

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ВИДЕОДАННЫХ ОТ МНОГОМАТРИЧНЫХ СКАНИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Кузнецов А.Е., главный конструктор проекта филиала ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр», зам. директора НИИ «Фотон» РГРТУ, д.т.н., e-mail: foton@rsreu.ru
Пошехонов В.И., аспирант РГРТУ, НИИ «Фотон», м.н.с.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, стереофотограмметрическая обработка, спектрально-зональная съемка, стереоизображение.

Введение

Один из принципов одновременной регистрации изображений подстилающей поверхности в нескольких спектральных диапазонах заключается в пространственном разделении потока лучистой энергии по нескольким оптико-электронным преобразователям (ОЭП). Для этого в фокальной плоскости сканирующего устройства устанавливаются с небольшим смещением друг относительно друга вдоль направления полета спутника одиночные линейки или составные матрицы на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС) с одномоментной регистрацией или работающие в режиме накопления заряда. Для обеспечения спектрально-зональной съемки перед каждым ОЭП устанавливают соответствующие полосовые светофильтры. Преимущество данного подхода заключается в отсутствии традиционно используемой при построении сканирующих устройств сложной и дорогостоящей спектроразделительной системы, которая приводит к ослаблению регистрируемого сигнала и снижению радиометрического разрешения видеоинформации. В соответствии с рассмотренным принципом спроектированы: съемочное устройство высокого разрешения «Геотон-Л1» космического аппарата (КА) «Ресурс-ДК», аппаратура комплекса многозональной сканерной съемки (КМСС) гидрометеорологического спутника «Метеор-М», а также съемочные устройства на перспективном КА «Ресурс-П».

Однако вследствие использования принципа пространственного разделения потока лучистой энергии наблюдение одних и тех же объектов подстилающей поверхности в разных спектральных диапазонах происходит, во-первых, с небольшой временной задержкой, а во-вторых, под разными углами от надира. С одной стороны это создает сложности при геометрическом совмещении снимков для решения задачи цветосинтеза [1], с другой – возникает возможность стереофотограмметрической обработки спектрально-зональных изображений, что позволяет на принципиально новом уровне в оперативном режиме решать задачи:

- объемного дешифрирования наблюдаемых объектов;
- формирования карт параметров облачности – высоты верхней границы и скорости движения – для гидро-

Рассматривается решение новых задач стереофотограмметрической обработки спектрально-зональных изображений, формируемых многоматричными сканирующими устройствами с пространственным разделением потока лучистой энергии. Представлены особенности спроектированной для решения данных задач информационной технологии, приводятся примеры выходных продуктов, сформированных по реальным данным.

рометеорологических исследований;

- сегментации облачных образований при каталогизации с целью оценки качества информации;
- создания растровых 3D-моделей подстилающей поверхности.

Технология стереофотограмметрической обработки

В настоящей работе рассматриваются особенности спроектированной для решения перечисленных задач информационной технологии, предполагающей выполнение следующих основных этапов:

- геометрическая калибровка съемочного устройства;
- внешнее и взаимное геодезическое ориентирование спектрально-зональных снимков;
- формирование анаглифического стереоизображения;
- идентификация одноименных точек и формирование карты диспаратности;
- определение высот объектов с помощью прямой фотограмметрической засечки;
- формирование выходных информационных продуктов.

Геометрическая калибровка съемочного устройства

Определение трехмерных координат объектов по стереопарам основано на восстановлении пространственного положения визирных лучей, сформировавших изображения одноименных точек. Поэтому к точности геометрических параметров съемочной системы предъявляются достаточно высокие требования. Отсюда встает задача калибровки съемочного устройства, направленная на устранение погрешностей, которые вызваны ошибками определения элементов внутреннего ориентирования, включая дисторсию оптической схемы объектива, низкой точностью задания конструктивных углов установки на платформу КА съемочного устройства и навигационных приборов, измеряющих параметры внешнего ориентирования в процессе съемки.

Каждая n -я строка изображения $I(m, n)$ от видеодатчика сканового принципа действия формируется в соответствующий момент времени $t = t_0 + n/f$, где t_0 – время начала формирования видеоданных, f – строчная частота сканирования. С помощью интерполяции навигационных измерений для произвольного момента времени t рассчитываются: вектор $\mathbf{p}(t)$ пространственного положения КА в гринвичской геоцентрической системе координат (ГСК); матрица поворота $\mathbf{R}_{ГН}(t)$, связывающая приборную систему координат (ПСК) прибора астроориентации с ГСК.

Для стереофотограмметрической обработки изображений необходимо для произвольного пикселя (m, n) определить единичный вектор $\mathbf{r}_Г(m, n) = (r_x, r_y, r_z)^T$ направляющих косинусов соответствующего визирного луча в ГСК. Запишем математическое выражение, связывающее искомым вектор $\mathbf{r}_Г(m, n)$ с направлением визирного луча $\mathbf{r}_П(m)$ в приборной системе координат съёмочного устройства,

$$\mathbf{r}_Г(m, n) = \mathbf{R}_{ГН}(t) \mathbf{R}_{НС} \mathbf{R}_{СП} \mathbf{r}_П(m),$$

где $\mathbf{R}_{СП}$ – матрица перехода от ПСК съёмочного устройства к связанной системе координат (ССК) КА; $\mathbf{R}_{НС}$ – матрица перехода от ССК к ПСК прибора астроориентации; компоненты вектора $\mathbf{r}_П(m)$ определяются фокусным расстоянием объектива, физическим размером светочувствительного элемента и расположением ПЗС-линейки в фокальной плоскости.

Заметим, что уточнение рассмотренных параметров по опорной картографической информации представляет сложную техническую задачу, поскольку: во-первых, на координатные рассогласования в опорных точках влияют как статические ошибки геометрии съёмочной системы, так и динамические ошибки навигационных измерений; во-вторых, искомые параметры, определяющие геометрию съёмочной системы, взаимосвязаны между собой и разделить их влияние оказывается затруднительно. Показано, что с целью калибровки съёмочной системы вектор $\mathbf{r}_Г$ направления визирного луча в ПСК прибора астроориентации возможно описать полиномиальной функцией в зависимости от номера m светочувствительного элемента ПЗС-линейки, что позволяет сократить до минимума число калибруемых параметров и упрощает последующую процедуру их определения,

$$\mathbf{r}_Г(m) = \sum_{i=0}^N \mathbf{a}_i m^i, \quad \mathbf{a} = (a_x, a_y, a_z)^T,$$

$$\mathbf{r}_Г(m) = \mathbf{A} \mathbf{m}, \quad \mathbf{A} = [\mathbf{a}_0 \mathbf{a}_1 \dots \mathbf{a}_N], \quad \mathbf{m} = (1, m, m^2, \dots, m^N)^T.$$

Матрица \mathbf{A} определяется для каждой ПЗС-линейки $\lambda = \overline{1, L}$ съёмочного устройства. С учетом этого определим искомое направление $\mathbf{r}_{Г\lambda}$ визирного луча в гринвичской геоцентрической системе координат,

$$\mathbf{r}_{Г\lambda}(m, n) = \mathbf{R}_{ГН}(t) \mathbf{A}_\lambda \mathbf{m}.$$

Для определения элементов матриц \mathbf{A}_λ , $\lambda = \overline{1, L}$ используем опорные точки местности, для которых применим сквозную нумерацию. Тогда номер точки $k = \overline{1, K}$ однозначно определяет её геоцентрические координаты $\mathbf{g}_k = (X_k, Y_k, Z_k)^T$, а также соответствующие

пиксельные координаты (m_k, n_k) на изображении, сформированном сканером с номером λ на j -м витке. Введем обозначения,

$$\mathbf{p}_{j,k} = \mathbf{p}(t_{j,k}), \quad \mathbf{B}_{j,k} = \mathbf{R}_{ГН}(t_{j,k}), \quad t_{j,k} = t_{0j} + n_k/f.$$

Тогда координаты $\hat{\mathbf{g}}_k$ ближайшей точки, лежащей на визирном луче, сформировавшим изображение пикселя (m_k, n_k) , равны

$$\hat{\mathbf{g}}_k = \mathbf{p}_{j,k} + s_k \mathbf{r}_k,$$

$$\text{где } s_k = (\mathbf{g}_k - \mathbf{p}_{j,k}) \mathbf{r}_k / |\mathbf{r}_k|^2, \quad \mathbf{r}_k = \mathbf{B}_{j,k} \mathbf{A}_\lambda \mathbf{m}_k.$$

Отсюда получим уравнение вектора невязок,

$$\mathbf{d}(m_k, n_k, X_k, Y_k, Z_k) = \mathbf{g}_k - \hat{\mathbf{g}}_k = \mathbf{0}, \quad k = \overline{1, K}.$$

Для более точного определения взаимной ориентации ПЗС-линеек дополнительно подключим общие точки $(m_{c\lambda}, n_{c\lambda})$, $c = \overline{1, C}$, идентифицируемые одновременно на изображениях всех спектральных каналов $\lambda = \overline{1, L}$. Введем в рассмотрение дополнительные мешающие параметры $(\tilde{X}_c, \tilde{Y}_c, \tilde{Z}_c)$, соответствующие неизвестным геоцентрическим координатам изображенного в одноименных точках объекта местности. Отсюда,

$$\mathbf{d}(m_{c\lambda}, n_{c\lambda}, \tilde{X}_c, \tilde{Y}_c, \tilde{Z}_c) = \mathbf{0}, \quad c = \overline{1, C}, \quad \lambda = \overline{1, L}.$$

Обозначим символом $\boldsymbol{\theta}$ – вектор неизвестных параметров, который включает компоненты $a_{i,j}^{(\lambda)}$ матриц \mathbf{A}_λ и геоцентрические координаты $(\tilde{X}_c, \tilde{Y}_c, \tilde{Z}_c)$. Заметим, что вектор невязок \mathbf{d} зависит от ряда величин, измеряемых с ошибками: координаты (m, n) опорных и общих точек на изображениях, геоцентрические координаты (X, Y, Z) опорных точек, углы (α, ω, κ) ориентации КА, определяющие матрицу $\mathbf{R}_{ГН}(t)$. Обозначим через $\boldsymbol{\zeta}$ вектор истинных, без влияния ошибок, значений рассмотренных величин, которые должны удовлетворять следующим зависимостям:

$$\mathbf{e}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\zeta}) = \mathbf{0},$$

$$\mathbf{e}_k(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\zeta}) = \mathbf{d}(m_k, n_k, X_k, Y_k, Z_k), \quad k = \overline{1, K},$$

$$\mathbf{e}_{K+Lc+\lambda}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\zeta}) = \mathbf{d}(m_{c\lambda}, n_{c\lambda}, \tilde{X}_c, \tilde{Y}_c, \tilde{Z}_c), \quad c = \overline{1, C}, \quad \lambda = \overline{1, L}.$$

Измерения величин $\boldsymbol{\zeta}$ содержат случайные ошибки, таким образом, наблюдаются зашумленные значения $\mathbf{z} = \boldsymbol{\zeta} + \boldsymbol{\varepsilon}$, $\boldsymbol{\varepsilon} \in N(0, \mathbf{V}_0)$, где \mathbf{V}_0 – ковариационная матрица погрешностей $\boldsymbol{\varepsilon}$. Тогда определение искомым параметров $\boldsymbol{\theta}$ сводится к решению задачи минимизации функционала $Q(\boldsymbol{\zeta}) = (\mathbf{z} - \boldsymbol{\zeta})^T \mathbf{V}_0^{-1} (\mathbf{z} - \boldsymbol{\zeta}) \rightarrow \min$ с ограничениями $\mathbf{e}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\zeta}) = \mathbf{0}$. Введем обозначения матриц Якоби \mathbf{S} и \mathbf{T} функций \mathbf{e} относительно векторов $\boldsymbol{\zeta}$ и $\boldsymbol{\theta}$ соответственно,

$$\mathbf{S} = \left[\left(\frac{\partial e_j(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\zeta})}{\partial \zeta_k} \right) \right], \quad \mathbf{T} = \left[\left(\frac{\partial e_j(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\zeta})}{\partial \theta_k} \right) \right],$$

где производные оценим численно с помощью конечных разностей.

Поставленная задача минимизации решается итерационно с помощью определения поправок $\delta \zeta_a$ и $\delta \theta_a$ к текущим значениям ζ_a и θ_a по формулам [2]:

$$\delta \theta_a = \hat{\boldsymbol{\theta}} - \boldsymbol{\theta}_a = -\mathbf{C}_a^{-1} \mathbf{T}_a^T \mathbf{D}_a^{-1} [\mathbf{e}(\boldsymbol{\theta}_a, \boldsymbol{\zeta}_a) + \mathbf{S}_a (\mathbf{z} - \boldsymbol{\zeta}_a)],$$

где $C_a = \mathbf{T}_a^T \mathbf{D}_a^{-1} \mathbf{T}_a$, $\mathbf{D}_a = \mathbf{S}_a \mathbf{V}_0 \mathbf{S}_a^T$.

$$\delta \zeta_a = \hat{\zeta} - \zeta_a = \mathbf{z} - \zeta_a -$$

$$\mathbf{V}_0 \mathbf{S}_a^T \mathbf{D}_a^{-1} [\mathbf{e}(\boldsymbol{\theta}_a, \zeta_a) + \mathbf{S}_a (\mathbf{z} - \zeta_a) + \mathbf{T}_a \delta \boldsymbol{\theta}_a]$$

В результате на каждой итерации $a = 1, 2, \dots$ получим новые оценки $\boldsymbol{\theta}_{a+1}$, ζ_{a+1} ,

$$\boldsymbol{\theta}_{a+1} = \boldsymbol{\theta}_a + \delta \boldsymbol{\theta}_a, \quad \zeta_{a+1} = \zeta_a + \delta \zeta_a.$$

После достижения сходимости ковариационную матрицу $D[\hat{\boldsymbol{\theta}}]$ полученных на последней итерации параметров $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ оценим выражением

$$D[\hat{\boldsymbol{\theta}}] \approx \hat{\sigma}^2 [\mathbf{T}^T (\mathbf{S} \mathbf{V}_0 \mathbf{S}^T)^{-1} \mathbf{T}]^{-1},$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{q-p} (\mathbf{z} - \hat{\zeta})^T \mathbf{V}_0^{-1} (\mathbf{z} - \hat{\zeta}),$$

где p , q – число элементов векторов неизвестных параметров $\boldsymbol{\theta}$ и измерений ζ соответственно.

Апробация рассмотренного алгоритма калибровки выполнена по съемочным устройствам среднего разрешения КМСС. Для каждого спектрального канала измерялись координаты порядка 300 опорных точек по снимкам Landsat с точностью $\sigma = 50$ м. В результате точность геодезической привязки изображений составила $\sigma = 84.1$ м для камер МСУ-100 и $\sigma = 93.2$ м для МСУ-50. При этом погрешность взаимного ориентирования отдельных каналов не превышает $2''$, что соответствует требованиям решения задач стереообработки.

Внешнее и взаимное ориентирование снимков

В случае если навигационные измерения КА обладают недостаточной точностью, выполняется ориентирование снимков с использованием координат общих и опорных точек. Это позволяет уменьшить погрешности последующего определения трехмерных координат объектов, более точно совмещать изображения при создании анаглифического стереоизображения. На данном этапе для дальнейшей обработки выбираются два изображения $I_1(m_1, n_1)$, $I_2(m_2, n_2)$ – как правило, полученных от наиболее разнесенных в фокальной плоскости ПЗС-линеек, для которых стереобаза и, соответственно, точность расчетов максимальна.

Далее на снимках идентифицируются одноименные точки с помощью алгоритма корреляционно-экстремального поиска. Для опорных точек предусмотрена возможность автоматического измерения координат с использованием базы абрисов – небольших фрагментов изображений объектов местности с известными геодезическими координатами. Ориентирование заключается в минимизации рассмотренного ранее вектора невязок $\mathbf{d}(m, n, X, Y, Z)$ для всех общих и опорных точек. Множество уточняемых в процессе ориентирования параметров зависит от установленных на КА навигационных приборов и точности выдаваемых ими измерений. Как правило, корректируются угловые элементы внешнего ориентирования, в отдельных случаях – параметры временной привязки видеоданных.

Формирование анаглифического стереоизображения

Создание стереопары заключается в геометрическом трансформировании исходных снимков с целью

совмещения эпиполярных линий и строк анаглифического стереоизображения. Эпиполярная линия – проекция визирного луча, соответствующего заданному пикселю одного из исходных снимков, на второе изображение. Учитывая особенность формирования спектрозональных изображений на одном витке полета спутника с небольшой временной задержкой, эпиполярные линии будут практически совпадать со столбцами исходных снимков. Поэтому вначале выполним трансформирование изображения $I_2(m_2, n_2)$ в систему координат базового $I_1(m_1, n_1)$ с целью устранения систематических взаимных искажений, обусловленных вращением и кривизной Земли, не стабильностью углов ориентации КА и др. Для этого используем уравнения геопривязки $\varphi = \Phi_i(m_i, n_i)$, $\lambda = F_i(m_i, n_i)$, $i = 1, 2$, задающие геодезические координаты точки пересечения визирного луча, соответствующего пикселю (m_i, n_i) , с выбранным референц-эллипсоидом,

$$\begin{cases} m_1 = \Phi_1^{-1}[\Phi_2(m_2, n_2), F_2(m_2, n_2)], \\ n_1 = F_1^{-1}[\Phi_2(m_2, n_2), F_2(m_2, n_2)], \end{cases}$$

где обратные функции $m_1 = \Phi_1^{-1}(\varphi, \lambda)$, $n_1 = F_1^{-1}(\varphi, \lambda)$ получим численным обращением.

Далее оба снимка разворачиваются на 90 градусов для совмещения эпиполярных линий со строками стереопары. Наконец, одно из полученных изображений $I_1^*(m, n)$ записывается в канал красного анаглифического стереоизображения, а второе $I_2^*(m, n)$ – одновременно в каналы зеленого и синего. На рис. 1. представлен пример сформированного на основе видеоданных от первого и третьего ОЭП КА «Ресурс-ДК» анаглифического стереоизображения на район города Шанхай, которое позволяет выполнять объемное дешифрирование наблюдаемых объектов. Относительную точность σ_h определения высоты в данном случае можно оценить с использованием известного соотношения

$$\sigma_h = \frac{\sigma_d}{B/H},$$

где σ_d – точность определения диспарантности, B/H – отношение базы стереосъемки к высоте. Учитывая, что $B/H \approx 0.042$ для крайних ОЭП и принимая точность идентификации координат одноименных точек в 1 пиксель, получим для снимков с пространственным разрешением 1 м $\sigma_h \approx 23.6$ м.

Идентификация одноименных точек

Для восстановления информации о трехмерной структуре сцены по стереопаре необходимо определить на изображениях координаты одноименных точек. В результате выполнения рассмотренного алгоритма формирования стереопары объекты местности, лежащие на нулевой высоте, будут полностью совмещены. Разница координат одноименных точек в строчном направлении – диспарантность d_m – будет пропорциональна высоте h соответствующей точки.

Рассматриваемая задача обработки спектрозональных изображений на данном этапе имеет ряд особенностей: во-первых, изображения подстилающей поверхности в разных спектральных диапазонах могут существенно отличаться, что требует использования соответствующих мер оценки их сходства [3].



Рис. 1. Анаглифическое стереоизображение, полученное на основе данных от первого и третьего ОЭП КА «Ресурс-ДК» (для просмотра необходимы анаглифические очки)

Заметим, однако, что это не относится к случаю, когда объектом исследования являются облачные образования, которые представляются на изображениях видимой части спектра одинаково, так как не имеют цветовой окраски.

Во-вторых, поскольку регистрация изображений в разных каналах выполняется с временной задержкой друг относительно друга, то для движущихся объектов происходит смещение координат одноименных точек не только в строчном, но и в кадровом направлении на стереопаре. При этом величина смещения d_n представляет интерес для определения скорости v_n движения объектов поперек трассы полета КА, например, облачных образований – с целью их более качественной сегментации, а также для гидрометеорологических исследу-

ований. Поэтому на данном этапе сформируем две карты диспарантности $D_m(m,n)$, $D_n(m,n)$, задающие смещения координат одноименных точек в строчном и кадровом направлениях соответственно для всех пикселей базового изображения $I_1^*(m,n)$ стереопары, с помощью алгоритма оптимизационного поиска [4].

На рис. 2, а представлена карта диспарантности $D_m(m,n)$ на горный район Пакистана, сформированная на основе изображений от первого и третьего ОЭП КА «Ресурс-ДК». Код яркости пикселя равен разности координат одноименных точек в строчном направлении. Перепад высот объектов для данного района составляет порядка 2300 м. Пример 3D визуализации с наложением текстуры изображения от первого ОЭП (базового изображения) приведен на рис. 2, б.

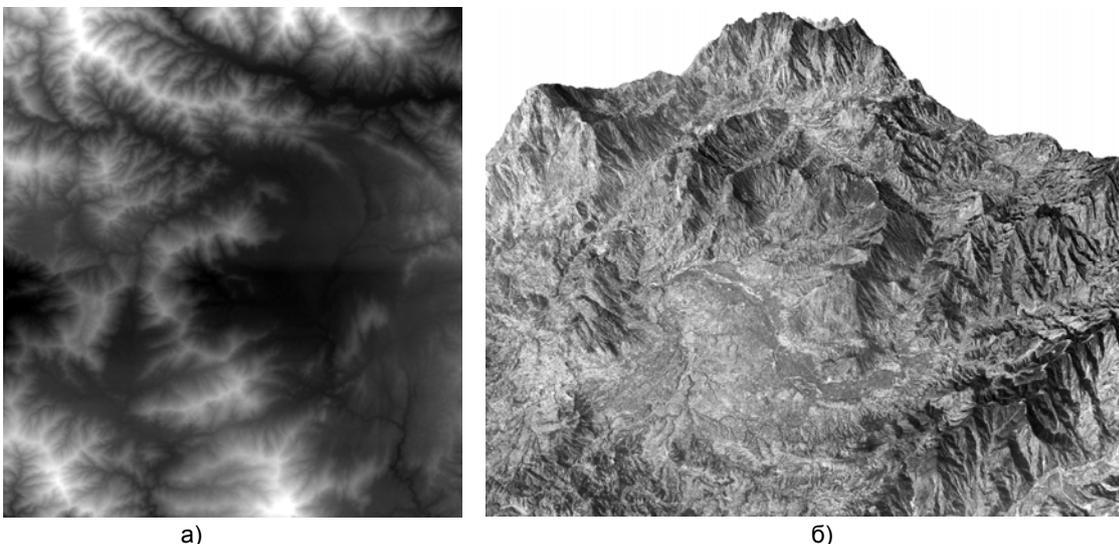


Рис. 2. Пример результатов стереообработки видеоданных КА «Ресурс-ДК»: а) карта диспарантности, б) 3D снимок местности

Определение высот и скоростей объектов

На данном этапе для каждой идентифицированной одноименной точки $I_1^*(m, n)$, $I_2^*(m + D_m(m, n), n + D_n(m, n))$ вычислим геодезические координаты (φ, λ, h) соответствующих объектов, а также скорость их движения v_n поперек трассы полета КА. Заметим, что скорость v_m вдоль трассы полета КА определить по стереоизображению не представляется возможным, кроме того такое перемещение объектов будет приводить к ошибкам определения их высоты h , пропорциональным значению v_m и составляющим порядка 110 м на каждый 1 м/с скорости.

Вначале получим координаты одноименных точек на исходных изображениях $I_1(m_1, n_1)$, $I_2(m_2, n_2)$, для которых определим затем пространственное \mathbf{p}_1 , \mathbf{p}_2 и угловое \mathbf{r}_1 , \mathbf{r}_2 положение съемочных устройств в гринвичской геоцентрической системе координат. Тогда вектор искомым координат $\mathbf{g}(X, Y, Z)$ определим как среднюю точку кратчайшего отрезка $\mathbf{g}_1\mathbf{g}_2$, соединяющего визирные лучи, а скорость v_n по длине l этого отрезка,

$$\mathbf{r}_0 = \frac{\mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2}{|\mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2|^2}, \mathbf{p}_0 = \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1,$$

$$\mathbf{g}_1 = \mathbf{r}_1[(\mathbf{p}_0 \times \mathbf{r}_2) \cdot \mathbf{r}_0] + \mathbf{p}_1, \mathbf{g}_2 = \mathbf{r}_2[(\mathbf{p}_0 \times \mathbf{r}_1) \cdot \mathbf{r}_0] + \mathbf{p}_2,$$

$$\mathbf{g} = (\mathbf{g}_1 + \mathbf{g}_2)/2, l = |\mathbf{g}_2 - \mathbf{g}_1|, v_n = l/\Delta t, \Delta t = |m_2 - m_1|/f.$$

Наконец, перейдем от прямоугольных координат (X, Y, Z) к географическим (φ, λ, h) . В результате обработки всех идентифицированных одноименных точек получим массивы значений высот $h(\varphi, \lambda)$ и скоростей $v_n(\varphi, \lambda)$ наблюдаемых объектов.

Формирование выходных информационных продуктов

На заключительном этапе в зависимости от решаемых задач и параметров съемочного устройства возможно формирование ряда информационных продуктов. Во-первых, на основе рассчитанных значений высот $h(\varphi, \lambda)$ формируется цифровая модель рельефа (ЦМР) в широтно-долготной сетке с заданным разрешением. Во-вторых, выполняется сегментация облачных образований для получения одной из оценок качества информации дистанционного зондирования Земли, определяемой на этапе каталогизации, – доли облачности и ее распределения по полю снимка. Решение о принадлежности заданного пикселя $I_1(m_1, n_1)$ изображения к облачности, представленной множеством O , принимается на основе полученных геодезических координат (φ, λ, h) и скорости v_n с помощью порогового алгоритма:

$$I_1(m_1, n_1) \in O : |v_n| > \varepsilon_v \vee |h - h_{\text{ЦМР}}(\varphi, \lambda)| > \varepsilon_h,$$

где ε_v , ε_h – пороговые значения скорости и разницы высоты; $h_{\text{ЦМР}}(\varphi, \lambda)$ – истинная высота объектов земной поверхности, определяемая по ЦМР, в качестве которой используется доступная на всю территорию земной поверхности модель SRTM30.

Заметим, что алгоритмы сегментации облачных образований, основанные на анализе видеоданных в разных спектральных диапазонах, часто дают сбои в условиях съемки поверхности льда, заснеженных территорий. Рассматриваемая технология стереообработки предоставляет новый геометрический критерий сегмен-

тации, дополняя существующие алгоритмы, что позволяет повысить качество решения данной задачи.

Наконец, для гидрометеорологических исследований формируется карта параметров облачности. Для этого вначале на полутоновом изображении $I_1(m_1, n_1)$ выделим облачность определенным оттенком цвета в соответствии с полученной ранее сегментацией и значением высоты h . Для этого используем цветовое пространство HSL:

$$H = \frac{h - h_{\min}}{h_{\max} - h_{\min}}, S = \text{const}, L = I_1(m_1, n_1).$$

После чего перейдем к соответствующим значениям RGB. Полученное таким образом цветное изображение $\hat{I}_1(m_1, n_1)$ трансформируем в выбранную картографическую проекцию. Далее с некоторым шагом нанесем вектора скоростей v_n . Заметим, что на соответствующем фрагменте изображения может присутствовать облачность разных слоев, движущихся в разных направлениях и скоростью, либо представлены участки суши. Поэтому для определения наиболее вероятной скорости движения анализируется гистограмма соответствующих значений, которая имеет, как правило, двухмодальную форму.

На рис. 3 представлен пример карты параметров облачности, сформированной по изображениям с пространственным разрешением 60 м от съемочного устройства МСУ-100 № 1, входящего в состав КМСС КА «Метеор-М». Отношение стереобазы к высоте составляет $B/H = 0.34$, получена оценка абсолютной точности расчета высоты – $\sigma_h = 253$ м без учета движения объектов вдоль трассы полета спутника, точность определения скорости движения в поперечном направлении – $\sigma_v = 2.3$ м/с. Изображение сформировано в картографической проекции Меркатора, облачность выделена цветом в соответствии с цветовой легендой, представленной в нижней части карты. Длина каждого вектора показывает скорость движения v_n в соответствии с масштабным отрезком в нижней правой части изображения.

Заключение

Рассмотренные алгоритмы и информационная технология стереофотограмметрической обработки спектрально-анализированных изображений от видеодатчиков с пространственным разделением потока лучистой энергии позволяет решать ряд задач, связанных с восстановлением информации о трехмерной структуре сцены. Апробация технологии выполнена по реальным данным от современных съемочных устройств высокого и среднего пространственного разрешения. Полученные оценки точностных характеристик показали практическую применимость формируемых информационных продуктов. Разработанный на базе информационной технологии программный комплекс внедрен в научно-исследовательском центре «Планета», где по данным КМСС в оперативном режиме формируется новый вид продуктов – карты параметров облачности: маска, высота и скорость движения.

Работа проводилась в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2015 годы (госконтракт № П2422).

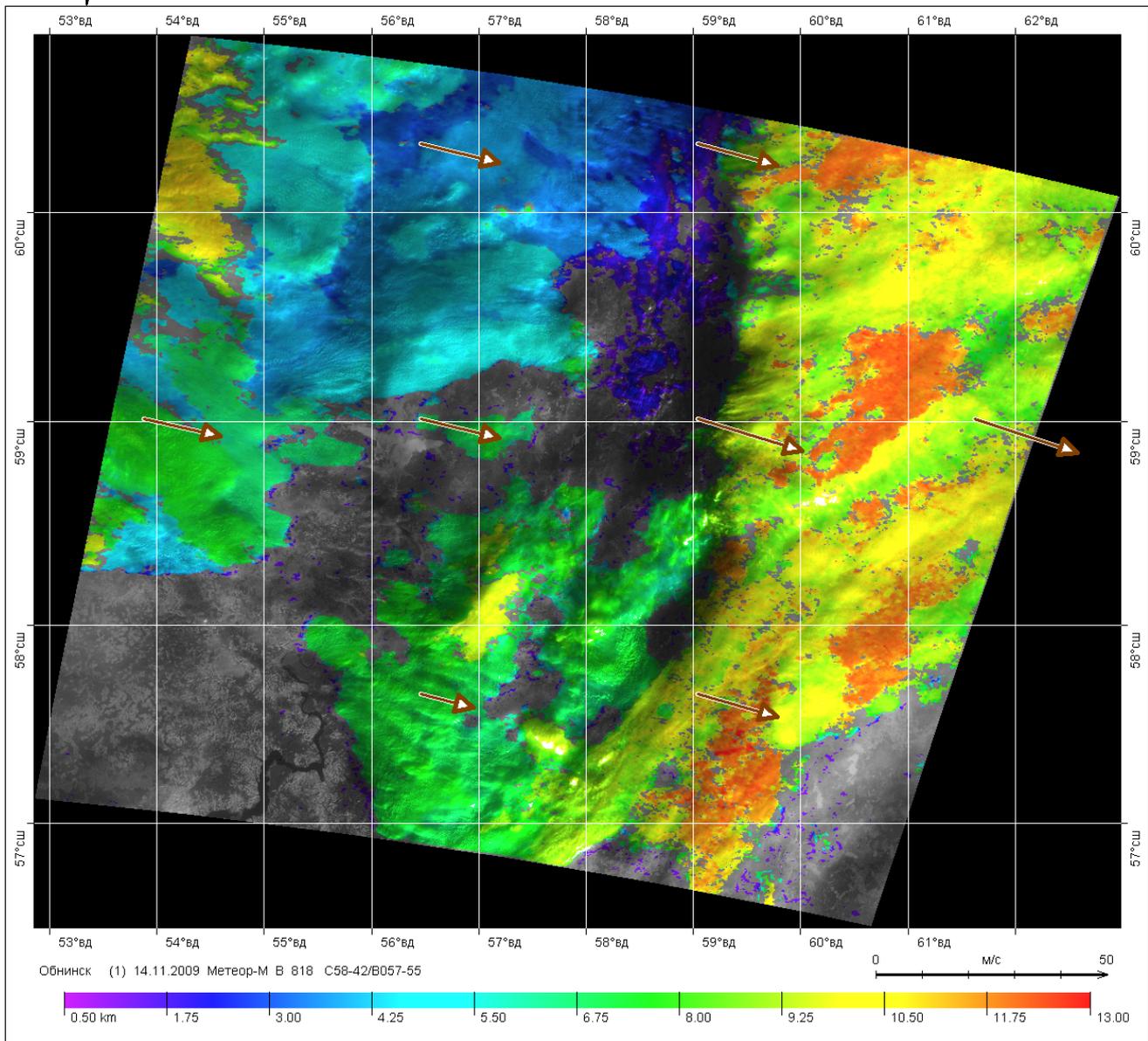


Рис. 3. Карта параметров облачности, сформированная по данным КМСС КА «Метеор-М»

Литература

1. Кузнецов А.Е., Светелкин П.Н. Формирование цветных снимков по спутниковым изображениям среднего и высокого пространственного разрешения // Цифровая обработка сигналов. 2009. №3. С. 36–40.
2. Seber G.A.F., Wild C.J. Nonlinear Regression. New York: John Wiley and Sons. 1989.
3. Hirschmüller H., Scharstein D. Evaluation of Stereo Matching Costs on Images with Radiometric Differences // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2009. №31(9). С. 1582-1599.
4. Кузнецов А.Е., Побаруев В.И., Пошехонов В.И. Идентификация одноименных точек на стереоснимках с использованием алгоритмов оптимизационного поиска // Информатика и прикладная математика: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГПУ. 2008. С. 83-90.

INFORMATIONAL TECHNOLOGY OF MULTILINE SCANNER VIDEO DATA STEREO PHOTOGRAMMETRIC PROCESSING

Kuznetsov A.E., Poshehonov V.I.

The solution of new tasks of stereophotogrammetric processing of multispectral images from multiline scanners with spatial separation of radiation energy is considered. Characteristic features of developed informational technology as well as processing results based on real data are presented.