

УДК 004.932

*В.К. Злобин, А.М. Кочергин*

## **АЛГОРИТМЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ КАТАЛОГИЗАЦИИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

*Представлены алгоритмы и технологии предварительной обработки изображений в системах каталогизации данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Они позволяют в темпе приема данных от современных систем ДЗЗ решить задачи адресного размещения космической видеоинформации в архивах, оценить и при необходимости улучшить ее качество.*

**Введение.** Создание и использование систем дистанционного зондирования Земли были и остаются наиболее приоритетным направлением космической деятельности Российской Федерации и других стран мира. Эффективность использования данных ДЗЗ в гидрометеорологии, картографии, геологии, сельском и лесном хозяйствах, экологии, военной разведке и многих других областях человеческой деятельности во многом определяется тем, насколько удачно обеспечен доступ потребителей к архивам космических изображений. Эта проблема решается с помощью электронных каталогов. В настоящее время во многих странах мира, владеющих технологиями ДЗЗ, функционируют десятки и сотни территориально рассредоточенных архивов и каталогов космической видеоинформации.

Наиболее узким местом существующих систем электронной каталогизации данных ДЗЗ является отсутствие в их составе технологий оперативной геодезической привязки спутниковых изображений, что приводит к безадресному размещению видеоинформации в архивы, а это затрудняет пользователям процесс поиска необходимых данных. Другим узким местом является отсутствие оперативных технологий оценки и улучшения качества данных ДЗЗ в процессе их каталогизации. В результате в архивы часто помещаются изображения, содержащие импульсные и полосовые помехи, в значительной степени покрытые облаками, имеющие низкий контраст и не находящиеся в дальнейшем спроса у потребителей. Все это требует разработки соответствующих алгоритмов и технологий обработки данных ДЗЗ перед их каталогизацией.

**Содержание задачи электронной каталогизации данных ДЗЗ.** Анализ отечественных и зарубежных систем каталогизации данных ДЗЗ

дает основание разделить любую систему на две базовые подсистемы, которые осуществляют соответственно предварительную обработку и заполнение базы данных (БД) с обеспечением удаленного доступа к каталогу.

Типовыми функциями подсистемы предварительной обработки являются:

- декоммутация исходного файл-потока;
- входной контроль качества поступающих данных;
- пространственно-временная привязка данных ДЗЗ, т.е. уточнение геодезических координат объектов наблюдаемой сцены;
- повышение радиометрического качества изображений (коррекция импульсных помех и сбойных строк, оптимальное контрастирование изображений);
- подготовка метаданных и обзорных изображений для архивируемой видеоинформации.

Подсистема заполнения БД и организации удаленного доступа к каталогу обеспечивает:

- начальное заполнение и постоянное сопровождение справочной информации, необходимой для полноценного описания хранимых данных;
- занесение обзорных изображений и метаданных в электронный каталог;
- поиск данных и обработка заказов пользователей;
- доступ к каталогу авторизованных пользователей через локальную сеть с рабочего места оператора и территориально удаленных пользователей через глобальную сеть (например, Internet);
- долговременное хранение закаталогизированных данных, восстановление структуры и содержания каталога при их повреждении;

– автоматический обмен каталожными данными между пунктами приема и обработки информации с помощью службы обмена данными.

Ниже рассматриваются алгоритмы решения этих задач.

**Фильтрация импульсных помех.** Обычно помехи на цифровом изображении имеют зональное расположение. Это связано с несовершенством механизмов слежения приемной антенны за спутником. Наиболее сильно помехи проявляются в начале и конце сеанса приема. Если полоса помех попадает в зону интереса потребителя, то это делает изображение непригодным к использованию.

Классические алгоритмы фильтрации импульсных помех [1,2], основанные на частотной, рекурсивной и медианной фильтрации, оказываются мало эффективными в силу побочных эффектов, связанных со сглаживанием незашумленных участков изображений, удалением мелких объектов, изменением статистических свойств изображения и т. п. Попытки использовать фильтры, учитывающие текстуру изображения, приводят к исключительно большим вычислительным затратам, что делает их непригодными для обработки изображений большой информационной емкости (более 1 Гб).

Рассмотрим алгоритм, который обладает более высоким быстродействием при минимальном уровне ложной идентификации помех. Это достигается благодаря многоэтапному анализу изображения и учету сюжета при принятии решения о наличии импульсной помехи.

Обработка реализуется в три этапа. На первом этапе выполняется быстрая операция сравнения яркости текущего пикселя  $b(m,n)$  с яркостями двух соседних элементов, расположенных сверху и слева:

$$\begin{aligned} |b(m,n) - b(m-1,n)| &\geq \delta, \\ |b(m,n) - b(m,n-1)| &\geq \delta, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\delta$  - значение порога. Если оба условия не выполняются, то анализируется следующий элемент изображения, в противном случае осуществляется переход ко второму этапу, на котором проверяются условия:

$$\begin{aligned} |b(m,n) - b(m+1,n)| &\geq \delta, \\ |b(m,n) - b(m,n+1)| &\geq \delta, \\ |b(m,n) - b(m+1,n+1)| &\geq \delta. \end{aligned} \quad (2)$$

Если все три условия (2) не выполняются, то пиксель  $b(m,n)$  не признается помехой, иначе осуществляется переход к третьему этапу.

Третий этап связан с углубленным анализом элемента  $b(m,n)$ , поскольку выявленный пере-

пад яркости может быть вызван резким изменением сюжетной составляющей, например береговой линией, автомобильной дорогой и т.п. При этом пиксель  $b(m,n)$  проверяется на предмет его принадлежности протяженному контуру:

$$\begin{aligned} |b(m,n) - b(m+v, n+k)| &< \delta, \\ k \in \{-2, -1, 0, 1, 2\}, \quad v \in \{-2, -1, 0, 1, 2\}. \end{aligned}$$

При невыполнении этого условия при всех значениях  $k, v$  пиксель  $b(m,n)$  признается помехой и его значение устанавливается равным

$$b^*(m,n) = \text{med}\{b(m-1, n-1), b(m, n-1), b(m+1, n-1), b(m-1, n), b(m-1, n+1)\}. \quad (3)$$

Для определения величины порога  $\delta$  формируется гистограмма распределения модулей разности двух соседних (по вертикали и горизонтали) пикселей:

$$h(j) := h(j) + 1, \quad (4)$$

если  $j = |b(m,n) - b(m, n-1)|$  или  $j = |b(m,n) - b(m-1, n)|$ ,  
 $m = \overline{1, M_b - 1}, \quad n = \overline{1, N_b - 1}$ .

Полученная таким образом гистограмма имеет два характерных участка. Первый, быстро спадающий, участок соответствует сюжетным изменениям видеосигнала; второй участок, где значения гистограммы изменяются значительно медленнее - резким перепадам, вызванным помехами (рисунок 1).

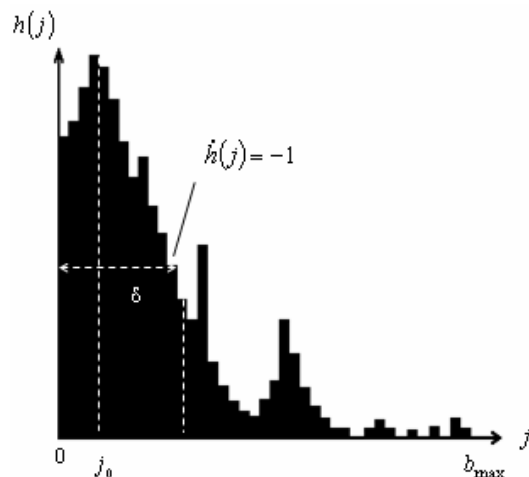


Рисунок 1 – Гистограмма модулей яркостей

С учетом этого порог  $\delta$  определяется точкой перехода от первого ко второму участку гистограммы.

Наличие случайных выбросов в гистограмме не позволяет при вычислении производной воспользоваться методом конечных разностей, т. е. необходима процедура сглаживания гистограммы. Для этого можно было бы, например, по методу наименьших квадратов выполнить аппроксимацию функции  $h(j)$ , а затем использовать

полученный полином. Однако подбор в каждом случае адекватного полинома вызывает определенные технические трудности. Поэтому сглаживание гистограммы  $h(j)$  проводится с помощью МНК-фильтра, на выходе которого сразу получается искомое значение первой производной  $\dot{h}(j)$  [3, 4].

Для этого формируется скользящее «окно», включающее  $\ell$  отсчетов гистограммы. Чтобы исключить ситуации, связанные с пропуском или ложным обнаружением искомой точки перегиба, «окно» перемещается от точки  $j_0 = \arg \max h(j)$  в сторону увеличения индекса  $j$ . При этом первый сглаженный отсчет определяется в точке  $j_0$ , второй – в точке  $(j_0 + 1)$  и т.д. Для реализации этого подхода выполним переиндексацию исходной гистограммы  $h_0(i) = h(j)$ ,  $i = \overline{b_{\max} - j, j_0, b_{\max}}$ , и сформируем для  $i = \overline{(b_{\max} - j_0), 0}$  вектора отсчетов  $\mathbf{h}_0(i) = [h_0(i - \ell), h_0(i - \ell - 1), h_0(i)]^T$ . Тогда вектор значений сглаженной функции, первой и второй производных  $\hat{\mathbf{h}}_0(i) = [\hat{h}_0(i), \dot{h}_0(i), \ddot{h}_0(i)]^T$  определится как

$$\hat{\mathbf{h}}_0(i) = \mathbf{C} \mathbf{h}_0(i), \quad \mathbf{C} = (\mathbf{H}_\ell^T \mathbf{H}_\ell)^{-1} \mathbf{H}_\ell^T, \quad (5)$$

где  $\mathbf{H}_\ell = [\mathbf{H}_{\ell-1}, \mathbf{H}_{\ell-2}, \dots, \mathbf{H}_0]^T$ . Произвольный  $v$ -й элемент вектора  $\mathbf{H}_\ell$  есть вектор-строка

$$\mathbf{H}_v = [1 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} 1 & -v & v^2/2 \\ 0 & 1 & -v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad v = \overline{0, \ell-1}.$$

Скольжение «окна» прекращается, как только  $\dot{h}_0(i) \geq 1$ , после чего определяется порог  $\delta$ , соответствующий значению  $j$ .

Рассмотренный алгоритм прост в реализации и обладает высоким быстродействием, поскольку анализ подавляющего большинства пикселей на предмет их принадлежности импульсной помехе завершается на первом этапе. Более сложный третий этап, связанный с анализом пикселя на предмет его принадлежности контуру изображения, выполняется очень редко, но обеспечивает сохранение детальности изображения.

**Коррекция сбойных и пропущенных строк.** В процессе передачи видеоданных по радиоканалу возможна частичная потеря информации, которая проявляется либо в пропуске одной или нескольких строк, либо в искажении всех их элементов. Идентификация пропущенных строк осуществляется на этапе декоммута-

ции и пространственно-временного восстановления информации. Вместо отсутствующих видеоданных вставляются так называемые «пустые» строки, содержащие постоянный код яркости.

Алгоритм идентификации сбойных строк основывается на том, что видеоданные соседних неискаженных строк сильно коррелированы в отличие от сбойных. Среднеквадратические отклонения (СКО) яркостей для близлежащих не сбойных строк мало отличаются, а для сбойных строк отличаются существенно. Надежную идентификацию сбойных строк дает алгоритм, реализуемый с помощью следующей последовательности операций. В пределах «скользящей» по изображению в кадровом направлении апертуры, состоящей из  $\mu$  строк, вычисляются:

– среднеквадратическое отклонение кодов яркости каждой строки

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{1}{M_b - 1} \sum_{m=0}^{M_b-1} [b(m, n) - \bar{b}_n]^2}, \quad (6)$$

$$n = \overline{0, N_b - 1},$$

где  $\bar{b}_n$  – средняя яркость  $n$ -й строки;

– усредненное в пределах апертуры значение СКО

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\mu} \sum_{i=n-0.5(\mu-1)}^{n+0.5(\mu-1)} \sigma_i; \quad (7)$$

– среднее значение модуля разности СКО соседних строк

$$\bar{\sigma}_p = \frac{1}{\mu - 1} \sum_{i=n-0.5(\mu-1)}^{n+0.5(\mu-1)-1} |\sigma_i - \sigma_{i+1}|. \quad (8)$$

Строка, расположенная в центре апертуры, считается сбойной, если

$$|\bar{\sigma} - \sigma_n| > \gamma \bar{\sigma}_p, \quad (9)$$

где  $\gamma$  – настраиваемый параметр.

Для достоверной оценки  $\bar{\sigma}$  и  $\bar{\sigma}_p$  и исключения влияния изменяющейся вдоль кадра сюжетной составляющей  $\mu$  выбирается в пределах 50–70 строк. Экспериментальные исследования, проведенные на реальных данных, показали, что качественно восстанавливаются не более трех следующих друг за другом сбойных строк. На место сбойной строки помещаются видеоданные, полученные на основе яркостной интерполяции ближайших неискаженных строк:

$$b^*(m, n) = \text{ent} \left[ \frac{b(x, n-1) + b(y, n+1)}{2} + 0.5 \right], \quad (10)$$

где  $(x, y) = \arg \min_{x, y} |b(x, n-1) - b(y, n+1)|$ ,  
 $x = \overline{m-1, m+1}$ ,  $y = \overline{m+1, m-1}$ , т.е. выбор элементов для интерполяции осуществляется с учетом сохранения непрерывности сюжета. Восстановление элементов групп из двух или трех строк выполняется аналогичным образом с привлечением большего числа отсчетов  $(x, y) \in [m-2, m+2]$ .

**Выделение облачного покрова.** Одной из основных характеристик, определяющих ценность спутниковых снимков для потребителя, является то, насколько заснятая земная поверхность закрыта облачным покровом. Чем больше площадь облаков на изображении, тем меньше его ценность. Поэтому важно достоверно определить процент территории, занимаемой облаками, от общей площади снимка.

Алгоритм идентификации облачных образований основан на их восприятии человеческим зрением. Человек на цветном снимке видит облако как серый объект с несколькими градациями яркости. На этой основе разработан следующий алгоритм идентификации пикселей, принадлежащих облачному покрову.

Из многозонального изображения выбираются спектральные зоны, в наибольшей степени соответствующие стандартным цветовым RGB-компонентам; обозначим их как  $\lambda = R$ ,  $\lambda = G$  и  $\lambda = B$ . Для получения оттенков серого выполним «растяжение» яркостных диапазонов в каждой спектральной зоне,

$$\hat{b}_\lambda(m^*, n) = \frac{b_{\max}}{b_{\lambda, \max} - b_{\lambda, \min}} [b_\lambda(m^*, n) + b_{\lambda, \min}], \quad (11)$$

$$\lambda = R, G, B,$$

где  $\hat{b}_\lambda(m^*, n)$  – преобразованное значение яркости пикселя;  $b_{\lambda, \min} = \bar{b}_\lambda - 3\sigma_\lambda$ ,  $b_{\lambda, \max} = \bar{b}_\lambda + 3\sigma_\lambda$ ,  $\bar{b}_\lambda$ ,  $\sigma_\lambda$  – соответственно среднее значение и СКО яркости кадра;  $b_{\max}$  – максимальное значение яркостного диапазона.

После этого решение о принадлежности пикселя облачности принимается в случае выполнения условия:

$$(|\hat{b}_R(m^*, n) - \bar{b}(m^*, n)| \leq \Delta) \&$$

$$(|\hat{b}_G(m^*, n) - \bar{b}(m^*, n)| \leq \Delta) \&$$

$$(|\hat{b}_B(m^*, n) - \bar{b}(m^*, n)| \leq \Delta),$$

где  $\bar{b}(m^*, n) = \frac{1}{3} \sum_{\lambda=R, G, B} b_\lambda(m^*, n)$ ,  $\Delta$  – порог.

Значение  $\Delta$  выбирается с учетом физических возможностей человеческого зрения. В соответствии с соотношением Вебера-Фехнера мини-

мальное приращение интенсивности, замечаемое наблюдателем, соответствует не менее 2% от исходной. То есть пиксель, в котором яркость одного из каналов отличается более чем на 2% от средней, не будет восприниматься как серый. Для случая больших яркостей, к которым относятся облака, это значение соответствует  $\Delta = 0.02 b_{\max}$ .

**Объектно-зависимое контрастирование.** Этой операции при каталогизации данных ДЗЗ отводится исключительно важная роль, поскольку окончательное решение о пригодности интересующей информации потребитель принимает в ходе визуального анализа сжатых кадров. Следовательно, цель процедуры контрастирования состоит в том, чтобы, не искажая цветовых характеристик объектов, добиться максимальной яркости и насыщенности изображения.

Анализ и апробация известных алгоритмов контрастирования показали, что для решения поставленной задачи наиболее подходит линейный компонентно-независимый алгоритм яркостного преобразования, реализуемый в соответствии с формулой (11). Однако из-за изменений условий съемки найти общую передаточную характеристику для всего маршрута  $B_\lambda$  не удастся. Поэтому приходится контрастировать каждый кадр в отдельности. При таком подходе возникают следующие трудности:

- нарушается яркостная непрерывность маршрута при стыковке отконтрастированных кадров между собой;
- при наличии облачности средняя яркость кадра  $\bar{b}_\lambda$  смещается в сторону больших значений и результирующее изображение получается слабоконтрастным;
- контрастирование по формуле (11) объектов гидросети приводит к повышению уровня шумов на изображении, т.е. к снижению его качества.

Представленный ниже алгоритм лишен этих недостатков.

Для обеспечения яркостной непрерывности функция контрастирования  $k$ -го кадра рассчитывается по данным  $k$ -го и  $(k+1)$ -го кадров. Кроме того, вводятся ограничения на диапазоны яркостей контрастируемых объектов. Так, облачность представляется максимальным значением яркости, под сушу отводится 80% яркостного диапазона и ~20% – под объекты гидросети. Тогда результирующую функцию контрастирования  $k$ -го кадра  $f_{\lambda k}(b)$  можно представить в следующем виде:

$$f_{\lambda k}(b) = \begin{cases} a_{01} + a_{11}b_{\lambda k}(m^*, n), & b_{\lambda k}(m^*, n) \leq q_{\lambda k}(1); \\ a_{02} + a_{12}b_{\lambda k}(m^*, n), & b_{\lambda k}(m^*, n) \in [q_{\lambda k}(1), q_{\lambda k}(2)]; \\ b_{\max} & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (12)$$

где  $(a_{01}, a_{11}), (a_{02}, a_{12})$  – коэффициенты преобразования;  $q_{\lambda k}(i)$  – граничные значения яркостных диапазонов объектов гидросети ( $i=1$ ), суши ( $i=2$ ) и облачности (рисунок 2).

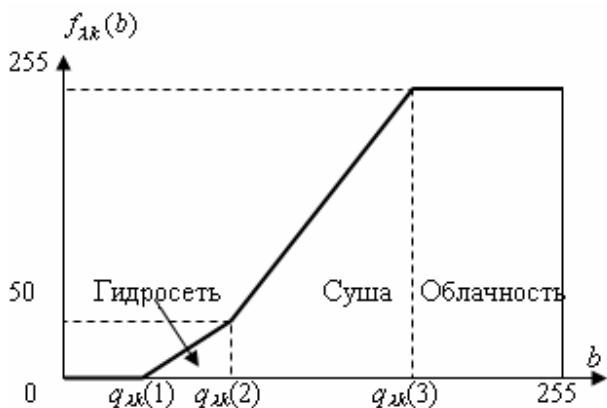


Рисунок 2 – Вид функции контрастирования  $f_{\lambda k}(b)$

Для расчета значений яркостных диапазонов  $q_{\lambda k}(i)$  вначале выполняется классификация пикселей по трем группам объектов. Процедура идентификации пикселей, соответствующих облачности, рассмотрена выше. Решение о принадлежности пикселей гидросети принимается на основании колориметрических характеристик водных объектов, воспринимаемых человеком в синем цвете, что соответствует условию

$$[\alpha b_{Rk}(m^*, n) \leq b_{Bk}(m^*, n)] \& [b_{Rk}(m^*, n) \leq b_{Gk}(m^*, n)] \& [b_{Gk}(m^*, n) \leq b_{Bk}(m^*, n)],$$

где  $\alpha$  – коэффициент, задающий преобладание синей компоненты над красной. Как показано в [1], синий цвет с различными градациями яркости воспринимается в случае, если значение синей составляющей превосходит не менее чем на 150% значение красной компоненты. Отсюда  $\alpha = 1.5$ .

Выполнив таким образом классификацию пикселей, нетрудно рассчитать яркостные диапазоны  $q_{\lambda k}(i)$  и затем коэффициенты преобразования:

$$q_{\lambda k}(1) = \bar{b}_{\lambda k}(1) + 3\sigma_{\lambda k}(1), \\ q_{\lambda k}(2) = \bar{b}_{\lambda k}(2) - 3\sigma_{\lambda k}(2), \quad \lambda = R, G, B, k = \overline{1, K},$$

где

$$\bar{b}_{\lambda k}(i) = \sum_{j=0}^{b_{\max}} \sum_{u=k}^{k+1} h_{\lambda u}(i, j),$$

$$\sigma_{\lambda k}^2(i) = \sum_{j=0}^{b_{\max}} \sum_{u=k}^{k+1} h_{\lambda u}(i, j) j^2 - \bar{b}_{\lambda k}^2(i);$$

$h_{\lambda k}(i, j)$  – гистограмма распределения яркостей пикселей  $i$ -го класса.

**Уточнение геодезической привязки изображений.** В ряде работ рассматриваются вопросы снижения ошибок определения пространственного положения отдельных кадров, основанные на восстановлении истинных параметров съемки. При этом используется достаточно большое число специально расположенных опорных точек местности (ОТМ), что не дает возможность использовать такую технологию в оперативном режиме каталогизации данных ДЗЗ. Ниже рассматривается технология, основанная на коррекции лишь отдельных параметров кеплеровской орбиты спутника, которые в значительной степени влияют на погрешность географической привязки изображений [4,5]. Для этого требуется небольшое число опорных точек местности (вплоть до одной), за счет чего достигаются высокая степень автоматизации и оперативность решения рассматриваемой задачи.

Вначале для оценки исходных погрешностей и устранения грубых ошибок географической привязки видеоданные отображаются в сжатом виде на фоне электронной карты. Рассмотрим исходное изображение, представленное матрицей отсчетов яркости  $B(m, n)$ ,  $m = \overline{1, M}$ ,  $n = \overline{1, N}$ . Будем считать, что функции расчета географических координат элемента изображения, составленные на основании уравнения движения спутника, представлены в следующем виде:

$$\varphi = f_{\varphi}[\mathbf{R}_c(t), \boldsymbol{\eta}(t_0), m, n], \\ \lambda = f_{\lambda}[\mathbf{R}_c(t), \boldsymbol{\eta}(t_0), m, n], \quad (13)$$

где  $\boldsymbol{\eta}(t_0)$  – вектор кеплеровских параметров орбиты.

Зададим географическими координатами  $(\varphi_{\min}, \lambda_{\min}), (\varphi_{\max}, \lambda_{\max})$  область определения синтезируемого изображения

$$D(x, y), \quad x = \overline{1, X}, \quad y = \overline{1, Y},$$

где  $X = (x_{\max} - x_{\min})/\mu$ ,  $Y = (y_{\max} - y_{\min})/\mu$ ,

$$x_{\min} = f_x(\varphi_{\min}), \quad y_{\min} = f_y(\lambda_{\min}),$$

$$x_{\max} = f_x(\varphi_{\max}), \quad y_{\max} = f_y(\lambda_{\max}), \quad \mu - \text{ масштаб}$$

отображения,  $f_x, f_y$  – функции картографического преобразования. Для проекции Меркатора

$$x = f_x(\varphi) = \frac{R \cos \varphi_c}{0,4343} \lg \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right), \quad (14)$$

$$y = f_y(\lambda) = R \cos \varphi_c \lambda,$$

где  $\varphi_c$  - широта стандартной параллели,  $\varphi_c = (\varphi_{\max} - \varphi_{\min})/2$ ;  $R$  - радиус земного эллипсоида на широте  $\varphi_c$ .

Сжатое изображение  $B^*$  формируется путем интегрального сжатия исходного снимка  $B$  с коэффициентом  $w$ :

$$B^*(m', n') = \frac{1}{w^2} \sum_{m=w(m'-1)+1}^{m'w} \sum_{n=w(n'-1)+1}^{n'w} B(m, n),$$

где  $m', n'$  - координаты элемента сжатого изображения. Величина коэффициента сжатия  $w > 1$  определяется из условия:  $MN/w^2 \leq V_{on}$ , где  $V_{on}$  - объем доступной оперативной памяти. Далее выполняется трансформирование сжатого изображения  $B^*$  в плоскость снимка  $D$ . При этом из-за масштабных изменений трансформирование по прямым зависимостям приводит к появлению на результирующем изображении «пустот», снижающих контраст и соответственно дешифрируемость изображения. Поэтому процесс геометрического преобразования изображения  $B^*$  выполняется на основании обратных зависимостей:

$$D(x, y) = \begin{cases} B^*(m', n'), & (wm' \in [1, M]) u (wn' \in [1, N]); \\ \text{иначе } b_{\max}, & \end{cases}$$

где  $m' = \text{ent} [F_m(x, y)/w]$ ,  $n' = \text{ent} [F_n(x, y)/w]$ ;  $F_m, F_n$  - функции, устанавливающие связь систем координат изображений  $B$  и  $D$  на основе выражений (13), (14).

Поскольку соотношения (13), (14), как правило, не допускают аналитического обращения, то в расчетах используются их полиномиальные аппроксимации. Для получения высокоточных полиномиальных приближений искомым функций  $F_m, F_n$  разработана трехэтапная процедура, основанная на использовании промежуточной проекции, обладающей минимальными искажениями относительно системы координат исходного снимка. На первом этапе рассчитываются географические координаты элемента  $(x, y)$  на основе аналитических зависимостей, полученных путем обращения выражений (14):

$$\varphi = f_x^{-1}(\mu x + x_{\min}), \quad \lambda = f_y^{-1}(\mu y + y_{\min}). \quad (15)$$

На втором этапе выполняется пересчет координат  $(\varphi, \lambda)$  в косую равнопромежуточную цилиндрическую проекцию (КРЦП). Для этого осуществляется переход от геодезической  $(\varphi, \lambda)$  к геоцентрической  $(\varphi', \lambda')$  системе координат:

$$\varphi' = \arcsin \left( \sin \varphi \sqrt{1 - e^2} / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi} \right), \quad (16)$$

$$\lambda' = \lambda,$$

где  $e$  - эксцентриситет земного эллипсоида. Далее определяются значения широты  $\varphi_0$  и долготы  $\lambda_0$  полюса косой сферической системы координат:

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{2} - i, \quad \lambda_0 = L - \frac{\pi}{2}, \quad (17)$$

где  $L = \gamma - w_3 \frac{M}{2} t_c$ ,  $\gamma$  - долгота восходящего узла по отношению к гринвичскому меридиану на момент формирования первой строки сюжета  $t_0$ ,  $w_3$  - скорость вращения Земли,  $t_c$  - период сканирования,  $i$  - угол наклона орбиты. Далее выполняется переход от прямых  $(\varphi', \lambda')$  к косым  $(\varphi'', \lambda'')$  сферическим координатам:

$$\varphi'' = \arcsin [\sin \varphi' \sin \varphi_0 + \cos \varphi' \cos \varphi_0 \cos(\lambda_0 - \lambda')],$$

$$\lambda'' = \arctg \left[ \frac{\cos \varphi' \sin(\lambda_0 - \lambda')}{\sin \varphi' \cos \varphi_0 - \cos \varphi' \sin \varphi_0 \cos(\lambda_0 - \lambda')} \right]. \quad (18)$$

После этого вычисляются координаты пикселя  $(u, v)$  в КРПЦ по формулам:

$$u = R_3 \lambda'', \quad v = R_3 \varphi'', \quad (19)$$

где  $R_3$  - радиус Земли на экваторе.

На третьем этапе выполняется пересчет значений  $u$  и  $v$  в систему координат изображения  $B$ :

$$m = \sum_{\rho=0}^P \sum_{v=0}^{\rho} a_{v, \rho-v} u^v v^{\rho-v},$$

$$n = \sum_{\rho=0}^P \sum_{v=0}^{\rho} c_{v, \rho-v} u^v v^{\rho-v}, \quad (20)$$

где  $(a_{\rho v}, c_{\rho v})$  - коэффициенты полинома, рассчитанные по методу наименьших квадратов.

Таким образом, формулы (15)-(20) определяют вид искомым функций  $F_m$  и  $F_n$ . Апробация данной технологии на протяженных маршрутах, полученных со спутника «Ресурс-О1», показала, что использование в формуле (20) полиномов 3-й и 5-й степеней соответственно обеспечивает погрешность в пересчете координат не более 0,5 пикселя.

Рассмотрим теперь процесс нанесения на изображение  $D$  векторной электронной карты. В качестве картографической основы используется гидрографический слой, который характеризуется высокой временной устойчивостью и хорошо различим на космических снимках. Электронная карта представляется множеством линейных объектов  $E = \{(\varphi_s^H, \lambda_s^H; \varphi_s^K, \lambda_s^K); s = \overline{1, S}\}$ , при-

надлежащих выбранному региону, где  $(\varphi_s^H, \lambda_s^H)$  и  $(\varphi_s^K, \lambda_s^K)$  - соответственно географические координаты начальных и конечных точек  $s$ -го объекта. Выполним пересчет элементов множества  $E$  в систему координат изображения  $D$ :  $E \rightarrow E_d = \{(x_s^H, y_s^H; x_s^K, y_s^K); s = \overline{1, S}\}$ , где  $x_s = (f_x(\varphi_s) - x_{\min})/\mu$ ,  $y_s = (f_y(\lambda_s) - y_{\min})/\mu$ , и осуществим их векторно-растровое отображение:  $D(x, y) = b_e$ , если  $(x, y) \in (x_s^H, y_s^H; x_s^K, y_s^K)$ ,  $s = \overline{1, S}$ , где  $b_e$  - код яркости объектов карты.

На полученном таким образом изображении  $D$ , содержащем сжатый космический снимок  $B^*$  и электронную карту  $E$ , определяются планарные координаты одноименных объектов снимка  $(x_j, y_j)$  и карты  $(x_j^*, y_j^*)$ ,  $j = \overline{1, J}$ , которые образуют множество опорных точек местности  $O$ .

Затем оператором определяются несколько ОТМ на изображении и карте. По рассогласованию их координат вычисляются поправки к орбитальному прогнозу  $\boldsymbol{\eta}(t_0)$ , снижающие начальные отклонения в положении снимка относительно карты. При коррекции параметров орбиты из всех кеплеровских компонентов вектора  $\boldsymbol{\eta}(t_0) = [\eta_k(t_0)]$ ,  $k = \overline{1, K}$ , выбираются лишь те, ошибки которых вносят наибольшую погрешность географической привязки, а именно: время прохождения перицентра  $\tau$ , долгота восходящего узла  $\Omega$  и наклонение орбиты  $i$ . Их коррекция осуществляется на основе координат ОТМ, представленных в КРПЦ, которая обладает минимальными искажениями по отношению к системе координат снимка. Эта особенность позволяет обеспечить работоспособность алгоритма при малом числе ОТМ.

На основе соотношений (15)-(20) элементы множества  $O$  пересчитываются в область определения исходного изображения и в систему координат КРПЦ. В результате формируются два множества  $O_B = \{m_j, n_j; m_j^*, n_j^*\}$ ,  $j = \overline{1, J}$ , и  $O_K = \{u_j, v_j; u_j^*, v_j^*\}$ ,  $j = \overline{1, J}$ . С учетом выражений (13) и (16)-(19) функциональная связь между компонентами этих множеств определяется как

$$\begin{aligned} u_j &= F_u(\boldsymbol{\eta}(t_0), m_j, n_j) = \Phi_u(f_\varphi, f_\lambda), \\ v_j &= F_v(\boldsymbol{\eta}(t_0), m_j, n_j) = \Phi_v(f_\varphi, f_\lambda), \end{aligned} \quad (21)$$

где  $\Phi_u, \Phi_v$  - функции координатных преобразований, определяемые формулами (16) - (19).

Обозначим элементы множества  $O_K$  в виде векторов  $\mathbf{r}_j = (u_j, v_j)$  и  $\mathbf{r}_j^* = (u_j^*, v_j^*)$ . Тогда в общем случае:

$$\Delta \mathbf{r}_j = \mathbf{r}_j^* - \mathbf{r}_j = \mathbf{F}[\boldsymbol{\eta}(t_0) + \Delta \boldsymbol{\eta}, m_j, n_j] - \mathbf{F}[\boldsymbol{\eta}(t_0), m_j, n_j], \quad j = \overline{1, J},$$

где  $\mathbf{F} = (F_u, F_v)$ ,  $\Delta \boldsymbol{\eta} = (\Delta \eta_k; k = \overline{1, K})$  - искомый вектор орбитальных поправок. Разложим правую часть данного соотношения в ряд Тейлора относительно компонентов вектора  $\Delta \boldsymbol{\eta}$ , ограничившись линейными членами. В результате получим систему линейных уравнений относительно искомых величин  $\Delta \eta_k$ :

$$\Delta \mathbf{r}_j = \sum_{k=1}^K \left. \frac{\partial \mathbf{F}[\boldsymbol{\eta}(t_0) + \Delta \boldsymbol{\eta}, m_j, n_j]}{\partial \eta_k} \right|_{\Delta \boldsymbol{\eta} = 0} \cdot \Delta \eta_k, \quad k = \overline{1, K}. \quad (22)$$

Значения производных находятся через конечные разности:

$$\frac{\partial \mathbf{F}(j)}{\partial \eta_k} = \frac{\mathbf{F}[\boldsymbol{\eta}(t_0) + \varepsilon_k, m_j, n_j] - \mathbf{F}[\boldsymbol{\eta}(t_0), m_j, n_j]}{\varepsilon_k},$$

где  $\varepsilon_k$  - достаточно малое приращение параметра  $\eta_k$  по отношению к  $\Delta \eta_k$ .

Система (22) при  $J \geq K$  решается с помощью метода наименьших квадратов. Однако для  $J = 1$  или  $J = 2$  при  $K = 3$  система не имеет решения. Работоспособность алгоритма обеспечивается в этом случае следующим образом.

Известно, что изменение времени прохождения перицентра  $\tau$ , главным образом, оказывает влияние на значения координат в продольном направлении маршрута, а изменение долготы восходящего узла  $\Omega$  и наклонения орбиты  $i$  - на смещениях в поперечном направлении. С учетом этого поправка  $\Delta \eta_1 = \Delta \tau$  оценивается как

$$\Delta \tau = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J (u_j^* - u_j) \Big/ \frac{\partial F_u(j)}{\partial \tau}.$$

Оставшиеся приращения  $\Delta \Omega$  и  $\Delta i$  определяются из системы

$$\Delta v_j = \frac{\partial F_v(j)}{\partial \Omega} \Delta \Omega + \frac{\partial F_v(j)}{\partial i} \Delta i, \quad j = \overline{1, J}.$$

Для этого попарно рассматриваются ОТМ в начале (с индексом  $j$ ) и конце (с индексом  $j'$ ) маршрута и искомые поправки выражаются через приращения координат:

$$\Delta \Omega_{jj'} = \frac{\left( \Delta v_{j'} \frac{\partial F_v(j)}{\partial i} - \Delta v_j \frac{\partial F_v(j')}{\partial i} \right)}{\left( \frac{\partial F_v(j)}{\partial i} \frac{\partial F_v(j')}{\partial \Omega} - \frac{\partial F_v(j)}{\partial \Omega} \frac{\partial F_v(j')}{\partial i} \right)},$$

$$\Delta i_{jj'} = \frac{\left( \Delta v_j \frac{\partial F_v(j)}{\partial \Omega} - \Delta v_{j'} \frac{\partial F_v(j')}{\partial \Omega} \right)}{\left( \frac{\partial F_v(j)}{\partial i} \frac{\partial F_v(j')}{\partial \Omega} - \frac{\partial F_v(j)}{\partial \Omega} \frac{\partial F_v(j')}{\partial i} \right)},$$

где  $j$  и  $j'$  - номера опорных точек местности, образующих пару:  $j = \overline{1, J-1}$ ,  $j' = \overline{j+1, J}$ ,  $j \neq j'$ . Окончательные значения поправок находятся в результате усреднения

$$\Delta \Omega = \frac{2}{J^2 - J} \sum_{j=1}^{J-1} \sum_{j'=j+1}^J \Delta \Omega_{jj'},$$

$$\Delta i = \frac{2}{J^2 - J} \sum_{j=1}^{J-1} \sum_{j'=j+1}^J \Delta i_{jj'},$$

где  $0,5 J(J-1)$  - число пар опорных точек.

Полученные поправки  $\Delta \eta = (\Delta \tau, \Delta \Omega, \Delta i)$  используются для коррекции вектора начальных условий  $\Delta \eta(t_0) + \Delta \eta$ , после чего по известным координатам  $(m_j, n_j)$  рассчитываются новые значения  $(u_j, v_j)$ . Процесс коррекции параметров повторяется итерационно до тех пор, пока погрешность  $\sigma = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \sqrt{(u_j^* - u_j)^2 + (v_j^* - v_j)^2}$

не примет фиксированное значение.

Рассмотренная модель уточнения геодезической привязки данных ДЗЗ обеспечивает независимую модификацию орбитальных параметров, а это, в свою очередь, делает ее работоспособной при любом числе ОТМ.

**Геодезическая привязка данных фотоархива.** В настоящее время на центрах приема и обработки спутниковой информации накоплены архивы фотоснимков от различных космических систем, функционировавших в 80-90-е годы прошлого столетия. Эффективное использование архивных изображений возможно только после занесения их в электронный каталог (ЭК), для чего необходимо предварительно выполнить геодезическую привязку снимков. Поскольку архивные фотоснимки не сопровождалась полной баллистической информацией, определяющей условия их получения, то возникает необходимость в создании технологии, основанной на оценке параметров геодезической привязки с использованием внешних источников навигационного обеспечения.

Данные баллистического прогноза могут представляться в формате ф.2 (форма 2) или в формате NORAD. В первом случае данные прогноза содержат номер витка, дату и время прохождения спутником восходящего узла орбиты

по Гринвичу, а также проекции радиус-вектора спутника  $X_A, Y_A, Z_A$  и вектора его скорости  $\dot{X}_A, \dot{Y}_A, \dot{Z}_A$  в абсолютной системе координат в указанный момент времени. Значения параметров Кеплеровской орбиты рассчитываются как

$$a_0 = R_0 / (2 - k), \quad k = R_0 V_0^2 / \mu,$$

$$V_0 = \sqrt{\dot{X}_A^2 + \dot{Y}_A^2 + \dot{Z}_A^2}, \quad R_0 = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2 + Z_A^2};$$

$$e_0 = \sqrt{1 - k(2 - k) \cos^2 Q},$$

$$\sin Q = (X_A \dot{X}_A + Y_A \dot{Y}_A + Z_A \dot{Z}_A) / R_0 V_0;$$

$$i_0 = \pi/2 - \arcsin(c_3/c),$$

$$c = \sqrt{c_1^2 + c_2^2 + c_3^2}, \quad c_1 = Y_A \dot{Z}_A - Z_A \dot{Y}_A,$$

$$c_2 = Z_A \dot{X}_A - X_A \dot{Z}_A, \quad c_3 = X_A \dot{Y}_A - Y_A \dot{X}_A;$$

$$\Omega_0 = \arctg(c_1 / (-c_2));$$

$$v_0 = \arcsin(k \sin Q \cos Q e_0);$$

$$u_0 = \arcsin(Z_A / (R_0 \sin i_0)); \quad \omega_0 = u_0 - v_0,$$

где  $\mu$  - произведение гравитационной постоянной на массу Земли;  $a_0, e_0, i_0, \Omega_0, \omega_0$  - соответственно большая полуось, эксцентриситет, наклонение, долгота восходящего узла и аргумент перицентра орбиты;  $v_0$  - истинная аномалия спутника.

Во втором случае данные прогноза также содержат номер витка, дату и время прохождения восходящего узла орбиты и, кроме этого, значения среднего движения спутника и четыре орбитальных параметра Кеплера: эксцентриситет, долготу восходящего узла, наклонение и аргумент перицентра орбиты. Недостающее значение большой полуоси орбиты определяется согласно законам Кеплера по величине средней угловой скорости спутника:

$$a_0 = \sqrt[3]{\mu / n_0},$$

где  $n_0 = \sqrt{\mu / a_0^3}$  - среднее движение спутника.

Процедура траекторного обеспечения имеет ту особенность, что данные баллистического прогноза предоставляются в виде телеграмм не на рабочий виток непосредственно, а на некоторую достаточно регулярную последовательность витков. Необходимые данные баллистического прогноза для рабочего витка с известной датой и временем начала съемки по Гринвичу определяются интерполяционным способом с использованием пары телеграмм, ближайших по дате к рабочему витку в следующем порядке. Сначала по известным уравнениям гринвичские даты витков из телеграмм и рабочего витка переводятся в юлианские даты. Затем определяется юлианское время начальных условий указанных



витков  $T_{H0}$ ,  $T_{H1}$  и юлианское время начала съемки на рабочем витке  $T_s$ :

$$\begin{aligned} T_{H0} &= JD_0 \cdot 24 \cdot 3600 + H_0 \cdot 3600 + M_0 \cdot 60 + S_0, \\ T_{H1} &= JD_1 \cdot 24 \cdot 3600 + H_1 \cdot 3600 + M_1 \cdot 60 + S_1, \\ T_s &= JD \cdot 24 \cdot 3600 + H \cdot 3600 + M \cdot 60 + S, \end{aligned}$$

где  $JD_0$ ,  $JD_1$  – соответственно юлианские даты витка из 1-й и 2-й телеграмм;  $JD$  – юлианская дата рабочего витка;  $H_0, M_0, S_0, H_1, M_1, S_1, H, M, S$  – соответствующие часы, минуты и секунды для указанных дат.

Далее находится усредненное значение периода обращения спутника

$$T_{rot} = (T_{H1} - T_{H0}) / (N_{v1} - N_{v0}),$$

где  $N_{v0}$ ,  $N_{v1}$  – номера витков из телеграмм. Затем определяется номер рабочего витка:

$$N_v = N_{v0} + \text{ent}[(T_s - T_{H0}) / T_{rot}],$$

а по нему искомый коэффициент интерполяции:

$$K_{\text{int}} = (N_v - N_{v0}) / (N_{v1} - N_{v0})$$

и время начальных условий рабочего витка

$$T_H = (N_v - N_{v0})T_{rot} + T_{H0} - JD \cdot 24 \cdot 3600.$$

После чего производится интерполяционный расчет кеплеровских параметров рабочего витка:

$$\begin{aligned} a_0 &= a_{00} + (a_{01} - a_{00})K_{\text{int}}, \\ e_0 &= e_{00} + (e_{01} - e_{00})K_{\text{int}}, \\ n_0 &= n_{00} + (n_{01} - n_{00})K_{\text{int}}, \\ \Omega_0 &= \Omega_{v0} + (\Omega_{v1} - \Omega_{v0})K_{\text{int}}, \\ \omega_0 &= \omega_{00} + (\omega_{01} - \omega_{00})K_{\text{int}}, \end{aligned}$$

где индексы 0 и 1 соответствуют данным первой и второй телеграмм.

На заключительной стадии определяется время прохождения перицентра  $\tau_0$  по формулам:

$$\begin{aligned} v_0 &= -\omega_0, \\ E &= \arctg\left(\sin v_0 \cdot \sqrt{1 - e_0} / (e_0 + \cos v_0)\right), \\ M &= E - e_0 \sin(E) / (1 + e_0 \cos v_0), \\ \tau_0 &= T_H - \frac{M}{\sqrt{\mu/a_0^3}}, \end{aligned}$$

где  $E$ ,  $M$  – соответственно эксцентрическая и средняя аномалии спутника.

Рассмотрим теперь процедуру расчета геодезических координат на основе полученных данных орбитального прогноза. За период формирования изображения  $B(m, n)$  положение КА описывается кеплеровскими уравнениями невозмущенного движения с параметрами, рассчитываемыми по данным орбитального прогноза. Введем в рассмотрение орбитально-

динамическую систему координат  $OX_\delta Y_\delta Z_\delta$ , центр которой совпадает с центром Земли, ось  $OZ_\delta$  проходит через КА, рассматриваемый как материальная точка. Ось  $OX_\delta$  лежит в плоскости орбиты и ориентирована по направлению полета, ось  $OY_\delta$  дополняет систему координат до правой.

Запишем в этой системе координат векторное уравнение

$$\mathbf{R} = \boldsymbol{\eta} + \mathbf{r} \quad (23)$$

и получим его аналитическое решение, т.е. определим координаты сканируемого пикселя  $\mathbf{R}(t) = (X_\delta(t), Y_\delta(t), Z_\delta(t))^T$ . В орбитальной динамической системе координат (ОДСК) положение КА определяется вектором  $\mathbf{r}(t) = (X_{o\delta}(t), Y_{o\delta}(t), Z_{o\delta}(t))^T$ . Опустим в обозначениях индекс  $t$  и представим уравнение (23) в виде

$$\begin{bmatrix} X_\delta - X_{o\delta} \\ Y_\delta - Y_{o\delta} \\ Z_\delta - Z_{o\delta} \end{bmatrix} = |\boldsymbol{\eta}| \cdot \mathbf{A}_o \cdot \begin{bmatrix} X_c^0 \\ Y_c^0 \\ Z_c^0 \end{bmatrix}, \quad (24)$$

где  $\mathbf{A}_o = [a_{oij}; i, j = \overline{1, 3}]$  – матрица элементов ориентации, компоненты которой получаются в результате перемножения матриц  $\mathbf{A}_c(t)$  и  $\mathbf{A}_y$ ;  $X_c^0, Y_c^0, Z_c^0$  – координаты единичного вектора  $\boldsymbol{\eta}^0$ , определяемые в соответствии с законом строчной развертки датчика.

Раскрывая выражение (24) и деля первое и второе уравнения на третье с целью исключения параметра  $|\boldsymbol{\eta}|$ , получаем соотношения для вычисления координат сканируемого элемента в ОДСК:

$$\begin{aligned} X_\delta &= (Z_\delta - Z_{o\delta}) \frac{a_{o11} X_c^0 + a_{o12} Y_c^0 + a_{o13} Z_c^0}{a_{o31} X_c^0 + a_{o32} Y_c^0 + a_{o33} Z_c^0}, \\ Y_\delta &= (Z_\delta - Z_{o\delta}) \frac{a_{o21} X_c^0 + a_{o22} Y_c^0 + a_{o23} Z_c^0}{a_{o31} X_c^0 + a_{o32} Y_c^0 + a_{o33} Z_c^0}. \end{aligned} \quad (25)$$

Обозначим через  $\phi$  угол визирования сканирующего луча и представим соотношение (25) в виде

$$X_\delta = (Z_{o\delta} - Z_\delta) \text{tg } \phi_x, \quad Y_\delta = (Z_{o\delta} - Z_\delta) \text{tg } \phi_y, \quad (26)$$

$$c_1 Z_\delta^2 + c_2 Z_\delta + c_3 = 0, \quad (27)$$

где

$$\begin{aligned} \text{tg}^2 \phi &= \text{tg}^2 \phi_x + \text{tg}^2 \phi_y, \quad c_1 = 1 + \text{tg}^2 \phi + k_1(1 + k_2)^2, \\ c_2 &= -2Z_{o\delta} [k_1 k_2 (1 + k_2) + \text{tg}^2 \phi], \quad c_3 = Z_{o\delta}^2 (\text{tg} \phi + k_1 k_2^2) - a_3^2, \\ k_1 &= a_3^2 / R_n^2 - 1, \quad k_2 = \text{ctg } u' \text{tg } \phi. \end{aligned}$$

Решив уравнение (27), определим значение  $Z_0$ , а затем по формулам (25) или (26) рассчитаем координаты  $X_0$  и  $Y_0$  сканируемого элемента.

Для определения геодезических координат указанного пикселя выполним переход от ОДСК к гринвичской геоцентрической системе координат  $OX_2Y_2Z_2$ . Этот переход описывается выражением

$$\mathbf{R}_2(t) = \mathbf{A}_z \mathbf{A}_i \mathbf{A}_u \mathbf{R}(t), \quad (28)$$

где  $\mathbf{R}_2(t) = (X_2, Y_2, Z_2)^T$  – обозначение вектора  $\mathbf{R}(t)$  в гринвичской системе координат;  $\mathbf{A}_z, \mathbf{A}_i, \mathbf{A}_u$  – соответственно матрицы поворота орбитальной системы координат на углы  $u, i_0$  и на линию гринвичского меридиана. В результате искомые геодезические координаты пикселя вычисляются как

$$\lambda = \arctg\left(\frac{Y_2}{X_2}\right), \quad \varphi = \arctg\left[\frac{Z_2 \sin \lambda}{Y_2(1 - e_3^2)}\right]. \quad (29)$$

Таким образом, соотношения (23) – (29) определяют вид искомых функций геодезической привязки произвольного пикселя изображений.

**Заключение.** Рассмотренные алгоритмы предварительной обработки данных ДЗЗ перед их каталогизацией реализованы в составе программных комплексов BankSat, CatalogO, NormSatReg, MonitorSat, BelKA, MicroSat. Комплексы используются для обработки и каталогизации изображений от космических аппаратов «Ресурс-О1», «Метеор-3М», «Монитор-Э», а также архивных изображений на федеральном центре Роскосмоса (Научный центр оперативно-

го мониторинга Земли, г. Москва), отраслевых центрах Росгидромета (НИЦ космической гидрометеорологии «Планета», г. Долгопрудный), региональном центре г. Ханты-Мансийска.

Эти комплексы позволяют в темпе приема данных ДЗЗ по радиолиниям оперативно оценить качество принимаемых изображений, скорректировать импульсные и полосовые помехи, оценить процент покрытия снимков облаками, выполнить их оптимальное контрастирование, уточнить параметры геодезической привязки изображений.

Эти операции, выполняемые перед электронной каталогизацией данных ДЗЗ, позволяют значительно повысить эффективность использования спутниковой информации потребителями из различных отраслей и регионов страны, которым предоставляется оперативный доступ к электронному каталогу по сети Internet.

#### **Библиографический список**

1. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. В 2-х кн.: пер. с англ. - М.: Мир, 1982. Кн.1. 312 с., кн.2. 480 с.
2. Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н. Цифровая обработка сигналов: справочник. М.: Радио и связь, 1985. - 312 с.
3. Коршунов Ю.М. Математические основы кибернетики.-М.: Энергоатомиздат, 1987. - 495 с.
4. Злобин В.К., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е. Уточнение орбитального прогноза при координатной привязке спутниковых изображений // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2002. № 3. С. 78-91.
5. Злобин В.К., Еремеев В.В. Обработка аэрокосмических изображений.-М.: Физматлит, 2006. – 288 с.