

УДК 528.553.98

Обоснование методики оценки эффективности дистанционного зондирования космических оптических систем Земли

В. И. Кононов, А. Д. Федоровский

Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

Надійшла до редакції 18.04.95

Розглядаються інтегральні критерії та методика оцінки ефективності космічних оптичних систем дистанційного зондування. Пропонується нова форма виразу, що зв'язує ймовірність дешифрування космічних знімків з параметрами сигналів, критеріями оцінки апаратури та масштабом зйомки.

Программа решения различных задач научного и прикладного характера с помощью космических аппаратов серии «Січ» предусматривает комплексное использование информации о поверхности Земли, в том числе информации, полученной в оптическом диапазоне спектра с разным пространственным разрешением.

В связи с этим очевидна необходимость разработки методики прогнозирования результатов работы оптических систем построения изображений с использованием соответствующих критериев оценки, математических моделей систем и их отдельных звеньев.

Под оценкой эффективности этих систем будем понимать определение значений вероятностных характеристик обнаружения (дешифрирования) различных объектов или процессов на земной поверхности при заданных параметрах аппаратуры и масштабах съемки.

Ниже для случая аэрокосмических фотографических и сканирующих систем оптического диапазона, будут сформулированы выражения, связывающие вероятность дешифрирования с параметрами сигналов, критериями оценки аппаратуры и масштабом съемок.

Исторически для аппроксимации зависимости между вероятностями распознавания объектов и

масштабом аэрофотосъемки использовалась экспоненциальная зависимость (Макдональд, 1959; Живичин, Соколов, 1980; Матиясевич, 1989). Использование экспоненты с переменным отрицательным показателем степени для аппроксимации такого сложного процесса, как связь между вероятностью дешифрирования изображений и разрешающей способностью системы, явилось весьма удачным решением. При уменьшении разрешающей способности системы вероятность дешифрирования изображения при прочих равных условиях всегда уменьшается, т. е. зависимость между этими величинами имеет «падающий» характер. Такой же характер имеет зависимость между вероятностью распознавания изображения и масштабом съемки при фиксированных параметрах съемочной аппаратуры.

По нашему мнению, такой характер рассматриваемых зависимостей имеет фундаментальное значение, что позволяет успешно использовать экспоненту в отрицательной степени для их аппроксимации, а параметры аппроксимации использовать в дальнейшем в процессе прогнозирования эффективности исследуемых систем.

Существенным недостатком приведенных выше подходов (Матиясевич, 1989) является использование значений разрешающей способности в качестве

критерия оценки, который, как показали многочисленные эксперименты, неоднозначно связан с масштабом фотографирования при заданной вероятности распознавания (Березин, Кононов, 1991).

Как следует из теории статистических решений и теории информации, критериями, наиболее тесно коррелирующими с вероятностными характеристиками систем по распознаванию изображений, являются критерии отношения сигнал/шум (Шестов, 1967).

В связи с изложенным предлагается рассмотреть новую форму выражения для вероятности дешифрирования изображений p , основное отличие которой заключается в замене разрешающей способности как основного критерия оценки системы на функционал $f(c/\text{ш})$ от величины отношения сигнал/шум на выходе системы.

Предлагаемое выражение имеет вид

$$p = \exp\left\{-\left[\frac{m - m_0}{(L/B)f(c/\text{ш})}\right]^n\right\}, \quad (1)$$

где L — максимальный размер объекта [мм], B — так называемый «коэффициент формы» (Живичин, Соколов, 1980), m — знаменатель масштаба съемки, m_0 — знаменатель масштаба съемки, при котором значение вероятности дешифрирования данного объекта по его изображению, полученному данной системой, практически равно 1.

Уравнение (1) является дальнейшим развитием подобного выражения, предложенного в работе Кононова (1991), где в качестве оценки системы по критерию отношения сигнал/шум использовался функционал в виде информационной оценки $\sqrt{C_1}$.

Для каждой конкретной системы при прочих равных условиях уравнение (1) является двухпараметрическим, где первый параметр — B , а второй параметр — показатель степени n . Параметр m_0 не является самостоятельным, а зависит от величин L/B и $f(c/\text{ш})$.

Отношение L/B в выражении (1) можно трактовать как линейный размер некоторой обобщенной детали данного объекта, зависящий при прочих равных условиях от следующих основных факторов: от размеров существенных деталей объекта, от степени сходства объектов в предъявляемом ансамбле и особенностей их формы, от характера фона и освещения, а также от квалификации дешифровщиков.

Коэффициент B в выражении (1) вместе с показателем степени n могут быть надежно определены только в результате статистического эксперимента по распознаванию изображений данного объекта, которые получены системами с известными пара-

метрами в различных масштабах съемки. Поэтому коэффициент B правильной было бы назвать «коэффициентом распознаваемости».

Рассмотрим особенности вариантов функционала отношения сигнал/шум $f(c/\text{ш})$ при оценках различных аэрокосмических фотографических и сканирующих систем. Эти варианты могут иметь разную форму. Необходимость различных вариантов функционала определяется существенным отличием задач, решаемых системами дистанционного зондирования, которые в первом приближении можно разделить на два основных класса.

К первому классу относятся задачи, в процессе решения которых необходимо распознать мелкие объекты сложной формы и малого контраста. Примером этих задач могут служить многочисленные задачи, решаемые в интересах экологии, геологии, картографии, сельского хозяйства.

Второй класс задач связан с обнаружением в различных спектральных областях крупноразмерных образований малых контрастов с наличием или отсутствием внутренней структуры. К этим задачам относятся задачи геофизики, океанологии, водного хозяйства.

При решении столь отличных вопросов естественно использовать специфические модели входных сигналов, а для оценки систем — разные формы функционала $f(c/\text{ш})$.

Как было отмечено ранее, отношение сигнал/шум в функционалах $f(c/\text{ш})$ определяется на выходе системы. Для определения этих отношений необходимо построить математические модели систем с учетом источников помех. Эти математические модели целесообразно реализовывать в области двумерного Фурье-преобразования, когда сигналы и шумы представляются их эквивалентными спектрами Хинчина—Винера (спектральными плотностями дисперсий), а отдельные звенья систем — эквивалентными фильтрами пространственных частот (двумерными функциями передачи модуляции — ФПМ).

При этом на первом этапе можно ввести еще одно допущение, что спектры сигналов и шумов и эквивалентные ФПМ элементов систем представлены функциями, изотропными в области двумерных пространственных частот. В этом случае рассмотрение может производиться относительно обобщенной пространственной частоты θ :

$$\theta = \sqrt{(\theta_x^2 + \theta_y^2)}, \quad (2)$$

где θ_x и θ_y — пространственные частоты по осям x и y соответственно.

Такие представления упрощают синтез результирующих характеристик систем по характеристикам

отдельных звеньев и расчеты отношения сигнал/шум на выходе систем.

В работах авторов (Кононов, Федоровский, 1995) обоснованы и подробно рассмотрены математическая модель входного сигнала и вариант функционала $f(c/\text{ш})$ применительно к аэрокосмическим фотографическим системам при дешифрировании негативных изображений малоразмерных объектов сложной формы (задачи первого класса). В этом случае выражение для математической модели входного сигнала имеет вид:

$$S_{c.вх}(\theta) = 2.8\Delta D^2 \left(\frac{L}{B \cdot m} \right)^2 \exp \left[-2.6 \left(\frac{L}{B \cdot m} \right)^2 \theta^2 \right], \quad (3)$$

где $S_{c.вх}(\theta)$ — спектр Хинчина—Винера входного сигнала, ΔD — тоновый контраст исследуемого объекта (амплитуда входного сигнала).

Для этого же класса задач в случае сканирующих систем модель входного сигнала имеет форму, подобную выражению (3), отличие состоит в том, что вместо тонового контраста объекта ΔD используется приращение светового потока ΔF .

Для задач первого класса функционал $f(c/\text{ш})$ задается в виде информационной оценки системы — C_1 (Кононов, 1991):

$$f(c/\text{ш}) = \sqrt{C_1} = \left[\pi \int_0^{R_k} \theta \log_2 \left[1 + \frac{S_{c.вх}(\theta) T^2(\theta)}{S_{ш.фн}(\theta) + S_{ш.зр}(\theta) [k T_{зр}(\theta)]^{-2}} \right] d\theta \right]^{0.5}, \quad (4)$$

где $T(\theta)$ — результирующая ФПМ системы, $S_{ш.фн}(\theta)$ и $S_{ш.зр}(\theta)$ — спектры Хинчина—Винера шумов фотоприемника и зрительного анализатора соответственно, $T_{зр}(\theta)$ — ФПМ зрительной системы оператора, k — коэффициент увеличения увеличительного прибора, R_k — разрешающая способность системы.

Пространственные частоты всех функционалов в этом случае приводятся к плоскости фотоприемника.

Второй член в знаменателе отношения сигнал/шум учитывает только влияние передаточных и шумовых характеристик зрительной системы и коэффициента увеличения увеличительного прибора. Если этот член приравнять нулю, то оценка будет производиться без учета влияния зрительного анализатора.

Информационная оценка C_1 существенно отличается от информационной емкости системы C_0 . Фи-

зически информационная оценка C_1 характеризует количество информации, отображаемое системой на единице площади ее фотоприемника, по отношению к принятой модели входного сигнала (3) с изменяемой малой амплитудой ΔD . По существу оценка C_1 в отличие от C_0 является относительной оценкой, зависящей от способа определения входного сигнала (Кононов, 1991).

Следует отметить, что синтез системы в области Фурье-преобразования справедлив только для случая, когда все звенья системы являются линейными. Звено фотографического материала в фотографической системе обладает двумя существенными нелинейностями: нелинейностью амплитудной характеристики и зависимостью фотографического шума от уровня входного сигнала. Другими словами, шумы не отвечают условию аддитивности (нелинейность второго порядка). Поэтому в математической модели фотографической системы особое внимание уделено линеаризации этого звена системы относительно малого параметра входного сигнала.

Внимание к сигналам малого контраста определяется тем обстоятельством, что именно эти сигналы являются наиболее характерными и наиболее критическими в реальных задачах космических исследований, но при этом автоматически упрощается и процедура линеаризации передаточных характеристик в математических моделях.

Для задач второго класса выражение (1) проверялось применительно к сканирующим ИК-системам, используемым для регистрации крупноразмерных температурных полей.

В этом случае в качестве функционала $f(c/\text{ш})$ используется величина μ_s интегрального отношения сигнал/шум в пространственно-частотной области (Федоровский, 1995):

$$f(c/\text{ш}) = \sqrt{\mu_s} = \left[\frac{\pi}{P^2} \int_0^{R_k} \theta S_{c.вх}(\theta) T^2(\theta) d\theta \right]^{0.5}, \quad (5)$$

где P — минимальное значение потока излучения, вызывающего на выходе приемника излучения сигнал, равный среднему квадратичному значению шума. В формуле (5) выражение для входного сигнала представляется в виде, аналогичном выражению (3):

$$S_{c.вх}(\theta) = 2.8\Delta F^2 \cdot Q \exp(-2.6Q \cdot \theta^2), \quad (6)$$

где Q — площадь проекции сканирующей апертуры в плоскость объекта.

Как видно из сравнения выражений (3) и (6) в последнем случае вместо элемента с площадью $[L/(Bm)]^2$ используется площадь сканирующей

апертуры Q , а вместо амплитуды входного сигнала ΔD — приращение лучистого потока ΔF .

Следует отметить, что в выражении (5) и (6) все пространственные частоты сигналов, шумов и передаточных характеристик элементов систем, приводятся к плоскости исследуемых объектов, т. е. к плоскости земной поверхности.

В настоящее время разработаны пакеты прикладных программ для ПК IBM, реализующие данную методику, и соответствующие математические модели сигналов, шумов и передаточных характеристик элементов систем, а также математическую модель зрительного анализатора.

Сравнения результатов расчетов с использованием предлагаемой методики (1, 3, 4) и традиционного критерия разрешающей способности с материалами экспериментальных проверок для задач первого класса приведено в работе Кононова, Федоровского (1995).

Эти сравнения показали, что ошибки в определении вероятностей распознавания малоразмерных объектов по предложенной методике, как для фото, так и для сканирующих ИК-систем, уменьшаются примерно в 1.5 раза по сравнению с использованием критерия, основанного на разрешающей способности.

Анализ экспериментальных данных и результатов расчетов для задач второго класса показал, что использование модели сигнала (6) и интегрального критерия (5) совместно с выражением (1) позволяет более чем в два раза уменьшить ошибки в определении вероятностей дешифрирования по сравнению с классическим критерием отношения сигнал/шум. Эксперимент проводился на уровне физического моделирования с использованием сканирующих ИК-систем с изменяющимися параметрами и набора моделей крупноразмерных сигналов, отличающихся пространственно-частотным спектром и температурным контрастом (Федоровский, 1995).

Предложенная методика может быть использована

для выбора оптимальных параметров оптической аппаратуры дистанционного зондирования и режимов полета космических носителей при заданных вероятностях дешифрирования и решения поставленных задач.

Кроме того, целесообразно использовать изложенный метод при разработке ТЗ и проектировании новых космических оптических систем построения изображений, а также для оценки систем и соответствующих космических снимков, приобретаемых за рубежом.

Березин Н. П., Кононов В. И. Разрешающая способность: история, состояние и развитие // Оптико-механическая промышленность.—1991.—№ 11.—С. 33—38.

Живичин А. И., Соколов В. С. Дешифрирование фотографических изображений. — М.: Недра, 1980.—157 с.

Кононов В. И. Связь информационных и вероятностных оценок систем формирования изображений (иконических систем) // Оптико-механическая промышленность.—1991.—№ 11.—С. 13—18.

Кононов В. И., Федоровский А. Д. Методика выбора масштаба аэро-фото и ИК съемок при дистанционных геологических исследованиях // Геологический журн.—1995.—№ 1.—С. 103—105.

Макдональд Д. Качественная оценка фотографирующей системы для аэросъемки // Оценка качества оптического изображения: Сб. тр. — М.: Геодезиздат, 1959.—С. 61—83.

Матиясевич Л. М. Введение в космическую фотографию. — М.: Недра, 1989.—132 с.

Федоровский А. Д. К вопросу выбора тепловизионной системы для исследования поверхности моря // Морской гидрофиз. журн.—1995.—№ 4.—С. 78—80.

Шестов Н. С. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех. — М.: Сов. радио, 1967.—348 с.

TECHNIQUE FOR ESTIMATING THE EFFICIENCY OF SPACE OPTICAL SYSTEMS FOR THE EXPLORATION OF THE EARTH FROM OUTER SPACE

V. I. Kononov and A. D. Fedorovsky

Methods and criteria for estimating the efficiency of space optical systems are considered. A new expression is proposed which relates the probability of space image decoding to signal parameters, equipment estimation criteria, and image scale.