

Обоснование методики определения разрешения на местности аэрокосмических систем с дискретными фотоприемниками

В. И. Кононов

Центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины, Киев

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Данные о Земле, полученные с помощью аэрокосмических систем с дискретными фотоприемниками находят все большее применение для решения разнообразных природохозяйственных задач. Широкое применение этих данных и повсеместное внедрение цифровых технологий приводят к настоятельной необходимости разработки методик количественной оценки изобразительных возможностей качества этих данных. Применение данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) высокого разрешения, полученных дискретными приемниками, для целей картографии, и особенно для официального государственного картографирования территории, требует проведения количественной оценки качества изображения. Особо важной для оптимизации использования данных в картографии, снижения затрат на их приобретение, обработку и получение конечных результатов, удовлетворяющих требова-

ниям нормативных документов, является оценка данных по критерию пространственного разрешения изображения на местности как одному из важнейших критерий, который позволяет судить о потребительских свойствах данных ДЗЗ. Поэтому назрела необходимость научного анализа различных подходов к оценке реального разрешения на местности систем дистанционного зондирования Земли высокого разрешения, применяемых для решения различных природохозяйственных и специальных задач.

Для систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с аналоговыми фотоприемниками (в дальнейшем — аналоговые системы), типичным представителем которых являются аэрофотосистемы, разработаны классические методики оценки величины разрешения на местности, основанные на использовании понятия «разрешающая способность» [4]. Для параметров аналоговых (аэрофотографических) систем в Украине имеются разрабо-

танные нормативные документы и государственные стандарты [1, 8].

В отличие от этого, для цифровых аэрокосмических систем (ДЗЗ) с дискретными фотоприемниками (дискретных систем), нет общепринятых подходов и нормативных документов для оценки величины разрешения на местности. В дальнейшем мы будем рассматривать только панхроматические каналы высокого разрешения.

Широко применяемые в настоящее время для оценки качества изображений такие параметры дискретных систем, как линейный размер пикселя, приведенный к плоскости объектов съемки, и отношение сигнал/шум, связаны с величиной разрешения на местности, но не адекватны этой величине. При этом, как будет показано ниже, линейный размер пикселя является величиной неоднозначной, и разные фирмы трактуют эту величину по-разному.

Так как в терминологии оценки изображений, получаемых системами ДЗЗ с дискретными фотоприемниками, имеется много разнотечений, возникла необходимость рассмотреть содержание основных терминов, используемых в данной работе.

Если разрешающая способность R является параметром бортовых систем ДЗЗ, то разрешение на местности (R_m) характеризует непосредственно изображение, получаемое данной системой. Таким образом, разрешение на местности является той величиной, по которой получатель судит о потребительских свойствах изображений.

Необходимо подчеркнуть принципиальное отличие разрешающей способности от разрешения на местности. Размерность разрешающей способности R , как указано в [1], — обратные линейные единицы (мм^{-1} , так как разрешающая способность обычно определяется в фокальной плоскости), размерность разрешения на местности R_m — [м]. В некотором смысле разрешение на местности является величиной обратно пропорциональной по отношению к разрешающей способности.

Целью данной работы являются научное обоснование и разработка практической методики оценки величины разрешающей способности и разрешения на местности применительно к системам ДЗЗ с дискретными фотоприемниками.

Здесь необходимо сделать несколько замечаний.

Во-первых, подобной методики в законченном виде нет в известных нам литературных источниках.

Во-вторых, так как нас интересуют вопросы оценки изображений, полученных в условиях реальной съемки, то возникает задача учета влияния многочисленных факторов реальной съемки, отрицательно влияющих на качество изображения. Задача это достаточно сложная и требует применения

статистических методов и разработки специального математического обеспечения [10]. Поэтому, чтобы получить первоначальные реальные результаты, мы будем использовать приближенные методики, учитывающие влияние только основных факторов.

В-третьих, в качестве основного методического подхода для получения окончательных выражений нами будут использованы возможные аналогии между разработанным методом расчета аэрофотографических (аналоговых) систем и методом расчета дискретных систем (при максимально возможном учете влияния фактора дискретизации).

Принятый методический подход определяет порядок изложения материалов научного обоснования методики: вначале будут изложены известные материалы применительно к аэрофотосистемам, затем рассматриваются особенности построения изображений дискретными системами и в заключение — метод расчета дискретных систем, использующий возможные аналогии с методом расчета аэрофотосистем.

Под разрешением на местности (spatial resolution) нами понимается характеристика изображения, созданного данной системой, определяемая размером наименьшего объекта на земной поверхности (протяженного или компактного) заданного контраста, который может быть обнаружен на этом изображении с заданной вероятностью.

В качестве объектов, минимально обнаруживающие размеры которых принимаются в качестве величины разрешения на местности, как правило, принимаются малоразмерные компактные объекты, близкие по форме к квадрату или кругу, или узкие протяженные объекты. В первом случае за разрешение на местности принимается величина стороны квадрата или диаметр круга, во втором — ширина протяженного объекта. Многочисленные статистические исследования процессов обнаружения компактных и протяженных объектов показали, что при прочих равных условиях размер на местности компактных объектов примерно в два раза превосходит ширину протяженных объектов [1].

2. КЛАССИЧЕСКОЕ ПОНЯТИЕ КРИТЕРИЯ «РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ» И МЕТОДЫ ЕГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Рассмотрим вначале определения основных терминов, касающихся разрешающей способности и разрешения на местности для аналоговых систем, в частности для аэрофотосистем. Эти понятия отражены в ГОСТе СССР 2395-79 [1] (соответствующий ГОСТ Украины еще не разработан). Такой порядок изложения целесообразен из соображения, что впоследствии можно будет установить возмож-

ные соответствия с аналогичными терминами для дискретных систем.

Разрешающая способность R : «Характеристика аэрофотоаппарата, оптико-фотографической системы, аэрофотоматериала, определяемая максимальной пространственной частотой периодической решетки, штрихи которой визуально различимы в фотографическом изображении, образованном данной системой при использовании в качестве объекта стандартной миры заданного контраста» (пункт 107 ГОСТ 2395-79).

Следует обратить внимание на важные особенности этого определения. Во-первых, это совместная характеристика оптической системы и фотоприемника, которая определяется в наземных условиях, а поэтому такие факторы полета, как сдвиги изображения и влияние атмосферы, не учитываются. Во-вторых, эта величина определяется только с использованием стандартных изображений заданного контраста, называемых мирами. В-третьих, и это самое важное: величина разрешающей способности определяется максимальной пространственной частотой той группы штрихов периодических решеток, которые визуально различимы в изображении, полученном данной системой.

Таким образом, размерность разрешающей способности соответствует размерности пространственной частоты.

Пространственная частота N : «Число периодов синусоидального или прямоугольного распределения интенсивности излучения, приходящееся на единицу длины» (пункт 93 ГОСТ 2395-79).

Здесь наиболее важно то, что пространственная частота определяется числом периодов периодического сигнала, которые приходятся на единицу длины. Период включает в себя два полупериода, что в приложении к изображению стандартной миры включает в себя два штриха — черный и белый. Таким образом, величина периода определяется размером двух штрихов, а величина пространственной частоты обратна этому размеру, и ее размерность обратна линейной величине ($1/\text{мм}$ в фокальной плоскости, $1/\text{м}$ в плоскости земной поверхности):

$$N = 1/(2\Delta_{ш}), \quad (1)$$

где $\Delta_{ш}$ — ширина одного штриха соответствующей группы стандартной миры [$\text{мм}, \text{м}$]; N — пространственная частота [$\text{мм}^{-1}, \text{м}^{-1}$].

В приложении к дискретным системам ширина штриха в фокальной плоскости приближенно соответствует линейному размеру элементарного фотоприемника.

Рассмотренное нами понятие «разрешающая способность» аэрофотосистем определяется в лабораторных условиях и не учитывает влияние факторов

полета, ухудшающих качество изображений. Для определения размеров наименьшего одиночного объекта, дешифрируемого (обнаруживаемого) на аэроснимке, необходимо оценить реальную разрешающую способность системы с учетом влияния вышеприведенных факторов полета.

Есть методики определения разрешающей способности аэрофотосистемы в полете, для которых создаются специальные полигоны, где на земной поверхности выкладывается набор миц, размеры которых соответствуют масштабам съемки. Эти методики ввиду своей трудоемкости для космических систем практического применения не нашли.

Для аэрофотосистем в настоящее время разработаны аналитические методики определения разрешающей способности в полете. Современные методики расчета реальной разрешающей способности аэрофотосистемы в полете основаны на использовании аппарата функций передачи модуляции (ФПМ) отдельных звеньев системы и кривой пороговой модуляции аэрофотоматериала [4, 12].

Рассмотрим упрощенную схему прохождения информации в аэрокосмической системе ДЗЗ, представленную на рис. 1. В этой схеме отражены основные факторы, влияющие на качество изображения в условиях реальной съемки, при этом каждый фактор представлен отдельным звеном:

1) сигнал от стандартной миры контраста $k = (B_{\max} - B_{\min})/(B_{\max} + B_{\min})$, где B_{\max} и B_{\min} — максимальное и минимальное значения яркости объекта;

2) звено влияния атмосферы (k_{at} — коэффициент ослабления контраста атмосферой за счет светорассеяния, $T_{typ}(N)$ — ФПМ, отражающая влияние турбулентности атмосферы);

3) звено учета влияния сдвигов изображения ($T_{cd}(N)$ — ФПМ сдвигов, t_ϕ — величина выдержки, с);

4) звено учета влияния aberrаций оптической системы ($T_{ab}(N)$ — ФПМ влияния aberrаций);

5) звено учета влияния дифракции оптической системы ($T_{dif}(N)$ — ФПМ влияния дифракции);

6) звено учета дефокусировки ($T_{def}(N)$ — ФПМ влияния дефокусировки);

7) звено учета влияния фотоприемника — аэрофотоматериала ($T_{phi}(N)$ — ФПМ фотоприемника);

8) звено учета шумов фотоприемника ($k_{nop}(N)$ — кривая пороговой модуляции фотоматериала или фотоприемника), $R^{1/k}$ — разрешающая способность в полете [мм^{-1}].

Структурная блок-схема на рис. 1 полностью применима для анализа аэрофотосистем, однако она учитывает только основные факторы, влияющие на результирующее качество аэрофотоизображения. Следует отметить, что все характеристики

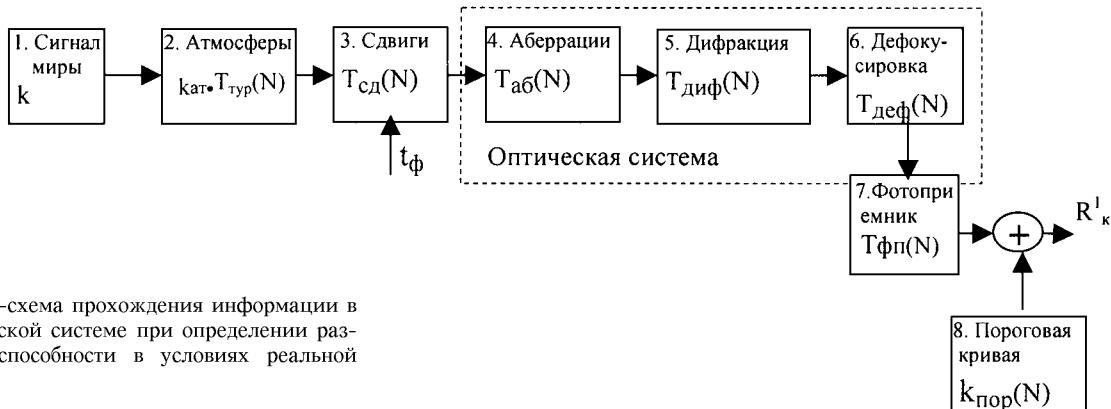


Рис. 1. Блок-схема прохождения информации в аэрокосмической системе при определении разрешающей способности в условиях реальной съемки

элементов блок-схемы рассматриваются в фокальной плоскости систем.

Результирующая ФПМ аэрофотосистемы с учетом факторов полета будет иметь вид

$$T_{\Sigma}(N) = T_{\text{тип}}(N) \cdot T_{\text{сд}}(N) \cdot T_{\text{аб}}(N) \cdot T_{\text{диф}}(N) \cdot T_{\text{деф}}(N) \cdot T_{\phi\pi}(N), \quad (2)$$

где $T_{\Sigma}(N)$ — результирующая ФПМ аэрофотосистемы в полете; $T_{\phi\pi}(N)$ — ФПМ аэрофотоматериала; остальные составляющие соответствуют обозначениям на рис. 1.

Разрешающая способность при известной результирующей ФПМ — $T_{\Sigma}(N)$ определяется с использованием эмпирической кривой пороговой модуляции $k_{\text{пор}}(N)$ [4]:

$$k_{\text{пор}}(N) = \sqrt{0.05^2 + 0.002 \cdot \sigma_D^2 \cdot N^2}, \quad (3)$$

где σ_D — среднее квадратичное значение шумов гранулярности фотоматериала, измеренное апертурой 400 мкм² в величинах оптической плотности (величина σ_D зависит от площади измерительной апертуры [4]).

Кривая пороговой модуляции $k_{\text{пор}}(N)$ учитывает влияние на величину разрешающей способности шумов системы (σ_D). Точка пересечения $k_{\text{пор}}(N)$ с кривой результирующей ФПМ системы $T_{\Sigma}(N)$ соответствует значению разрешающей способности аэрофотосистемы в полете — R_{Σ}^1 . Выражение (3) приведено для случая, когда коэффициент контрастности фотоматериала $\gamma = 1$.

Разрешающая способность аэрофотосистемы в полете R_k^1 для контраста k получается решением уравнения:

$$k \cdot k_{\text{пор}}(R_k^1) = k_{\text{пор}}(R_k^1). \quad (4)$$

Уравнение (4) решается либо численным, либо графическим методом.

Следует остановиться на связи полученной вели-

чины разрешающей способности R_k^1 с минимальным диаметром компактного объекта (круга или квадрата), дешифрируемого на изображениях с высокой вероятностью (≈ 0.8). По исследованиям, проведенным в Институте им. Можайского (Санкт-Петербург) [6] с использованием больших объемов статистических материалов по дешифрированию аэрокосмических фотографических снимков, эта связь определяется эмпирическим выражением

$$d \approx \frac{2.5 \dots 3.3}{R_{\Sigma}^1}, \quad (5)$$

где d , мм — диаметр дешифрируемого компактного объекта минимальных размеров в плоскости снимка.

В этом случае величина разрешения на местности будет равна

$$R_m \approx d \cdot m = \frac{(2.5 \dots 3.3)m}{R_{\Sigma}^1}. \quad (6)$$

Такова общепринятая в настоящее время методика расчета разрешающей способности аэрофотосистем с учетом влияния факторов полета. Не будем останавливаться на выражениях для ФПМ, входящих в формулу (2), так как рассмотренная выше методика приведена в виде примера, по аналогии с которой будет разрабатываться методика для дискретных систем.

3. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТЕЙ СТАТИСТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБНАРУЖЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрим возможности учета статистического характера процесса обнаружения и распознавания и влияния на этот процесс разрешающей способности аэрофотосистем с учетом влияния факторов реальной аэрофотосъемки.

Известна классическая формула А. И. Живичина, которая связывает вероятность обнаружения и

распознавания объектов с их контрастом и особенностями их формы, разрешающей способностью аэрофотосистемы в полете и масштабом съемки [2]:

$$p = \exp \left[- \left(\frac{m}{(L/B)2R_{1.0}^1 \sqrt{\Delta D}} \right)^2 \right], \quad (7)$$

где p — вероятность дешифрирования объекта; m — знаменатель масштаба съемки (1: m , например 1:1000); $R_{1.0}^1$, мм^{-1} — разрешающая способность системы в полете по контрасту $k = 1.0$; L , мм — максимальный линейный размер компактного объекта на местности; B — «коэффициент формы» — статистический коэффициент, определяющий, какая часть объекта является наиболее существенной для его распознавания [2]; ΔD — тоновый контраст изображения объекта в единицах оптической плотности D [2].

Дальнейшие исследования показали, что в выражении (7) член $R_{1.0}^1 \sqrt{\Delta D} \approx R_k^1$, поэтому перепишем это выражение в виде

$$p = \exp \left[- \left(\frac{m}{(L/B)2R_k^1} \right)^2 \right]. \quad (8)$$

Решая это уравнение относительно максимально го размера дешифрируемого объекта L , получим

$$L = \frac{mB}{2R_k^1 \sqrt{(-\ln p)}}. \quad (9)$$

Значение величины $\sqrt{(-\ln p)}$ для различных значений вероятности p приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения величин $\sqrt{(-\ln p)}$

p	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$\sqrt{(-\ln p)}$	0.93	0.715	0.6	0.47	0.32

Как видно из формулы (9) и данных табл. 1, при повышении вероятности дешифрирования с 0.7 до 0.9 (при прочих равных условиях) размер дешифрируемого объекта на местности L увеличивается практически в два раза.

Обычно большинство потребителей удовлетворяет уровень вероятности $p = 0.7 \dots 0.8$.

При определении величины разрешения на местности R_m нас интересуют размеры минимальной детали на местности, близкие по форме к квадрату или кругу. Исходя из экспериментальных данных, приведенных в работе [2, табл. 22], среднее значение коэффициента B для фигур типа круг или квадрат будет 1.36 ± 0.27 . С учетом значения B формула (9) для случая распознавания принимает вид:

$$L = \frac{0.68m}{R_k^1 \sqrt{(-\ln p)}}, \quad (10)$$

где

$$m = H/f, \quad (11)$$

H — высота полета, f — фокусное расстояние оптической системы.

Для случая обнаружения, когда не надо определять особенности формы объекта, что соответствует условиям определения разрешения на местности, коэффициент $B \approx 1$. В этом случае величина L в выражении (9) тождественна величине разрешения на местности, а выражение (10) можно переписать в виде

$$L = R_m = \frac{0.51m}{R_k^1 \sqrt{(-\ln p)}}. \quad (12)$$

4. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ СИСТЕМАМИ С ДИСКРЕТНЫМИ ФОТОПРИЕМНИКАМИ И ТЕРМИНЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭТОГО ПРОЦЕССА

При анализе систем с дискретными фотоприемниками необходимо иметь в виду, что схема прохождения информации в этих системах подобна схеме прохождения информации в аналоговых системах, представленной на рис. 1, с двумя уточнениями: во-первых, вместо сигнала стандартной меры в звене 1 используется сигнал элементарного объекта (квадрата или круга — $S_{c,bx}(N)$); во-вторых, вместо аналогового фотоприемника (аэрофотопленки) звено 7 отражает свойства отдельного дискретного фотоприемника, из которых составлена линейка, или матрица, дискретной системы — $T_{\phi n}(N)$.

Влияние оптической системы, дефокусировки и факторов реальной аэрокосмической съемки на сигналы остаются теми же, что и представленные в схеме на рис. 1.

Наиболее употребляемой величиной для оценки качества изображений аэрокосмических датчиков с дискретным фотоприемником является размер пикселя. Отметим, что термин «пиксель» применять в отношении аэрокосмических систем ДЗЗ с дискретными фотоприемниками не вполне корректно, более точным является термин «линейный размер элементарного фотоприемника линейки или матрицы, или его геометрическая проекция на земной поверхности» (см. комментарии в разд. 6).

Однако в фирменных каталогах, где приводятся параметры этих датчиков изображений, данная величина трактуется различно.

Для некоторых систем, к которым относятся и системы спутников IRS-1C, размер пикселя на земной поверхности является геометрической проекцией линейного размера пикселя линейки фото-

приемников, т. е. величина пикселя на земной поверхности получается простым умножением размера пикселя линейки фотоприемников на знаменатель масштаба съемки (размер пикселя IRS-1C на земной поверхности — 5.8 м). В этом случае не учитывается влияние атмосферы, сдвига изображения, дифракции и аберрации оптической системы, неточности фокусировки и других факторов, которые приводят к размытию пикселя (увеличению его размеров) и ухудшению разрешения на местности.

Для таких систем, как «Ikonos», указывается величина размера пикселя на местности: $e = 1$ м. Геометрическая проекция пикселя на поверхность Земли в этом случае будет 0.8 м (высота полета 681 км, фокусное расстояние 10 м, размер пикселя линейки $\Delta = 0.012$ мм). Приводимая величина размера пикселя в 1.25 раза больше его геометрической проекции. Как показали расчеты по формулам, которые будут приведены ниже, это соответствует учету только дифракционной ФПМ оптической системы (без учета влияния центрального отверстия в зеркале зеркально-линзового объектива [6]).

Для системы IRS-1C приводимые размеры пикселя на земной поверхности 5.8 м строго соответствуют геометрической проекции размера пикселя линейки $\Delta = 0.007$ мм на земную поверхность с учетом масштаба съемки ($H = 81700$ м, $f = 0.98$ м, $m = 834000$). Таким образом, в этом случае не учитывается влияние оптической системы и факторов полета на увеличение реальных размеров пикселя на земной поверхности.

Примеры параметров датчиков сигналов систем IRS-1C и «Ikonos» показывают, что фирмы в рекламных целях не учитывают влияние многих других факторов, увеличивающих размер проекции пикселя на поверхность Земли (атмосфера, остаточные сдвиги изображения при работе системы компенсации сдвигов и многие другие).

Теперь перейдем к особенностям формирования изображений дискретными фотоприемниками, которые определяют минимальные размеры элементов на местности, воспроизводимые системой на создаваемых ею изображениях. Эти же факторы определяют величину разрешения системы на местности или в фокальной плоскости.

Рассмотрим физические особенности формирования разрешающей способности в дискретных фотоприемниках, которые принципиально отличают эти фотоприемники от аналоговых, типичным примером которых являются фотографические пленки.

В этом смысле главной особенностью аналоговых фотоприемников является постоянство их свойств по поверхности фотоприемника. Куда бы ни попала светящаяся точка, эффект ее размытия будет одинаков, т.е. разрешающая способность таких фотоприемников по всей поверхности фотоприемника

будет постоянна. Это позволяет достаточно строго использовать аппарат Фурье-преобразования для описания передаточных свойств таких фотоприемников (ФПМ фотографических материалов не изменяется по поверхности фотоприемника).

В дискретных системах передаточные свойства зависят от взаимного положения элементарного объекта на земной поверхности и мгновенной проекции на него пикселя дискретного фотоприемника в момент съемки. Если элементарный объект, размеры которого совпадают с размером проекции реального пикселя на поверхности Земли, полностью совпадает с проекцией пикселя, то он воспроизводится на изображении системы. В этом случае разрешение системы на местности равно проекции реального пикселя (с учетом всех дестабилизирующих факторов).

В случае попадания объекта на границу двух пикселей оба пикселя дают сигнал половинного контраста, а разрешение на местности будет определяться размером проекции двух пикселей, т.е. ухудшится в два раза.

В действительности может быть много случайных сочетаний взаимного положения объекта и проекции пикселей на поверхность Земли. Следует подчеркнуть, что в этом случае процесс формирования изображения дискретным фотоприемником носит принципиально случайный характер, зависящий от взаимного положения проекции пикселя на земную поверхность и точечного объекта на этой поверхности. Наиболее характерные варианты этих сочетаний рассмотрены на рис. 2 и 3. Там же рассмотрены варианты воспроизведения дискретным фотоприемником стандартной штриховой меры, по которой определяется разрешающая способность.

Рассмотрим два варианта формирования изображений, когда в качестве изображения используется штриховая мера, ширина проекции штриха которой равна размеру элементарного фотоприемника (а), и когда на фотоприемник проектируется изображение квадрата, совпадающее по размером с размером фотоприемника (б).

а. Штриховая мера (рис. 2).

В этом случае рассматриваются два положения: проекции штрихов меры полностью совпадают с

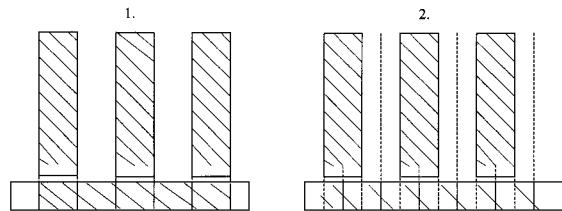


Рис. 2. Варианты взаимного положения штриховой меры и элементов дискретного фотоприемника (линейки)

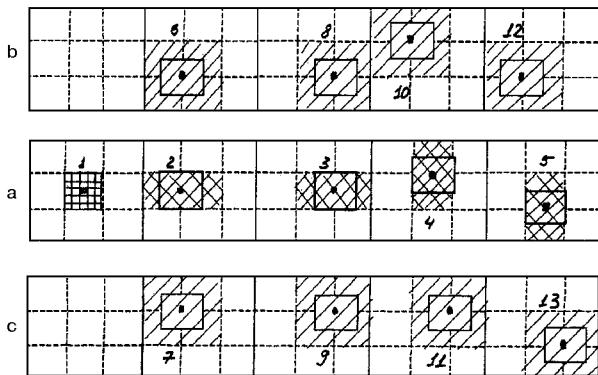


Рис. 3. Варианты взаимного положения проекций одиночного объекта и элементов дискретной фотоматрицы (выходные сигналы фотоприемников)

фотоприемниками матрицы (положение 1) и штрихи миры проектируются со смещением на половину элемента матрицы или линейки (положение 2).

В случае 1 происходит полное разрешение, в случае 2 мира совсем не разрешается (ровный серый фон). Остальные случаи сдвига включают в себя все промежуточные варианты (от полного разрешения до полного пропадания).

Рассмотренные варианты интересны тем, что далее, в случае равенства размеров элемента миры и элементов матрицы (условие частоты Найквиста), могут быть положения, когда разрешение миры отсутствует, т.е. условие Найквиста не обеспечивает 100 % вероятность разрешения.

б. Одиночный объект (рис. 3).

Объект представляет собой светящийся квадрат, размеры проекции которого на матрицу равны размерам элемента матрицы.

Исходное положение элемента изображения 1, случай полного совпадения элемента изображения и элемента матрицы. В этом случае на регистрирующем устройстве изображение будет соответствовать одному пикселью максимального контраста.

Рассмотрим все возможные положения проекции объекта на матрицу при смещении проекции на 0.5 размера элемента матрицы.

Здесь можно представить два варианта: первый вариант — смещение на 0.5 пикселя строго вверх или вниз и вправо или влево (строка *a* на рис. 3); второй вариант — смещение относительно смещенных на 0.5 пикселя проекций вверх или вниз, и вправо или влево еще на 0.5 пикселя. В первом варианте (строка *a* на рис. 3, положения 2—5) одновременно засвечиваются 2 пикселя, контраст при этом уменьшается в два раза.

Во втором варианте (строка *b* и *c* на рис. 3, положения 6—13) засвечиваются одновременно четыре пикселя, контраст при этом уменьшается в

четыре раза. В этом случае, если исходный объект был малого контраста, то он может быть вообще не обнаружен на изображении.

Таким образом, из 13 возможных вариантов случайного положения объекта относительно элемента матрицы при дискретном смещении на 0.5 пикселя только один вариант ($\approx 7\%$) воспроизводится с полным контрастом; четыре варианта ($\approx 31\%$) воспроизводятся с контрастом 0.5 и восемь вариантов — с контрастом 0.25 ($\approx 62\%$).

Рассмотренный пример физически объясняет положение теоремы Найквиста, из которой следует, что проекция объекта в плоскости фотоприемника по линейному размеру должна в два раза превосходить размер элемента матрицы. В этом случае при любых смещениях проекции объекта относительно элементов матрицы, хотя бы один пиксель всегда будет воспроизводиться с полным контрастом, что существенно повышает вероятность обнаружения одиночного объекта.

Из рассмотрения примеров следует, что вариант, когда на изображении может быть воспроизведен объект или штрих миры, размеры которых соответствуют размеру проекции пикселя системы на земную поверхность, маловероятен.

Для получения устойчивых результатов воспроизведения объектов на изображениях, получаемых дискретными системами, принято ограничивать максимальную полосу пропускания пространственных частот системами так называемой частотой Найквиста [7], которая определяется выражением

$$N_h = \frac{1}{2\Delta}, \quad (13)$$

где N_h , мм^{-1} — пространственная частота, в фокальной плоскости соответствующая частоте Найквиста; Δ , мм — линейный размер пикселя дискретного фотоприемника.

Из сопоставления выражения (13) с выражением (1) можно сделать вывод, что частота Найквиста в некотором смысле подобна понятию «разрешающая способность», рассмотренному нами применительно к аналоговым системам. Частота Найквиста, как и разрешающая способность, является величиной, обратной периоду колебаний, т. е. обратной двум элементам дискретизации.

В этом смысле понятие частоты Найквиста хорошо согласуется с требованиями фундаментальной теоремы дискретизации — теоремы Котельникова [11].

Следует отметить, что при определении частоты Найквиста используют только размер элемента фотоприемника или его проекции на поверхность Земли, при этом не учитывается значительное увеличение размера пикселя за счет влияния факторов, отраженных на блок-схеме (рис. 1). Поэтому

выражение (13) дает верхнюю оценку разрешающей способности системы по контрасту 1.0. Реальная разрешающая способность систем всегда несколько ниже разрешающей способности, соответствующей частоте Найквиста.

Разрешение на местности R_m по отношению к контрастным компактным объектам малых размеров определяется как величина, обратная разрешающей способности. Применительно к дискретным системам — это величина, обратная частоте Найквиста в фокальной плоскости системы:

$$R_m^l = \frac{1}{N_h} \approx 2\Delta. \quad (14)$$

Максимальная величина разрешения на местности в этом случае будет равна

$$R_{m\min} = R_m^l m = 2\Delta \cdot m, \quad (15)$$

где m — масштаб съемки.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОНЯТИЯ «РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ» ПРИМЕНЕНИЕ К СИСТЕМАМ С ДИСКРЕТНЫМИ ФОТОПРИЕМНИКАМИ

Для расчета влияния на разрешающую способность дискретных фотоприемников основных факторов, приводящих к увеличению размера пикселя, воспользуемся методикой, аналогичной рассмотренной методике для аэрофотосистем. Это методика синтеза результирующих характеристик с использованием ФПМ. Перепишем выражение для результирующей ФПМ (2), соответствующей блок-схеме на рис. 1:

$$T_\Sigma(N) = k \cdot k_{at} \cdot T_{typ}(N) \cdot T_{cd}(N) \times \\ \times T_{ab}(N) \cdot T_{dif}(N) \cdot T_{def}(N) \cdot T_{fp}(N). \quad (16)$$

Рассмотрим особенности некоторых выражений для ФПМ аэрокосмических систем с дискретными фотоприемниками.

Точные расчеты ФПМ отдельных звеньев аэрокосмических систем ДЗЗ (особенно атмосферы, дефокусировки и др.) являются достаточно сложной вычислительной задачей, требующей использования специальных программ. Поэтому нами будут использованы для приближенных расчетов упрощенные формулы или приближенные численные оценки минимально возможного влияния этих звеньев.

ФПМ, учитывающая влияние турбулентности атмосферы, определяется по приближенной формуле [12]

$$T_{at}^l \approx \exp(-2\pi^2 \sigma_T^2 f^2 N^2), \quad (17)$$

где f , мм; σ_T — константа, характеризующая влия-

ние турбулентности атмосферы (для хороших условий наблюдения σ_T имеет порядок 10^{-6}).

Следует отметить, что ФПМ — $T_{at}^l(N)$ учитывает только влияние турбулентности атмосферы, но не учитывает влияние светорассеяния, вызываемого атмосферной дымкой (светорассеяние учитывается коэффициентом k_{at}).

ФПМ сдвига изображения в фокальной плоскости:

$$T_{cd}(N) = \frac{\sin(\pi \Delta_{cd} N)}{\pi \Delta_{cd} N}, \quad (18)$$

где Δ_{cd} — остаточный сдвиг изображения в фокальной плоскости при работе системы компенсации сдвигов.

В хороших системах компенсации сдвига изображения относительная величина Δ_{cd} имеет порядок 10...20 % от величины размера пикселя фотоприемника Δ .

Для определения ФПМ, которая учитывает влияние остаточной дефокусировки оптической системы, воспользуемся приближенной формулой

$$T_{def}(N) \approx \exp\left[-2.5 A_{def}^2 \left(\frac{f}{D}\right)^{-2} N^2\right], \quad (19)$$

где A_{def} , мм — величина смещения фокальной плоскости за счет остаточной дефокусировки; f/D — знаменатель относительного отверстия объектива оптической системы; f — фокусное расстояние объектива, мм; D — диаметр входного зрачка объектива, мм.

ФПМ в фокальной плоскости, обусловленная дифракцией на входном зрачке оптической системы в фокальной плоскости, определяется по приближенной формуле для средней длины волны видимого диапазона:

$$T_{dif}(N) \approx 1 - 7.510^{-4} \frac{f}{D} N. \quad (20)$$

Выражение (18) не учитывает влияния центрального отверстия зеркала оптической системы на ФПМ.

ФПМ одного элемента дискретного фотоприемника:

$$T_{fp}(N) = \frac{\sin(\pi \Delta N)}{\pi \Delta N}, \quad (21)$$

где Δ , мм — линейный размер пикселя (одного элемента) дискретного фотоприемника в фокальной плоскости.

Ранее при рассмотрении понятия «разрешающая способность» подробно рассматривался вопрос условности однозначного представления изобразительных свойств дискретных фотоприемников, которые зависят от взаимного положения элементов дискретного фотоприемника и проекции деталей объектов в фокальную плоскость. Было показано (12), что с высокой вероятностью о стабильности

изобразительных свойств этих фотоприемников можно говорить только при ограничении полосы пропускания системы частотой Найквиста. Учитывая сказанное выше ($N = N_h$), выражение для ФПМ дискретного фотоприемника (21) принимает вид

$$T_{\text{ФП}}(N) = \frac{\sin(\pi 2\Delta N)}{\pi 2\Delta N}, \quad (22)$$

Перепишем выражение (16) для результирующей ФПМ аэрокосмической системы с дискретными фотоприемниками в сокращенном виде:

$$T_{\Sigma}(N) = T_{\text{диф}}(N)T_{\text{ФП}}(N). \quad (23)$$

В выражении (23) не учитывается влияние таких факторов, как турбулентность атмосферы — $T_{\text{тур}}(N)$, остаточные сдвиги изображения — $T_{\text{сд}}(N)$, aberrации оптической системы — $T_{\text{аб}}(N)$. Уравнение для определения разрешающей способности дискретной системы в полете по аналогии с выражением (4) перепишем в виде:

$$kT_{\Sigma}(R_k^1) = k_{\text{нор}}(R_k^1). \quad (24)$$

В уравнении (24), по сравнению с уравнением (4), принято, что $k_{\text{ат}} = 1$ (не учитывается влияние атмосферы).

Для расчета кривой пороговой модуляции $k_{\text{нор}}(N)$ (см. выражение (3)) необходимо знать суммарное среднеквадратичное значение шумов канала прохождения дискретной информации, выраженное в величинах оптической плотности. Эти сведения для сенсоров космических систем отсутствуют. Исключение составляет сенсор высокого разрешения системы IRS, для которого в [14] приводятся данные по отношению сигнал/шум в панхроматическом режиме в терминах оптической плотности (этота величина равна 64). Сравнивая это отношение с отношениями сигнал/шум аэрофотоматериалов, можно заключить, что эквивалентное значение шумов сенсора спутника IRS-1C в значениях оптической плотности имеет порядок $\sigma_D^1 \approx 0.03...0.05$.

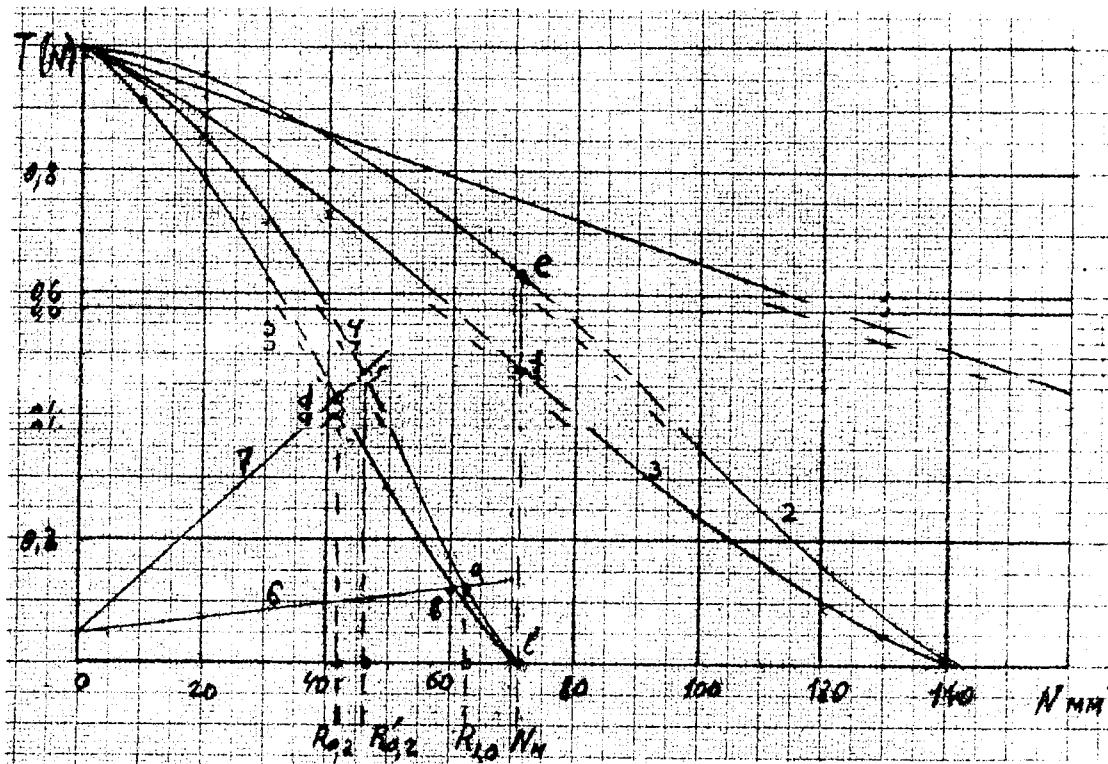


Рис. 4. Определение разрешающей способности дискретных систем графическим методом (на примере спутника IRS-1C). Графики: 1 — ФПМ оптической системы только с учетом дифракции ($D/f = 1:4.5$ см (18)); 2 — ФПМ одиночного пикселя ($\Delta = 0.007$ мм, см. (19)); 3 — ФПМ одиночного пикселя с учетом влияния оптики (произведение 1 и 2); 4 — ФПМ пикселя размером $2\Delta = 0.014$ мм (условие Найквиста см. (20)); 5 — ФПМ пикселя размером 2Δ с учетом влияния оптики (произведение 1 и 4); 6 — кривая пороговой модуляции ($k = 1.0$, $\sigma_D = 0.04$, см. (3)); 6 — кривая пороговой модуляции ($k = 0.2$, $\sigma_D = 0.04$, см. (3)). Точки на пересечении кривых: а — разрешающая способность $R_{1.0} = 63 \text{ mm}^{-1}$ без учета влияния оптики; б — разрешающая способность $R_{1.0} = 61 \text{ mm}^{-1}$ с учетом влияния оптики; в — разрешающая способность $R_{0.02} = 46 \text{ mm}^{-1}$ без учета влияния оптики; г — разрешающая способность $R_{0.2} = 42 \text{ mm}^{-1}$ с учетом влияния оптики; д — значение ФПМ одиночного пикселя на частоте Найквиста без учета влияния оптики равное 0.64; е — значение ФПМ одиночного пикселя на частоте Найквиста с учетом влияния оптики равное 0.47; ж — частота Найквиста

Примем среднее значение $\sigma_D^1 \approx 0.04$. Шумы сенсоров других систем по сравнению с системой IRS-1C по данным фирменных каталогов имеют меньшую величину.

На рис. 4 приведен расчет разрешающей способности сенсора высокого разрешения индийского спутника IRS-1C в панхроматическом режиме. Исходные данные расчета [14]: высота полета $H = 817$ км, фокусное расстояние оптической системы $f = 980$ мм, относительное отверстие оптической системы $D/f = 1:4.5$, линейный размер пикселя фотоприемника $\Delta = 0.007$ мм. Для этого фотоприемника фирма дает разрешающую способность в фокальной плоскости 70 mm^{-1} [14], что соответствует частоте Найквиста. Знаменатель масштаба съемки $m = H/f = 83300$. Как было указано ранее, произведение размера пикселя на масштаб съемки дает размер на земной поверхности геометрической проекции пикселя $\Delta \cdot m = 0.007 \text{ mm} \cdot 834000 = 5800 \text{ mm} = 5.8 \text{ м}$ (здесь используется термин Instantaneous Geometric Field of View [14]).

Рассмотрим результаты графических расчетов разрешающей способности, приведенных на рис. 4.

Разрешающие способности по контрасту $k = 1.0 - R_{1.0}$ с учетом и без учета влияния оптической системы (точки *b* и *a*) близки к 61 и 63 mm^{-1} и составляют примерно 0.9 от частоты Найквиста, равной 71 mm^{-1} (точка *l*), т. е.:

$$R_{1.0} \approx 0.9N_h. \quad (25)$$

Разрешающие способности $R_{0.2}$ по контрасту $k = 0.2$ с учетом и без учета влияния оптической системы (точки *d* и *c*) различаются более существенно и соответственно равны 42 и 46 mm^{-1} .

Значение ФПМ одиночного пикселя на частоте Найквиста, равной 71 mm^{-1} с учетом и без учета влияния оптической системы (точки *f* и *e*) соответственно равны 0.47 и 0.64 . Падение значения ФПМ на частоте Найквиста с 0.64 до 0.47 соответствует увеличению размера пикселя с 0.007 мм до 0.0088 мм, т. е. в 1.26 раза (см. выражение (21)). Таким образом, если учсть ранее приведенные данные по сенсору спутника «Ikonos», где это увеличение составляло 1.25 раза, можно принять коэффициент увеличения размера пикселя за счет влияния только дифракционных искажений оптической системы сенсора равным 1.25 .

Данный пример и проведенные нами дополнительные исследования позволили получить приближенное выражение для определения зависимости разрешающей способности дискретных систем, ФПМ которых изменяется по закону, близкому к закону $(\sin x)/x$, от контраста объектов k , в виде

$$R_k = R_{1.0} \sqrt[4]{k}. \quad (26)$$

Это выражение отличается от подобного выраже-

ния аналоговых аэрофотосистем [6]

$$R_k = R_{1.0} k^{0.36}. \quad (27)$$

Таким образом, проведенные исследования и расчеты позволяют предложить для дальнейшего использования следующие приближенные соотношения:

$$N_h = \frac{1}{2 \cdot \Delta}, \quad (28)$$

$$R_k \approx R_{1.0} \sqrt[4]{k} \approx 0.9 N_h \sqrt[4]{k}. \quad (29)$$

Выражение (29) получено с учетом выражения (25) и (26).

6. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗРЕШЕНИЯ НА МЕСТНОСТИ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ДИСКРЕТНЫМИ ФОТОПРИЕМНИКАМИ

Есть два подхода к определению разрешения на местности R_m аэрокосмических систем с дискретными фотоприемниками.

Один подход — достаточно распространенный — излагается в известном учебнике В. И. Кравцовой [5]. Этот подход основан на использовании эмпирической формулы

$$R_m = e\sqrt{2}, \quad (30)$$

где e , м — реальный размер пикселя в плоскости объектов съемки. В выражении (30) в расчет принимается размер диагонали пикселя. Проблема в этом случае заключается в определении реального размера пикселя e , который бы учитывал увеличение размера пикселя за счет влияния факторов, представленных на блок-схеме (рис. 1).

Как было показано выше, влияние дифракционных искажений оптической системы (без учета влияния экранировки центральной части зеркала) увеличивает размер пикселя в 1.25 раза.

При самой оптимистической оценке, влияние всех остальных факторов добавочно увеличивает размер пикселя только в 1.1 раза, поэтому приближенное выражение для реального размера пикселя в плоскости земной поверхности e можно записать в виде

$$e = 1.1 \cdot 1.25 \cdot \Delta \cdot m = 1.375 \cdot \Delta \cdot m, \quad (31)$$

где Δ , м — размер пикселя фотоприемника в фокальной плоскости; m — знаменатель масштаба съемки.

Подставляя выражение (31) в (30) и учитывая (9), получим

$$R_m = 1.94 \cdot \Delta \cdot m \approx 2 \cdot \Delta \cdot m \approx \frac{2\Delta H}{f}. \quad (32)$$

Это выражение аналогично выражению (15), т. е. в этом случае разрешение R_m обратно частоте

Найквиста, пересчитанной в плоскость объектов, что является самой жесткой оценкой.

Следует отметить, что использование в работе [5] термина «пиксель» для обозначения реальных размеров проекции элементарного фотоприемника на земную поверхность не совсем корректно. В действительности количество пикселов в системе и угловые размеры каждого из них всегда одни и те же. Увеличение размеров проекции каждого фотоприемника на земную поверхность, обусловленное воздействием оптической системы, сдвигов и других факторов, приводит только к взаимному перекрытию соседних проекций, что приводит к уменьшению контраста изображений мелких деталей. В результате уменьшается разрешающая способность по малому контрасту и соответственно увеличиваются размеры предельно обнаруживаемых мелких объектов, т. е. ухудшается разрешение на местности.

Выражение (32) справедливо только для компактных объектов высокого контраста и не позволяет оценить влияние контраста объекта на величину R_m , а также производить вероятностные оценки полученных результатов.

Второй подход основан на использовании понятия «разрешающая способность» применительно к системам с дискретными фотоприемниками, которое рассмотрено в разд. 5, и вероятностных оценок, рассмотренных в разд. 3.

В этом случае разрешение на местности R_m определяется как величина, обратная значению разрешающей способности, приведенному в плоскость объектов съемки:

$$R_m = \frac{1}{R_k} m = \frac{H}{fR_k}, \quad (33)$$

где R_k , мм^{-1} — разрешающая способность системы в фокальной плоскости по контрасту k ; H — высота полета, м; f — фокусное расстояние оптической системы, мм.

Разрешающая способность определяется с использованием выражений (25), (28), (29).

Для учета вероятностных оценок процесса обнаружения и распознавания образов воспользуемся выражением (9) из разд. 3.

Учитывая, что в нашем случае обнаружения малых компактных объектов линейный размер объекта L тождественен нашему пониманию разрешения на местности R_m , перепишем выражение (7) в виде

$$R_m = \frac{mB}{2R_k \sqrt{(-\ln p)}}. \quad (34)$$

Для случая обнаружения малых объектов круглой или квадратной формы, когда не ставится задача распознавания формы этих объектов, коэффициент формы $B \approx 1$ (см. выражение (12)).

Подставляя в (34) значение R_k из (29) и коэффициента $B = 1$, получим

$$R_m = \frac{0.55m}{N_h \sqrt{(-\ln p)} k^{0.5}}. \quad (35)$$

Используя (11) и (13), получим окончательное общее выражение для определения величины разрешения на местности:

$$R_m = \frac{1.1\Delta H}{f \sqrt{(-\ln p)} k^{0.5}}, \quad (36)$$

где Δ , мм; f , мм; H , м.

Если принять значение вероятности $p \approx 0.7$ и высокий контраст объекта $k \approx 0.7$, получим простое выражение, удобное для практического использования при оперативных оценках:

$$R_m \approx \frac{2\Delta H}{f}, \quad (37)$$

где размерность величин аналогична (36).

Выражение (37) практически эквивалентно использованию критерия Найквиста, значение которого пересчитывается в плоскость объектов. Подобные результаты были получены в разд. 4 и 5 (см. (15), (28) и (29)). Выражение (37) отличается от выражений (15), (28) и (29) тем, что при его получении удалось приблизенно оценить вероятность полученных результатов. Близкое совпадение результатов, полученных различными методами, свидетельствует об устойчивости и достаточной надежности выражения (32) и общего выражения (35), из которого, как частный случай, получено выражение (37).

Выражение (37) соответствует оценке, учитывающей только значение частоты Найквиста (14), что является предельной оценкой, которая дает минимально возможные размеры разрешаемой детали на местности.

Оценивая величины вероятностных оценок в выражениях (35)–(37), следует иметь в виду, что они получены по методике, аналогичной методике вероятностных оценок аналоговых систем, которые учитывают статистики дешифрирования аналоговых изображений. Экспериментальные материалы по статистическим оценкам дешифровочных свойств дискретных изображений в известной нам литературе практически отсутствуют. При появлении таких материалов численные коэффициенты в выражениях (35)–(37) и соответствующие значения получаемых вероятностей могут быть уточнены. Однако определение выражения (37), как наиболее жесткой (предельной) оценки, при любых вариантах остается справедливым.

Следует отметить, что все предлагаемые в данной методике окончательные выражения дают в некоторой степени оптимистические (занятые) оценки.

оценки величины разрешающей способности и разрешения на местности аэрокосмических систем ДЗЗ с дискретными фотоприемниками, т.к. при их получении в минимальной степени учтено влияние на качество изображения факторов реальной съемки, отраженных в блок-схеме на рис. 1. Полный и более точный учет этих факторов, особенно шумов сенсоров, потребует создания сложных алгоритмов и соответствующего программного обеспечения [10], а также значительных объемов исходных данных, которые в настоящее время в фирменных каталогах отсутствуют.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования и анализ полученных результатов позволяют рекомендовать для приближенной оценки разрешения на местности (R_m) аэрокосмических систем с дискретными фотоприемниками выражение (36). При проведении оперативных оценок можно использовать выражение (37), полученное из (36) при $p = 0.7$ и $k = 0.7$ (высокий контраст объектов). Выражение (37) более информативно, чем непосредственная оценка по критерию Найквиста, так как оно получено при известных значениях контраста объекта и вероятности его обнаружения. Для определения величины разрешения на местности для других значений контраста и вероятности обнаружения необходимо воспользоваться выражением (36).

Выражения (36) и (37) являются приближенными предельными оценками разрешения на местности, так как при их получении не полностью учитывались основные факторы, ухудшающие качество изображений в процессе реальной съемки. Более полный учет влияния этих факторов, особенно влияния атмосферы и шумов оптико-электронных каналов сенсоров, может привести к ухудшению определяемого разрешения на местности и уменьшению соответствующих значений вероятностей обнаружения.

В табл. 2 приводятся оценки величин разрешения на местности для панхроматических каналов сенсоров высокого разрешения спутников IRS-1C, «Ikonos» и «Spot-4», полученные с использованием

Таблица 2. Оценки величин разрешения на местности монохроматических сенсоров высокого разрешения спутников IRS-1C, «Ikonos» и «Spot-4»

Спутник	$H, м$	$f, м$	$\Delta, мм$	$R_m, м$
IRS-1C	817000	0.98	0.007	11.6
«Ikonos»	681000	10.0	0.012	1.6
«Spot-4»	833000	1.082	0.012	20

выражения (37) (исходные данные: вероятность обнаружения $p \approx 0.7$, высокий контраст объектов $k \approx 0.7$).

1. Аэрофотоаппаратура и аэрофотографирование (Термины и определения). ГОСТ-23935-79. — М.: Изд-во стандартов, 1980.—14 с.
2. Живичин А. И., Соколов В. С. Дешифрирование фотографических изображений. — М.: Недра, 1980.—254 с.
3. Кононов В. И. Історія становлення методів оцінки іконічних систем дистанційного зондування стосовно критерію «роз'дільна здатність» // Cadastre photogrammetry. geoinformatics — modern technologies and development perspectives. — Lviv: National University «Lvivska Polytechnika», October 17-19, 2000, P. 155—159.
4. Кононов В. И., Федоровский А. Д., Дубинский Г. П. Оптические системы построения изображений. — К.: Техника, 1981.—235 с.
5. Кравцова В. И. Космические методы картографирования. — М.: Изд-во Московского университета, 1995.—240 с.
6. Мельканович А. Ф. Фотографические средства и их эксплуатация. — М.: Изд-во Мин. Обороны СССР, 1984.—576 с.
7. Проектирование оптических систем. Под ред. Р. Шеннаона и Д. Ж. Вайанта. — М.: Мир, 1983.—432 с.
8. Руководство по аэросъемочным работам. Министерство гражданской авиации СССР. — М.: Воздушный транспорт, 1988.—334 с.
9. Савиных В. П., Кучко А. С., Стеценко А. Ф. Аэрокосмическая фотосъемка. — М.: Гартгеоцентр-Геодезиздат, 1997.—389 с.
10. Сивяков И. Н. Расчет разрешения оптико-электронных систем // Оптический журнал.—1998.—65, № 2.—Р. 60—63.
11. Фельдбаум А. А. и др. Теоретические основы связи и управления. — М.: Изд-во Физ.-мат. литературы, 1963.—932 с.
12. Фризер Х. Фотографическая регистрация информации. — М.: Мир, 1978.—670 с.
13. Янке Е. Я. и др. Специальные функции. — М.: Наука, 1968.—344 с.
14. Cameras for Indian remote sensing satellite IRS-1C // Current Science.—1996.—70, N 7.