Б	СПОМ	8	600	2200
	ОЭА	4	4	100
		1	2,5	80
Океан-О	МСУ-М	4	1000 .. 1700	1900
	МСУ-СК	5	160 .. 600	600
	МСУ-В	8	50 .. 275	180 .. 200
Сич-1	МСУ-М	4	1000 .. 1700	1900
	МСУ-С	2	345 .. 818	1900
	РБО	1	2500 × 1300	460

Большинство современных космических цифровых систем дистанционного наблюдения строится на основе ПЗС-линеек, ориентированных поперек (ось  $y$ ) направления полета носителя, при этом продольная (ось  $x$ ) развертка регистрируемого изображения осуществляется за счет движения спутника относительно поверхности Земли:

В этом случае целесообразно оценивать информационную емкость одной (поперечной) строки цифрового изображения  $C_y$ , которая определяется просто числом элементов строки  $n_y$  и числом градаций каждого элемента  $w$  [2]:

$$C_y = n_y \cdot \log_2 w \quad . \quad (1)$$

Определим число градаций как отношение полной ширины диапазона полезного сигнала  $\Delta E = E_{\max} - E_{\min}$  к ширине диапазона сигнала между соседними градациями  $\Delta E_w$ :

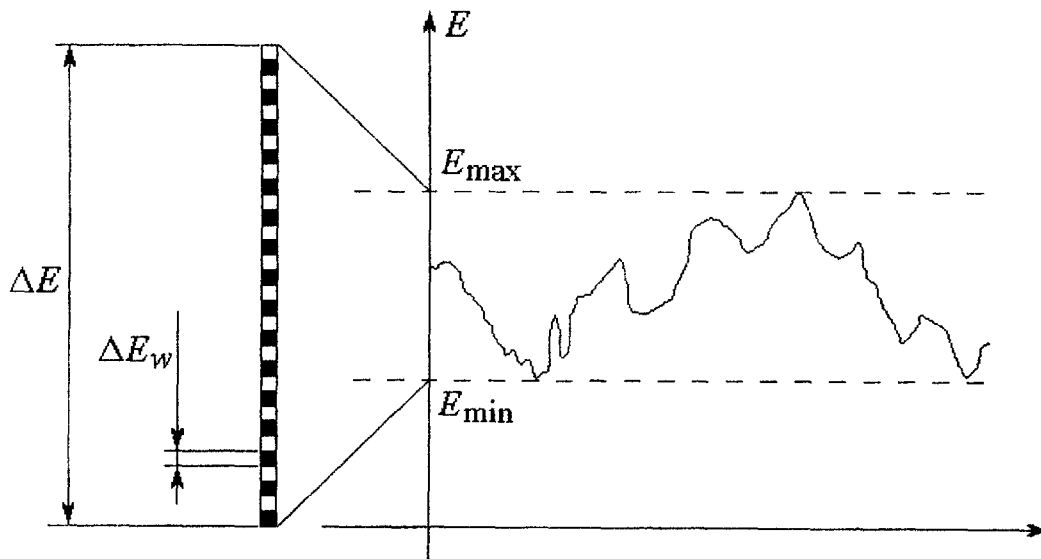


Рис.2. Определение числа градаций цифрового аэрокосмического изображения

$$w - 1 = \frac{\Delta E}{\Delta E_w} \quad (2)$$

Потенциально, величина  $\Delta E_w$  не может быть меньше среднего уровня шумов приемного тракта оптико-электронной аппаратуры  $E_{ш}$ . Реально же она должна превышать уровень шумов [3] в заданное число  $\psi_w = \text{const}$  раз:

$$\psi_w = \frac{\Delta E_w}{E_{ш}} \quad (3)$$

Подставляя (3) и (2) в (1), получим:

$$C_y = n_y \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{\Delta E}{\psi_w E_{ш}} \right) \quad (4)$$

Теперь следует отметить, что понятия информационной емкости и информативности цифровых изображений отнюдь не тождественны. Вообще говоря, информативность должна определяться степенью достижения поставленной

перед аэрокосмической съемкой цели благодаря содержащейся в цифровых изображениях информации. Но на практике оценить эту степень количественно зачастую не представляется возможным вследствие большого количества неизвестных, неучитываемых или неформализуемых факторов, связанных с качеством цифрового изображения лишь опосредованно.

Тем не менее, видимо возможно постулировать, что для каждой задачи аэрокосмического наблюдения существует своя характерная детальность на местности, достижение которой является необходимым условием успеха. При этом зачастую возможно пожертвовать минимальным размером детали в пользу, например, расширения полосы обзора – широко известный эффект генерализации. Спорной представляется сама принципиальная возможность достижения генерализации уровня снимков низкого разрешения путем сшивки и масштабирования снимков высокого разрешения. И уж во всяком случае, экономическая эффективность применения систем низкого разрешения при решении определенного класса задач бесспорна.

Предположим, что характерная детальность объекта  $l_x, l_y$ , заведомо превышает линейное разрешение на местности  $d_x, d_y$  цифровой аппаратуры дистанционного наблюдения:

$$l_x > d_x, \quad l_y > d_y. \quad (5)$$

Тогда по аналогии с (1) информативность  $J_y$  в терминах информационной емкости зарегистрированных характерных элементов составит

$$J_y = N_y \cdot \log_2 w, \quad (6)$$

где  $N_y$  – число характерных элементов в эквивалентной строке цифрового изображения:

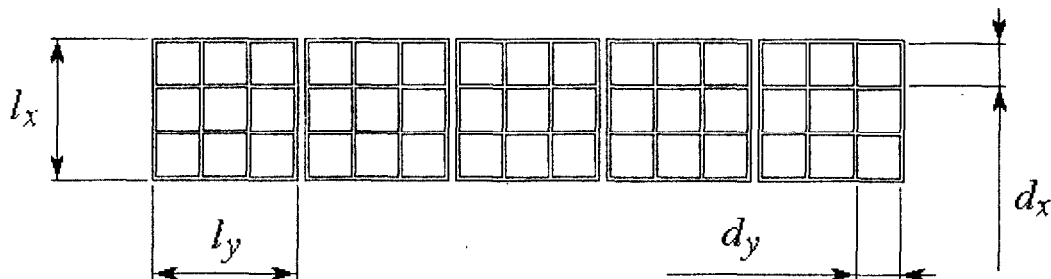


Рис.3. Характерная детальность объекта цифрового аэрокосмического изображения

Числу  $N_y$  соответствует количество элементов линейного разрешения на местности  $n$ :

$$n = n_x \times n_y, \quad n_x = \frac{l_x}{d_x}, \quad n_y = N_y \frac{l_y}{d_y}. \quad (7)$$

После несложных преобразований из (6) получаем

$$J_y = n \frac{d_x}{l_x} \cdot \frac{d_y}{l_y} \cdot \log_2 w, \quad (8)$$

где  $n$  – количество элементов разрешения в кадре цифрового изображения.

Остается оценить потенциально возможное число градаций квантования выходного сигнала  $w$  цифровой оптико-электронной аппаратуры. Как следует из (2), оно в основном определяется уровнем шумов. Для твердотельных ПЗС-приемников видимого и ближнего инфракрасного диапазонов обычно имеют место собственные постоянные шумы видеотракта и фотонный шум, вызванный принципиально дискретной природой входящего потока оптического излучения [4]. Удобным инструментом анализа фотонных шумов является вероятностное представление потоков фотонов и (фото)электронов в системе [5]. Известно [6], что потоки фотонов описываются Пуассоновским законом вероятностного распределения

$$P\{x=n\} = \frac{F^n}{n!} \exp(-F), \quad (9)$$

где  $x$  – целая неотрицательная случайная величина,  $n$  – целое неотрицательное значение,  $F$  – положительный параметр распределения. Среднее и дисперсия распределения (9) составляют  $F$ .

Обозначим через  $F(\lambda)$  средний поток фотонов (число на единицу площади за единицу времени), [ $\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ];  $a_x, a_y$  – собственные размеры фотоприемного элемента,  $t$  – время накопления заряда на одном такте формирования строки цифрового изображения, [с];  $\sigma_{\text{ш}} = \text{const}$  – СКО числа шумовых электронов видеотракта [ $\text{с}^{-1}$ ] в единицу времени;  $\eta(\lambda)$  – квантовую эффективность фотоприемника,

$$e(\lambda) = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad \text{– энергию единичного фотона [Дж]}, \quad (10)$$

где  $h = 6,626176 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка,  $c = 2,99792458 \cdot 10^8$  м·с<sup>-1</sup>,  $\lambda$  – длина волны электромагнитного излучения.

Выразим  $\Delta E$  в (2) как

$$\Delta E = \int_0^{\infty} \eta(\lambda) \cdot \Delta F(\lambda) \cdot t \cdot a_x \cdot a_y \cdot e(\lambda) \cdot d\lambda, \quad (11)$$

а  $\Delta E_w$  из (3) – как

$$\Delta E_w = \psi_w \cdot E_{ш} = \psi_w \cdot \int_0^{\infty} [\eta(\lambda) \cdot \sqrt{\Delta F(\lambda)} \cdot a_x \cdot a_y + \sigma_{ш}] \cdot t \cdot e(\lambda) \cdot d\lambda \quad (12)$$

Окончательно получим

$$\frac{\Delta E}{\Delta E_w} = \frac{\int_0^{\infty} \eta(\lambda) \cdot \Delta F(\lambda) \cdot t \cdot a_x \cdot a_y \cdot e(\lambda) \cdot d\lambda}{\psi_w \cdot \int_0^{\infty} [\eta(\lambda) \cdot \sqrt{\Delta F(\lambda)} \cdot a_x \cdot a_y + \sigma_{ш}] \cdot t \cdot e(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (13)$$

Собственные шумы видеотракта как правило постоянны, определяются только схемотехникой фотоприемника и усилителей и обычно не превышают 25 .. 50 фотоэлектронов за такт для цифровых камер среднего уровня [7]. Пренебрегая ими в (13)  $\sigma_{ш} \cong 0$ , грубо оценим верхний порог необходимого числа градаций оцифровки в виде

$$w = 1 + \frac{1}{\psi_w} \int_0^{\infty} \sqrt{\Delta F(\lambda)} \cdot d\lambda \quad (14)$$

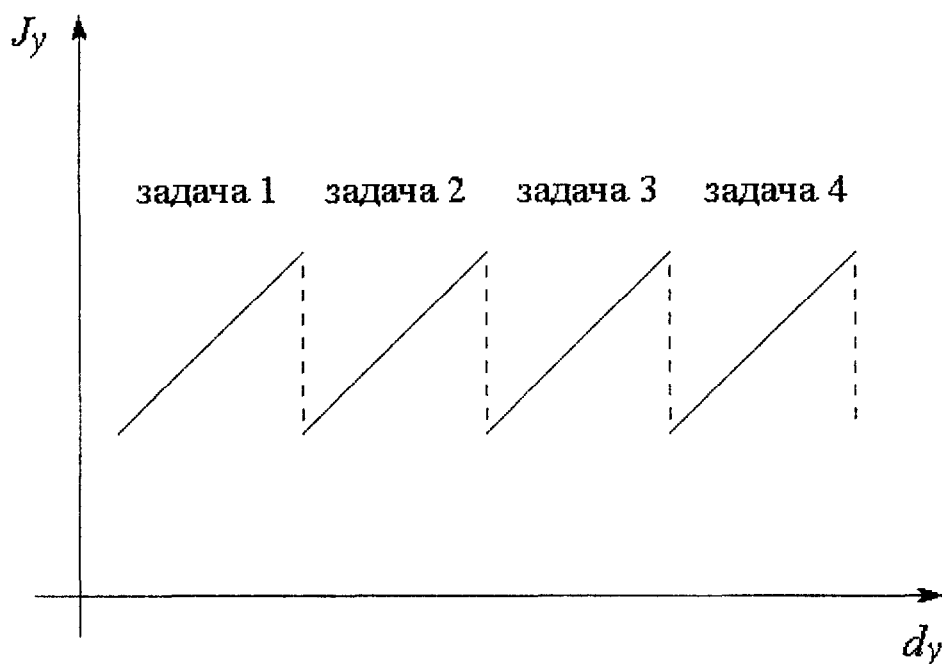
Для иллюстрации, при максимальном диапазоне полезного сигнала  $\Delta E_{\max}^{(V)} = 10^5$  Лк, приведенном к длине волны  $\lambda = 0,555$  мкм при стандартной световой эффективности  $V(\lambda) = 683$  Лм·Вт<sup>-2</sup>, что соответствует  $\Delta E_{\max} = \frac{\Delta E_{\max}^{(V)}}{V(\lambda)} = 146,412884$

Вт·м<sup>-2</sup>, максимальный поток фотонов на одном фотоприемном элементе размером  $a_x = a_y = 6,5$  мкм за такт 1 мс составит  $\Delta F_{\max} = \frac{\Delta E_{\max}}{e(\lambda)} \cdot t \cdot a_x \cdot a_y = 1,7282848448 \cdot 10^7$ , откуда

в соответствии с (14) максимальное число градаций будет  $w_{\max} = 1040$ . Учет собственных шумов видеотракта  $\sigma_{ш} = 50$  фотоэлектронов за такт при  $\eta(\lambda) = 0,6$  в соответствии с (13) уменьшает максимальное число градаций до  $w_{\max} = 1020$ . Увеличение же собственного размера фотоприемного элемента вдвое (до 13 мкм) приводит также к двукратному росту максимального числа градаций  $w_{\max} = 2080$ .

Таким образом, в соответствии с (8), увеличение собственных размеров фотоприемных элементов, что соответствует переходу к цифровым аэрокосмическим системам дистанционного наблюдения низкого разрешения ведет к существенному росту информативности получаемых цифровых изображений за счет увеличения числа разрешаемых на местности характерных элементов при одновременном незначительном (на единицы бит) увеличении значащей

разрядности пикселей. Однако следует четко осознавать, что данная картина сохраняется только при определенном – выше порогового – превышении размера характерной детальности  $l$  решаемой задачи дистанционного наблюдения линейного разрешения оптико-электронной аппаратуры на местности  $d$ . При достижении  $l \approx 2d$  (что соответствует частоте Найквиста) цифровая аппаратура в принципе теряет способность решать указанную задачу дистанционного наблюдения. Поэтому, на наш взгляд, общий характер зависимости информативности цифрового аэрокосмического снимка от обеспечиваемого линейного разрешения на местности (грубо – от размера фотоприемного элемента при эквивалентной оптике) должен иметь пилообразный характер:



**Рис.4. Зависимость информативности цифрового аэрокосмического изображения от линейного разрешения на местности**

Отсюда с неизбежностью следует вывод о том, что каждая группа задач аэрокосмического мониторинга, характеризующаяся собственной требуемой детальностью, имеет свой собственный, оптимизированный под ее решение, набор параметров цифровой оптико-электронной аппаратуры дистанционного наблюдения.

---

**Список литературы**

1. Nieke J., Schwarzer H., Neumann A., Zimmermann G. Imaging Spaceborne and Airborne Sensor Systems in the Beginning of the Next Century.- Berlin: DLR German Aerospace Research Establishment Institute for Space Sensor Technology, 2002.- 12 p.
2. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике: Пер. с англ.- М.: ИЛ, 1963.- 830 с.
3. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений.- М.: Сов. радио, 1970.- 728 с.
4. Самойлов Ф. Эволюция формирователей изображения на приборах с зарядовой связью // Техника кино и телевидения, 1994.- № 1.- С.22-34.
5. Эдельштейн Ю.Г. О вероятностной аналогии параметров изображения в оптико-электронных системах // Тезисы докладов XVI международной научно-технической конференций по фотоэлектронике и приборам ночного видения.- М.: ГУП НПО "Орион", 2000.- С.71-72.
6. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику.- М.: Наука, 1981.- 640 с.
7. Майоров В.П., Семин М.С. Шумел фотон... или еще раз о чувствительности ПЗС-камер // Видеоскан, 2001.- С.23-26.