

УДК 004.932.2: 528.88

## ОЦЕНКА ВЫСОТЫ ОБЛАЧНОСТИ ПО ДАННЫМ КОМПЛЕКСА МНОГОЗОНАЛЬНОЙ СКАНЕРНОЙ СЪЕМКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «МЕТЕОР-М»

*Кузнецов А.Е., д.т.н., зам.директора НИИ «Фотон» РГРТУ*

*Пошехонов В.И., аспирант НИИ «Фотон» РГРТУ, foton@rgta.ryazan.ru*

**Ключевые слова:** космический аппарат, сканерная съемка, метеообстановка, спутниковые данные, стереоизображение, ПЗС-линейка, цифровая карта, стереообработка, вычислительный процесс.

### Введение

Одной из важных прикладных гидрометеорологических задач является оперативное определение метеообстановки в заданном регионе по спутниковым данным, включая оценку высоты облачных образований. Для этого в зарубежных космических системах применяется ряд подходов. Первый подход основан на измерении яркости отраженного излучения в определенных диапазонах инфракрасной области спектра, что позволяет косвенно определить высоту облачности с использованием дополнительных данных о коэффициенте ее излучения и вертикальном градиенте температуры [1]. Второй подход предполагает использование активных сенсоров, таких как, например, радар миллиметрового диапазона CloudSat или лидар CALIOP, позволяющих получать вертикальные профили облачности в узкой полосе наблюдения спутника [2].

И, наконец, третий подход расчета высоты облачности, основанный на использовании стереоскопических наблюдений, применяется как для изображений от геостационарных, так и других спутников [3]. Принцип обработки стереоизображений, основанный на базовых геометрических зависимостях и определении на снимках координат одноименных объектов, является единственным методом расчета высоты облачности по данным от пассивных сенсоров, не зависящим от каких-либо дополнительных условий.

В этой связи весьма актуальными являются исследования, связанные с изучением возможности использования информации от запланированного к запуску Российского гидрометеорологического космического аппарата (КА) «Метеор-М» [4] для определения параметров облачности. Одним из приборов дистанционного зондирования, установленных на данном спутнике, является комплекс многозональной сканерной съемки (КМСС). Несмотря на то, что съемочные устройства, входящие в состав КМСС, не разрабатывались для стереоизмерений [5], их конструктивные особенности приводят к тому, что формирование изображений одних и тех же объектов в разных спектральных диапазонах выполняется с временной задержкой и под разными от надира углами. Отсюда возникают вопросы, связанные с

*Исследуется возможность оценки высоты облачности по изображениям от комплекса многозональной сканерной съемки, установленного на космическом аппарате «Метеор-М» №1. Рассматриваются технология и алгоритмы стереообработки видеоданных на современной вычислительной технике.*

исследованием точностных характеристик получаемых оценок высоты облачности стереофотограмметрическими методами и разработкой технологии обработки спектральнозональных изображений с использованием современной вычислительной техники с целью оперативного формирования выходных информационных продуктов.

### Исследование возможности стереообработки данных КМСС

Аппаратура КМСС включает три многозональных съемочных устройства (МСУ): одно МСУ-50 и два МСУ-100, идентичные по принципу функционирования и конструктивным решениям, отличающиеся только фокусным расстоянием объективов. Каждый сканер формирует три спектральнозональных изображения с помощью трех ПЗС-линеек, установленных в фокальной плоскости с небольшим смещением вдоль направления полета КА, что приводит к отклонению от надира плоскости визирования и появлению на изображениях стереоэффекта. Рассмотрим возможность измерения высоты облачности по формируемым первой и третьей ПЗС-линейками изображениям, имеющим наибольшую стереобазу. Для этого представим упрощенную модель съемки (рис. 1), в которой игнорируются вращение Земли и отклонение визирных лучей поперек трассы полета КА, орбита предполагается круговой, а Земля – сферической радиусом  $R$ .

Облачность в точке  $P$  сканируется первой ПЗС-линейкой из точки  $M$  и проецируется на поверхность Земли в точку  $P'$ . Через интервал времени  $\Delta t$  происходит сканирование облачности другой ПЗС-линейкой под углом от надира  $\nu$  и проецируется в точку  $P''$ . Угол между визирным лучом и надиром для первого и третьего каналов камеры МСУ-50 определим из соотношения  $\nu_{M50} = \arctg(a/f_{M50})$ , где  $a = 15.24$  мм – расстояние между соседними ПЗС-линейками в фокальной плоскости,  $f_{M50} = 50$  мм – фокусное расстояние объектива МСУ-50. Поскольку камеры МСУ-100 устанавливаются под углом  $\gamma = 14^\circ$  относительно местной вертикали для увеличения суммарной полосы захвата, сканирование подспутниковой точки выполняется крайними элементами ПЗС-линейки, поэтому

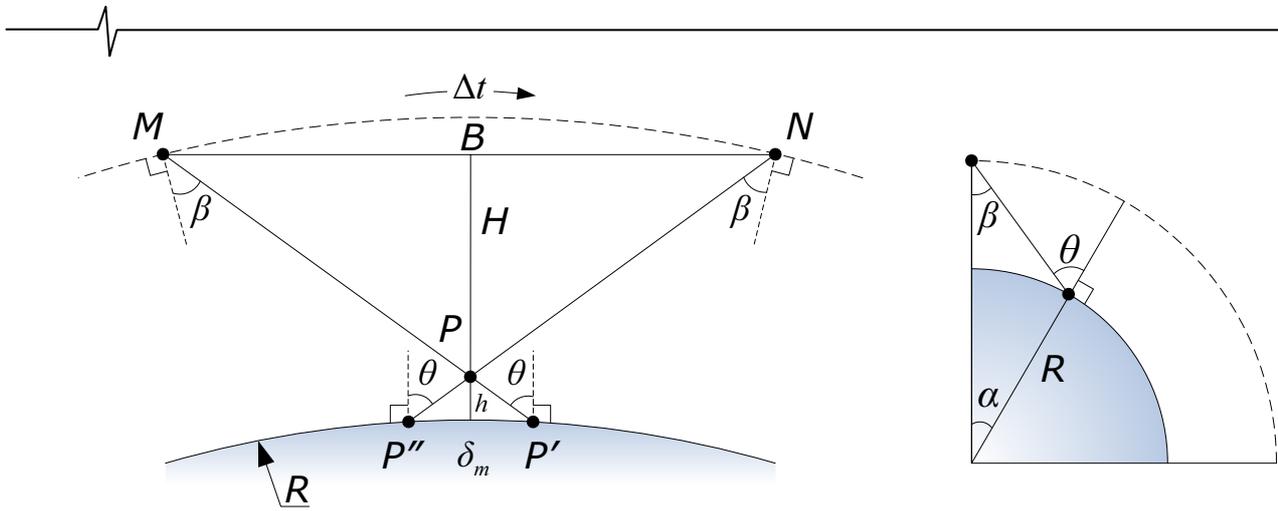


Рис. 1. Геометрия съемки вдоль направления полета спутника

$$\beta_{M100} = \arctg\left(\frac{a}{f_{M100}/\cos\gamma}\right),$$

где  $f_{M100} = 100$  мм – фокусное расстояние объектива МСУ-100.

Тогда с учетом кривизны Земли и высоты полета спутника, равной 832 км, отклонение визирных лучей от зенита на поверхности Земли, которое определяется исходя из соотношения  $\theta = \beta + \alpha$  (рис. 1), составит  $\pm 19.25^\circ$  для МСУ-50 и  $\pm 9.52^\circ$  для МСУ-100.

Так как высота облачности  $h \ll R$ , то линию, соединяющую точки  $P'$  и  $P''$  на поверхности Земли, можно считать прямой. Тогда диспаратность  $\delta_m$ , равная расстоянию  $P'P''$ , пропорциональна высоте  $h$ ,

$$h = \frac{\delta_m}{2\operatorname{tg}\theta} = \frac{\delta_m}{(B/H)},$$

где  $(B/H)$  – отношение базы стереосъемки к высоте.

Оценим точность определения диспаратности  $\sigma_\delta$  по данным КМСС. Погрешность измерения координат одноименных точек  $\sigma_u$  примем равной разрешению снимков, которое составляет 120 м для МСУ-50 и 60 м для МСУ-100. Ожидаемая точность геопривязки изображений составляет порядка 1 пикселя МСУ-100 [5], что приведет к дополнительной погрешности  $\sigma_z = 60$  м для обоих устройств. Таким образом, точность

$\sigma_\delta = \sqrt{\sigma_u^2 + \sigma_z^2}$  равна 134.16 м для МСУ-50 и 84.85 м для МСУ-100.

Погрешность определения высоты  $\sigma_h$ , равная

$$\sigma_h = \frac{\sigma_\delta}{(B/H)},$$

зависит также от отношения базы стереосъемки к высоте, которое максимально для пары изображений первого и третьего каналов и составляет  $(B/H)_{M50} = 0.698$ ,  $(B/H)_{M100} = 0.335$ . В результате получим  $\sigma_h = 192.13$  м для МСУ-50 и  $\sigma_h = 252.99$  м для МСУ-100.

Заметим, что съемка одних и тех же объектов в первом и третьем каналах выполняется с временной задержкой  $\Delta t$ , равной 76.29 с для МСУ-50 и 36.83 с для МСУ-100. Предположим, что облачность движется параллельно поверхности Земли и ее высота не изменя-

ется со временем. Тогда в случае, если скорость движения составляет  $v_m$  вдоль трассы полета КА, это приведет к ошибке измерения диспаратности  $\Delta\delta_m = v_m\Delta t$  и дополнительной погрешности определения высоты  $\sigma_h(v)$ , которая будет линейно зависеть от  $v_m$  и составит порядка 110 м на каждый 1 м/с скорости для обоих устройств. При этом данная ошибка может быть устранена в том случае, если значение  $v_m$  известно из какого-либо другого источника, например, по данным мониторинга с геостационарного спутника [6]. С другой стороны, известно, что скорость движения облачности вдоль меридианов, которая примерно совпадает с трассой движения КА «Метеор-М» с наклоном орбиты  $i = 98^\circ$ , обычно гораздо меньше, чем в направлении параллелей, и составляет в большинстве случаев на много меньше 15 м/с [7], поэтому при оценке погрешности  $\sigma_h(v)$  используем значение  $v_m = 3$  м/с.

Отметим, что скорость облачности  $v_n$  в направлении, перпендикулярном движению КА, можно определить по смещению одноименных точек  $\delta_n$  в соответствующем направлении,  $v_n = \delta_n/\Delta t$ . Отсюда, используя полученную ранее оценку погрешности измерения диспаратности, точность определения скорости  $\sigma_{v_n}$  составит 1.76 м/с для МСУ-50 и 2.30 м/с для МСУ-100.

Сравним точность, достигаемую зарубежными спутниковыми системами определения высоты верхней границы облачности [8], с полученными оценками для аппаратуры КМСС (табл. 1). Точность, которую обеспечивает спектро радиометр MODIS, составляет порядка 1 км для облаков на средней и большой высоте, однако может ухудшаться до 3 км на малых высотах. Погрешность определения высоты аппаратурой стереосъемки MISR достигает 600 м по сравнению с результатами наземных измерений. Таким образом, геометрия съемки МСУ-50/100 позволяет получать более точные оценки высоты облачного покрова, что существенно расширяет область применения информации КМСС. Съёмочное устройство МСУ-50 при большей полосе захвата, составляющей 940 км, обеспечивает более высокую точность определения высоты облачности и больше подходит для оперативной обработки за счет меньшего объема данных по отношению к изображениям МСУ-100.

Таблица 1

| Камера                 | Разрешение, м | $B/H$ | $\Delta t$ , с | $\sigma_h$ , м | $\sigma_h(v)$ , М,<br>при $v_m = 3$ м/с | $\sigma_{v_n}$ , м/с |
|------------------------|---------------|-------|----------------|----------------|---|----------------------|
| МСУ-50<br>(канал 1-3)  | 120           | 0.698 | 76.29          | 192.13         | 327.74                                  | 1.76                 |
| МСУ-100<br>(канал 1-3) | 60            | 0.335 | 36.83          | 252.99         | 329.46                                  | 2.30                 |

### Схема обработки данных КМСС

Схема обработки данных МСУ-50 с целью формирования цифровых карт высот облачного покрова для заданного региона предусматривает последовательное выполнение следующих шагов.

Шаг 1. Задачей первого шага обработки пары спектральных снимков  $I_1(m_1, n_1)$  и  $I_2(m_2, n_2)$ ,  $m_1 = m_2 = 1, M$ ,  $n_1 = n_2 = 1, N$ , является устранение систематических взаимных искажений, обусловленных вращением и кривизной Земли, не стабильностью углов ориентации КА и др. После выполнения этого этапа смещения координат одноименных точек, вызванные высотой облачности  $h$ , будут присутствовать только в кадровом направлении, а строчные смещения обусловлены скоростью движения  $v_n$ . Совместим снимки путем геометрического трансформирования снимка  $I_2$  в плоскость снимка  $I_1$ , используя уравнения геопривязки изображений,

$$I_i : \varphi_i = \Phi_i(\mathbf{R}_i, \mathbf{r}_i, \mathbf{e}, m_i, n_i, f),$$

$$\lambda_i = F_i(\mathbf{R}_i, \mathbf{r}_i, \mathbf{e}, m_i, n_i, f), \quad i = 1, 2,$$

где  $(\varphi_i, \lambda_i)$  – географические координаты пикселя;  $\mathbf{R}_i$  – вектор, задающий орбитальное положение КА в момент формирования пикселя изображения  $I_i(m_i, n_i)$ ;  $\mathbf{r}_i$  – вектор направляющих косинусов соответствующего визирного луча;  $\mathbf{e}$  – вектор параметров земного эллипсоида,  $f$  – строчная частота сканирования прибора.

Тогда уравнения взаимного соответствия снимков можно представить в виде:

$$\begin{cases} m_1 = \Phi_1^{-1}[\Phi_2(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_2, \mathbf{e}, m_2, n_2, f), F_2(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_2, \mathbf{e}, m_2, n_2, f)], \\ n_1 = F_1^{-1}[\Phi_2(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_2, \mathbf{e}, m_2, n_2, f), F_2(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_2, \mathbf{e}, m_2, n_2, f)], \end{cases}$$

где  $\Phi_1^{-1}$ ,  $F_1^{-1}$  – функции обратного геодезического расчета.

На основе полученных уравнений сформируем новое изображение  $I_2^*(m_1, n_1)$ , подлежащее дальнейшей обработке,

$$I_2(m_2, n_2) \xrightarrow[n_1 = F_1^{-1}[\Phi_2(\bullet), F_2(\bullet)]]{m_1 = \Phi_1^{-1}[\Phi_2(\bullet), F_2(\bullet)]} I_2^*(m_1, n_1).$$

Шаг 2. На втором шаге определим взаимные сдвиги одноименных объектов изображений  $I_1(m, n)$  и  $I_2^*(m, n)$  (здесь индексы у переменных  $m$  и  $n$  опущены), которые представим в виде карт диспарантности  $D_m(m, n)$  и  $D_n(m, n)$ ,  $m = 1, M$ ,  $n = 1, N$ , задающих в пикселях смещения в кадровом и строчном направлениях соответственно. Для надежного отождествления используем алгоритм оптимизационного поиска, в соответствии с которым вначале сформируем изображение пространства диспарантности (ИПД)  $C(m, n, d_m, d_n)$ , где  $(d_m, d_n)$  – смещение координат точки  $(m, n)$  на изобра-

жении  $I_1$  относительно изображения  $I_2^*$ . Многомерное ИПД задает цену сопоставления каждого пикселя базового изображения с каждым пикселем подчиненного в некоторой области поиска. Поскольку облачность на спектральных снимках представляется одинаково, то в качестве меры сходства используем нормализованную кросскорреляционную функцию  $K$ ,

$$C(m, n, d_m, d_n) = 1 - K[I_1(m, n), I_2^*(m + d_m, y + d_n)].$$

Затем для нахождения карт  $D_m$ ,  $D_n$  сформулируем задачу минимизации,

$$(D_m, D_n) = \arg \min_{D_m, D_n} E(D_m, D_n),$$

$$E(D_m, D_n) = E_y(D_m, D_n) + E_z(D_m, D_n).$$

Здесь слагаемое  $E_y$  определяет, насколько карты  $D_m$ ,  $D_n$  согласуются с исходными изображениями,

$$E_y(D_m, D_n) = \sum_{m, n} C(m, n, D_m(m, n), D_n(m, n)).$$

Слагаемое  $E_z$  задает требование кусочной гладкости карт  $D_m$ ,  $D_n$ . Для уменьшения вычислительной сложности алгоритма функция  $E_z$  задается зависимой только от разности диспарантностей соседних пикселей,

$$E_z(D_m, D_n) = \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^N \rho(D_m(m, n) - D_m(m+1, n), D_n(m, n) - D_n(m+1, n)) + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N-1} \rho(D_m(m, n) - D_m(m, n+1), D_n(m, n) - D_n(m, n+1)),$$

где  $\rho$  – функция штрафов.

Данная задача является NP-полной, поэтому нахождение глобального минимума  $E$  аппроксимируем с помощью алгоритма полуглобального сопоставления [9], в соответствии с которым выполняется 1D минимизация функции  $E$  с использованием принципа динамического программирования вдоль восьми направлений, задаваемых векторами  $\mathbf{u}_k = (u_{km}, u_{kn})$ ,  $u_{km} \in \{0, \pm 1\}$ ,  $u_{kn} \in \{0, \pm 1\}$ . Цена  $L_k(m, n, d_m, d_n)$  для каждого пикселя вдоль направления  $k$  определяется рекурсивно,

$$L_k(m_j, n_j, d_m, d_n) = C(m_j, n_j, d_m, d_n) +$$

$$+ \min \{ L_k(m_{j-1}, n_{j-1}, d_m, d_n),$$

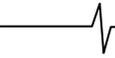
$$L_k(m_{j-1}, n_{j-1}, d_m \pm 1, d_n) + p_1,$$

$$L_k(m_{j-1}, n_{j-1}, d_m, d_n \pm 1) + p'_1, \min_{i, l} L_k(m_{j-1}, n_{j-1}, i, l) + p_2 \},$$

$$m_j = m_1 + (j-1)u_{km}, \quad n_j = n_1 + (j-1)u_{kn},$$

где  $p_1 < p'_1 < p_2$  – штрафы, накладываемые при изменении диспарантности между соседними пикселями.

Полученные для всех направлений цены суммируются, после чего для каждого пикселя выбираются дис-



парантности с минимальной ценой,  

$$S(m, n, d_m, d_n) = \sum_k L_k(m, n, d_m, d_n),$$

$$(D_m(m, n), D_n(m, n)) = \arg \min_{d_m, d_n} S(m, n, d_m, d_n).$$

Шаг 3. На основе карт диспарантностей  $D_m, D_n$  вычислим трехмерные координаты наблюдаемых на снимках  $I_1$  и  $I_2$  объектов. Для этого вначале значения  $(m_1 + D_m(m_1, n_1), n_1 + D_n(m_1, n_1))$  на основе функций обратного геодезического расчета преобразуем в систему координат изображения  $I_2$ ,

$$\begin{aligned} m_1 + D_m(m_1, n_1) & \xrightarrow{m_2 = \Phi_2^{-1} \Phi_1(\cdot), F_1(\cdot)} (m_2, n_2), \\ n_1 + D_n(m_1, n_1) & \xrightarrow{n_2 = F_2^{-1} \Phi_1(\cdot), F_1(\cdot)} \end{aligned}$$

Затем для определения пространственного положения  $\mathbf{P}(X, Y, Z)$  наблюдаемых объектов составим систему векторных уравнений, задающих положение визирных лучей для пикселей  $I_1(m_1, n_1)$  и  $I_2(m_2, n_2)$  в гринвичской геоцентрической системе координат,

$$\begin{cases} \mathbf{P} = \mathbf{r}_1 \rho_1 + \mathbf{R}_1, \\ \mathbf{P} = \mathbf{r}_2 \rho_2 + \mathbf{R}_2. \end{cases}$$

Из-за погрешностей ориентирования снимков, а также движения облачности поперек трассы полета КА, данная система уравнений в общем случае не имеет решения. Поэтому вектор искомым координат  $\mathbf{P}$  определим как среднюю точку кратчайшего отрезка  $\mathbf{P}_1 \mathbf{P}_2$ , соединяющего визирные лучи,

$$\mathbf{r}_0 = \frac{\mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2}{|\mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2|}, \quad \mathbf{R}_0 = \mathbf{R}_2 - \mathbf{R}_1,$$

$$\mathbf{P}_1 = \mathbf{r}_1 [(\mathbf{R}_0 \times \mathbf{r}_2) \cdot \mathbf{r}_0] + \mathbf{R}_1, \quad \mathbf{P}_2 = \mathbf{r}_2 [(\mathbf{R}_0 \times \mathbf{r}_1) \cdot \mathbf{r}_0] + \mathbf{R}_2,$$

$$\mathbf{P} = (\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2) / 2.$$

Кроме того, по длине  $l$  этого отрезка рассчитаем скорость движения  $v_n$  с целью последующей идентификации облачных образований,

$$l = |\mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1|, \quad v_n = l / \Delta t, \quad \Delta t = |m_2 - m_1| / f.$$

Далее осуществим переход от прямоугольных координат  $X, Y, Z$  к географическим  $\varphi, \lambda, h$  с помощью итерационного алгоритма по формулам:

$$\varphi = \arctg \left( \frac{Z + eL \sin \varphi}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right), \quad \lambda = \arctg \frac{Y}{X},$$

$$h = X \sec \lambda \sec \varphi - L,$$

где  $e$  – эксцентриситет эллипсоида,  $L$  – радиус кривизны первого вертикала на широте  $\varphi$ .

В результате выполнения шага 3 для всех идентифицированных одноименных точек на изображениях  $I_1$  и  $I_2$  получим массивы значений высот  $h(\varphi, \lambda)$  и скоростей  $v_n(\varphi, \lambda)$  наблюдаемых объектов.

Шаг 4. На заключительном шаге обработки формируется итоговая карта облачности. Для этого вначале отделим облачность от объектов земной поверхности,

$$h^*(\varphi, \lambda) = \begin{cases} \Delta h(\varphi, \lambda) = h(\varphi, \lambda) - h_{\text{ЦМР}}(\varphi, \lambda), & \text{если } \Delta h(\cdot) \geq 1 \text{ км или } v_n(\varphi, \lambda) \geq 5 \text{ м/с,} \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где  $h_{\text{ЦМР}}(\varphi, \lambda)$  – высота объектов земной поверхности, определяемая по цифровой модели рельефа (ЦМР). Для этой цели достаточно использовать такие доступные на всю территорию земной поверхности ЦМР низкого разрешения (30 угловых секунд,  $\approx 1$  км) как SRTM30 или GTOPO30.

Наконец, сформируем итоговую карту с цветовой легендой,

$$h^*(\varphi, \lambda) = \frac{x=F_x(\varphi, \lambda)}{y=F_y(\varphi, \lambda)} \rightarrow W : \{h^*(x, y)\} \rightarrow w(x, y),$$

где  $F_x, F_y$  – функции картографического проектирования;  $W$  – оператор цветовой кодировки значений  $h$ ;  $w(x, y)$  – итоговая карта облачности.

### Организация вычислительного процесса

Важным вопросом практического использования рассмотренной технологии является организация эффективных вычислений, позволяющих сформировать карту высот облачности  $w(x, y)$  в максимально короткие сроки. Поскольку алгоритм построения карт диспарантностей  $D_m, D_n$  является достаточно трудоемким, то его реализация даже на современной вычислительной технике приводит к многочасовой работе. Поэтому рассмотрим возможность дополнительного сокращения временных затрат с использованием графического процессора (ГП) на примере вычисления нормализованной кросскорреляционной функции  $K$ .

Видеокарты эволюционировали от устройств с жесткой логикой до программируемых процессоров (GPU), позволяющих определять алгоритм их функционирования на отдельных стадиях конвейера обработки графических данных. Это позволило использовать их для выполнения произвольных вычислений общего назначения (general purpose GPU, GPGPU) [10]. В настоящее время ГП значительно превосходят обычные центральные процессоры (ЦП) с точки зрения вычислительной мощности. Например, ядро ГП NVIDIA GeForce GTX280 содержит 480 арифметико-логических устройств и обладает пиковой производительностью 933 GFLOP, в то время как четырехядерный ЦП Intel Core2Quad 3GHz – лишь 96 GFLOP. ГП ориентированы на максимальную пропускную способность программ с большим объемом вычислений и используют явный параллелизм по данным для увеличения производительности и скрытия задержек доступа к памяти. Рассмотренные далее алгоритмы были реализованы с использованием компилятора BrookGPU [11], который абстрагирует многие аспекты программирования графического процессора и является расширением языка C.

Базовая реализация алгоритма, которая предполагает параллельное вычисление значений корреляционной функции для каждого смещения внутри области поиска, включает выполнение нескольких шагов. На первом шаге выполняется подготовка исходных данных – вычисление математического ожидания и среднеквадратического отклонения яркостей эталона на ЦП, загрузка в графическую память исходных изображений, представленных в виде потоков значений с плавающей точкой *float*. На основном этапе работы алгоритма, выполняемом на ГП, формируется выходной поток, каждый элемент которого обрабатывается параллельно ядром (подпрограммой) вычисления корреляционной функции для заданного смещения. Таким образом, на ГП выполняются наиболее трудоемкие операции – расчет значений математиче-

ского ожидания и среднеквадратического отклонения яркостей фрагмента области поиска для заданного смещения, сумма попарных произведений значений сопоставляемых изображений. На заключительном этапе полученные коэффициенты корреляции загружаются в оперативную память компьютера для дальнейшей обработки на ЦП.

На рис. 2 синим цветом показан график ускорения корреляционного алгоритма по сравнению с реализацией на ЦП. Эталонный фрагмент составляет  $32 \times 32$  пикселя, используется область поиска квадратной формы заданного размера. Корреляционный алгоритм на ЦП реализован на ассемблере с использованием команд SSE2, что дает выигрыш примерно в 2.7 раза относительно версии на языке С. Для получения временных характеристик использовалась следующая конфигурация аппаратных средств: ЦП Intel Core2Duo E6750 2.67 ГГц, видеокарта ATI Radeon X1650 XT 256 МБ, объем оперативной памяти (ОП) 3 ГБ.

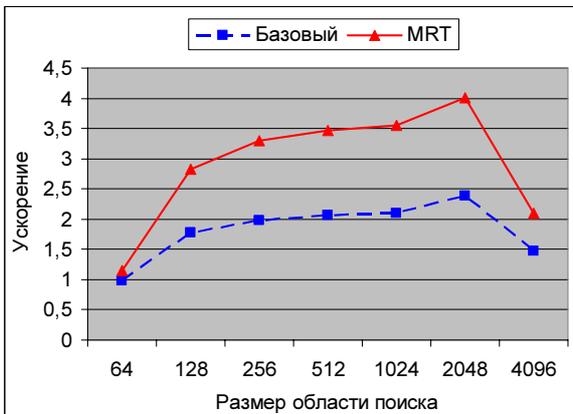


Рис. 2. Результаты ускорения корреляционного алгоритма на графическом процессоре

Низкая производительность при небольшой области поиска объясняется тем, что малый объем входных данных не позволяет эффективно загрузить все вычислительные элементы ГП. Существенное падение скорости для самой большой области поиска вызвано резким увеличении

ем времени считывания коэффициентов корреляции из графической памяти в основную. Это, по всей видимости, связано с тем, что при нормальном режиме функционирования видеокарты результаты обработки предназначены для вывода на экран, а не для передачи в ОП, поэтому такая операция является внештатной.

Для увеличения производительности модифицируем ядро обработки элементов выходного потока для одновременного вычисления коэффициентов корреляции для нескольких соседних пикселей вдоль строки, что позволит уменьшить требования к пропускной способности памяти, а также более эффективно организовать вычисление математического ожидания и среднеквадратического отклонения яркостей фрагментов области поиска. Для этого используем множественные цели рендеринга (multiple render targets, MRT), которые абстрагируются компилятором в виде нескольких выходных потоков. Таким образом, за счет использования ГП удастся повысить быстродействие корреляционного алгоритма до 4 раз. При этом общее время обработки изображений размером  $8000 \times 8000$  пикселей составляет порядка 12 минут, что вполне удовлетворяет потребностям практики.

### Заключение

Выполненный анализ геометрии съемки камерами МСУ-50, МСУ-100 показал принципиальную возможность стереообработки данных КМСС для определения высоты верхней границы облачности. Апробация рассмотренных алгоритмов стереообработки спектрозональных снимков выполнена по обзорным изображениям от КА «Ресурс-ДК», съемочная система которого аналогична КМСС и включает три смещенные в фокальной плоскости ПЗС-линейки. На рис. 3 приведен пример карты высот облачности, полученной по двум спектрозональным снимкам. Карта представляет собой изображение в картографической проекции, на котором присутствуют только облачные образования. Цвет облаков соответствует их высоте согласно легенде. Дальнейшая отработка разработанной технологии будет осуществлена на натурных данных в ходе летных испытаний КА «Метеор-М» №1.

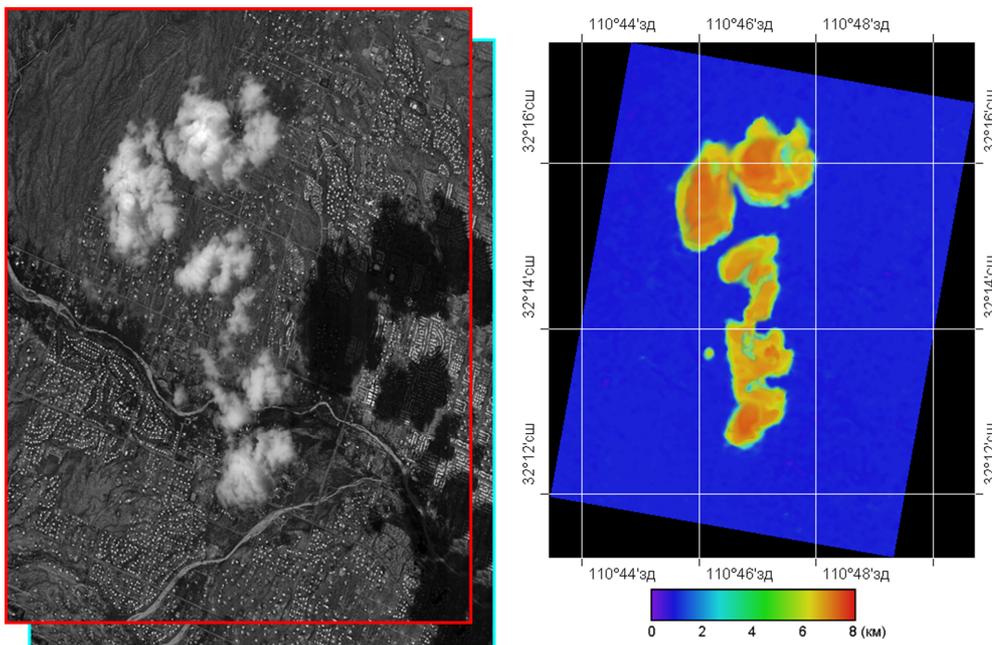


Рис. 3. Пример формирования карты высот облачности

## Литература

1. Nieman S.J., Schmetz J., Menzel W.P. A comparison of several techniques to assign heights to cloud tracers // *J. Appl. Meteorol.*, 1993, 32, С.1559-1568.
2. Kahn B.H., Chahine M.T., Stephens G.L., Mace G.G., Marchand R.T., Wang Z., Barnet C.D., Eldering A., Holz R.E., Kuehn R.E., Vane D.G. Cloud type comparisons of AIRS, CloudSat, and CALIPSO cloud height and amount // *Atmos. Chem. Phys.*, 2008, 8, С.1231-1248.
3. Fujita T. Principle of stereoscopic height computations and their applications to stratospheric cirrus over severe thunderstorms // *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1982, 60, С.355-368.
4. Акопов Г.А., Семенов В.Т., Чуркин А.Л. Задачи, решаемые космическим аппаратом «Метеор-М» по мониторингу Земли и околоземного космического пространства // *Солнечно-земная физика*, 2004, Вып.5. С.40-42.
5. Жуков Б.С., Василейский А.С., Железнов М.М., Жуков С.Б., Бекренев О.В., Пермитина Л.И. Задачи обработки многозональных видеоданных КМСС на КА «Метеор-М» // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. М.: «ООО «Азбука-2000», 2007, Вып.4 Т.1, С.222-228.
6. Seiz G., Tjemkes S. Multiview Cloud-Top Height and Wind Retrieval with Photogrammetric Methods: Application to Meteosat-8 HRV Observations // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2007, 46(8), С.1182-1195.
7. Muller J.P., Denis M.A., Dundas R.D., Mitchell K.L., Naud C., Mannstein H. Stereo cloud-top heights and cloud fraction retrieval from ATSR-2 // *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(9), С.1921-1938.
8. Naud C.M., Muller J.P., Intercomparison of multiple years of MODIS, MISR and radar cloud-top heights // *Annales Geophysicae*, 2005, 23(7), С.2415-2424.
9. Hirschmuller H. Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information // *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2005, 2.
10. Owens J.D., Houston M., Luebke D., Green S., Stone J.E., Phillips J.C. GPU Computing // *Proceedings of the IEEE*, 2008, 96(5), С.879-899.
11. Buck I., Foley T., Horn D., Sugerman J., Fatahalian K., Houston M., Hanrahan P. Brook for GPUs: Stream Computing on Graphics Hardware // *Proceedings of ACM SIGGRAPH*, 2004.

### CLOUD-TOP HEIGHT DETERMINATION FROM MULTISPECTRAL SCANNER IMAGING COMPLEX ONBOARD "METEOR-M"

*Kuznetsov A.E., Poshehonov V.I.*

Possibility of cloud-top height determination from images of multispectral scanner imaging complex onboard "Meteor-M" №1 is investigated. Technology and algorithms of fast stereo processing on modern hardware are considered.

## ПАМЯТИ ПЕТРА ИВАНОВИЧА ЗУДКОВА



Ушел из жизни Петр Иванович Зудков, вице-президент Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова

П.И. Зудков родился 19 августа 1944 года в г. Москве. После окончания средней школы в 1961 году он поступил на физический факультет Московского государственного университета, который успешно закончил в 1967 году по специальности радиофизика.

По окончании Университета работал в НИИ «Полнос». Был главным разработчиком электрооптических затворов для лазерной техники специального применения. В 1977 году П.И. Зудков на VII съезде Всесоюзного научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова был избран заместителем председателя Общества, а в 1991 году после реорганизации Всесоюзного Общества в Российское НТОРЭС им. А.С. Попова - вице-президентом Общества. В общей сложности более 30 лет П.И. Зудков отдал работе в Научно-техническом обществе радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова.

При активном участии П.И. Зудкова, продолжая традиции русских научно-технических обществ, Российское НТОРЭС им. А.С. Попова после трудных 90-х годов прошлого века вновь завоевывает авторитет среди ученых и специалистов как у нас в стране, так и за рубежом. Большой личный вклад П.И. Зудков внес в организацию и проведение, начиная с 1998 года, ежегодной международной конференции и выставки «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA» и издание научно-технического журнала «Цифровая обработка сигналов», выполняя обязанности ответственного редактора.

Душевность, отзывчивость и тактичность по отношению к окружающим снискали ему большое уважение коллег по работе.

Светлая память о нем навсегда сохранится в сердцах всех, кто знал этого замечательного человека, профессионала высокого класса.

*Президиум Центрального совета РНТОРЭС им. А.С. Попова и редколлегия журнала «Цифровая обработка сигналов» выражают глубокое сочувствие семье П.И. Зудкова.*