

О ПРИМЕНЕНИИ СУПЕРКОМПЬЮТЕРОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОТОКОВ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

*«Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга
«АЭРОКОСМОС» Минобрнауки России и РАН, г. Москва
vgbondur@aerocosmos.info*

Введение

Одной из наиболее быстро развивающихся областей деятельности, связанной с использованием изображений, является дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ). Аэрокосмические данные применяются в интересах исследования и рационального использования природных ресурсов, охраны окружающей среды, предупреждения и ликвидации последствий природных катастроф и техногенных аварий, метеорологии и климатологии, лесного и сельского хозяйства, транспорта, городского планирования, картографии, а также в интересах фундаментальных наук о Земле.

В настоящее время около 50 стран мира разрабатывают и изготавливают космические средства, а результатами космической деятельности пользуются около 150 стран. Огромное количество потребителей применяют изображения, полученные с борта воздушных носителей (самолеты, вертолеты, дельтапланы, беспилотные летательные аппараты, аэростаты и др.).

Для эффективного использования больших объемов информации, поступающей при аэрокосмическом мониторинге, требуется разработка и применение эффективных методов, технологий, программных и высокопроизводительных технических средств обработки изображений.

Объемы информации, формируемые при аэрокосмическом мониторинге

При космическом мониторинге наиболее часто используются оптические (панхроматические (ПАН), многоспектральные (МСИ) и гиперспектральные), а также радиолокационные изображения (РЛИ) различного пространственного разрешения: сверхвысокого и высокого (0,4–7,0 м); среднего (7,0–50,0 м); низкого (50,0–1100 м).

Изображения сверхвысокого и высокого разрешения формируются такими космическими аппаратами (КА) с оптической аппаратурой, как Ресурс-ДК, Ресурс-П (Россия), GeoEye, QuickBird, WorldView-1,2, Ikonos (США), европейскими КА RapidEye, Spot-5 (детальный режим) и

др., а также радиолокационными КА – TerraSAR-X, TanDEM-X, CosmoSkyMed (Европейское космическое агентство), канадским спутником Radarsat-2 (детальный режим). К спутникам, формирующим изображения среднего разрешения, можно отнести КА с оптической аппаратурой типа Landsat (США), японский спутник ALOS (аппаратура AVNIR-2, PRIZM), французский КА Spot-5 (обзорный режим) и др.; а также радиолокационные КА типа Radarsat-1 (Канада), японский спутник ALOS (аппаратура PALSAR) и др. Обзорные изображения низкого разрешения формируют оптические КА типа МЕТЕОР-М (Россия), американские спутники AQUA, TERRA, Suomi NPP, оборудованные аппаратурой MODIS, американские метеорологические спутники NOAA (аппаратура AVHRR), а также европейский радиолокационный КА CosmoSkyMed и канадский спутник Radarsat-1 (обзорный режим).

Полосы захвата в процессе космической съемки могут составлять от десятков (средства высокого и сверхвысокого разрешения) до тысяч (обзорные средства) километров.

Объем информации для одного многоспектрального изображения:

$$I = \frac{N_1}{R_1} \cdot \frac{N_2}{R_2} \cdot r \cdot n, \quad (1)$$

где N_1, N_2 – размеры сцены вдоль и поперек трассы, м;

R_1, R_2 – пространственное разрешение вдоль и поперек трассы, м;

r – радиометрическое разрешение, бит;

n – число спектральных каналов.

Например, для одного многоспектрального изображения, полученного со спутника WorldView-2, ($N_1=N_2=20$ км, $R_1 = R_2 = 2$ м; $r = 11$ бит, $n = 8$), объем информации, вычисленный из (1), составит $I \approx 1.1$ ГБ.

Примерные объемы одной стандартной сцены для различных космических изображений приведены в колонке 3 Таблицы 1.

Объемы информации для различных одиночных космических изображений, а также потоков изображений, формируемых при мониторинге, и результатов их обработки.

Таблица 1.

Разре-шение	Тип изо-бражений	Объемы информации			
		Одиночные изо-бражения, ГБ	При мони-торинге, ГБ	Результаты обработки, МБ	
				Растровые	Векторные
1	2	3	4	5	6
Высо-кое	ПАН МСИ РЛИ	0.5–2	50...100	1–100	0.1–5
		0.4–1			
		1–2			
Среднее	ПАН	0.2–0.4	70...120	1–100	0.1–5

	МСИ РЛИ	0.3–1 0.5–1			
Низкое	МСИ РЛИ	0.5–1 0.25–1	100...150	1–100	0.1–5

При мониторинге используются, как правило, не одиночные изображения, а потоки изображений, поступающих через определенные интервалы времени для всей контролируемой территории. Например, система оперативного космического мониторинга пожаров НИИ «Аэрокосмос» использует данные с обзорных многоспектральных приборов MODIS (спутники TERRA, AQUA), AVHRR (спутники NOAA), МСУ-МР (спутник МЕТЕОР-М), а также данные высокого и среднего разрешения (спутники RapidEye, Landsat и др.) [Бондур, 2011, Bondur, 2010]. Объем одного изображения MODIS (36 каналов, разрешение 250 м, 500 м, 1000 м), составляет ~ 1 ГБ, а объем одного изображения AVHRR (5 каналов, разрешение 1100 м) и МСУ-МР (6 каналов, разрешение ~ 1100 м) составляет ~ 100 МБ. Территория России и близлежащих стран полностью покрывается 7-ю такими изображениями. Периодичность получения данных с помощью системы «Аэрокосмос» достигает 25 раз в сутки. При этом поток исходной обзорной космической информации составит около 120 ГБ в сутки. Кроме этого для мониторинга последствий пожаров и оценки эмиссий вредных газов в атмосферу используются данные среднего и высокого разрешения, объем которых может достигать ~ 100 ГБ в сутки. Суммарный объем потоков данных, получаемых при оперативном космическом мониторинге для обнаружения и оценки последствий пожаров на территории Российской Федерации, достигает ~ 220 ГБ в сутки. Близкий объем космических данных (~ 280 ГБ в сутки) формируется государственной территориально-распределенной системой космического мониторинга Росгидромета. Подобные объемы информации формируются и другими спутниковыми, а также воздушными системами мониторинга.

Объемы различных типов данных, формируемых при космическом мониторинге, приведены в колонке 4 Таблицы 1. В колонках 5 и 6 этой таблицы приведены объемы результатов обработки в растровой и векторной форме.

Особенности обработки аэрокосмических изображений

При обработке аэрокосмических изображений выполняется ряд этапов, основными из которых являются:

1. Предварительная обработка, включающая синтез изображений из радиоголограмм (для радиолокационных систем с синтезированием апертуры); радиометрическую коррекцию (устранение искажений за счет неравномерности чувствительности элементов детекторов, учет

влияния атмосферы; геометрическую коррекцию (устранение сдвига, учет кривизны земли; особенностей ландшафта); географическая привязка;

2. Повышение качества изображений, включая: синтез цветных и псевдоцветных изображений из канальных изображений; контрастирование; фильтрацию с использованием различных фильтров; подчеркивание границ; совмещение панхроматических и многоспектральных изображений и т.п.;

3. Тематическая обработка: классификация изображений (контролируемая, неконтролируемая) на основе различных подходов: детерминированного, непрерывно-группового, синтаксического, статического, нечеткого, нейрокомпьютерного, а также обнаружение изменений в изображениях.

4. Интерпретация изображений, заключающаяся в выявлении признаков; символическом представлении результатов; семантической интерпретации и др.;

5. Формирование временных рядов тематически сегментированных изображений.

6. Сопоставление результатов обработки разновременных и разнотипных изображений и экспорт их в ГИС.

7. Анализ результатов обработки и формирование обоснованных рекомендаций для принятия решений.

В настоящее время существует ряд программных комплексов, предназначенных для обработки изображений, разработанных различными организациями, основными из которых являются: ENVI (EXELIS); ERDAS ErMapper, ERDAS Imaging (Intergraph, ERDAS); GEOMATICA (PCI Geomatics); Аспект-Стат, Шелл, Мультикласс, Дин-класс (НИИ «Аэрокосмос»); Сканмэджик, ScanEx Image Processor (НТЦ СканЭкс). Это программное обеспечение функционирует на различных вычислительных средствах с использованием различных операционных систем. Для повышения эффективности аэрокосмического мониторинга требуется развитие существующих и разработка новых программных и технических средств обработки данных, прежде всего, с целью автоматизации, повышения достоверности и быстродействия. Особо важную роль для достижения этих целей играет выбор и применение соответствующих вычислительных средств.

Выбор вычислительных ресурсов для обработки потоков аэрокосмических изображений

Процессы обработки данных, формируемых при дистанционном мониторинге, сводятся к выполнению ряда математических операций над цифровыми изображениями. Наиболее трудоемкими при такой об-

работке являются операции предварительной обработки растровых цифровых массивов (например, синтез радиолокационных изображений (РЛИ) из радиоголограмм), а также операции типа двумерного быстрого преобразования Фурье (БПФ), являющегося одной из базовых при обработке и классификации изображений. Оценку необходимой производительности ЭВМ проведем на примере этих операций.

На рис. 1 приведены результаты тестов, выполненные с использованием различных библиотечных функции БПФ на одном процессоре Pentium 4, 3.6 ГГц, характеризующие скорость V (Mflops) выполнения двумерного БПФ, нормированную на число пикселей изображения N , в зависимости от размера изображения (не равного степени 2) (<http://www.fftw.org>). Приведенные результаты получены для данных с плавающей точкой.

Как видно из рис. 1, при выполнении БПФ производительность растет с увеличением числа процессоров, однако этот рост различен для различных алгоритмов. Причем относительный прирост производительности при больших размерах изображений заметно отстает от относительного числа задействованных процессорных ядер.

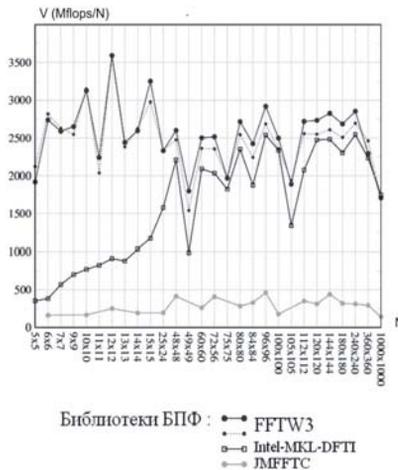


Рис. 1 Скорость выполнения 2-мерного БПФ (нормированная на размер изображений N) в зависимости от размера изображения

Для оценки масштабируемости БПФ при распараллеливании можно использовать оценки, приведенные на рис. 2, которые получены в [<http://numbercrunch.de/blog/2010/03/parallel-fft-performance/>].

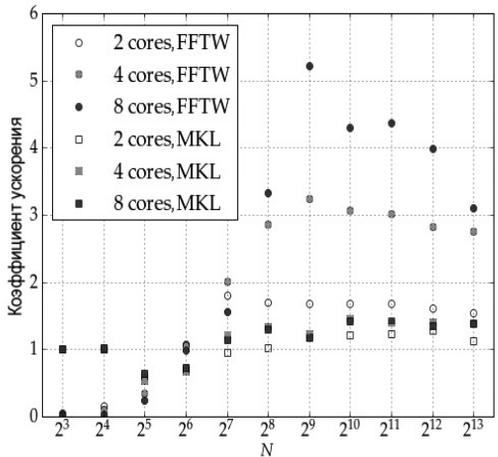


Рис. 2 Оценка масштабируемости производительности 2-мерного БПФ на различных многоядерных процессорах

Примеры оценки производительности БПФ приведены для космического изображения размером 40000x40000 пикселей, что соответствует полосе обзора 16 км при разрешении 0.4 м.

Время выполнения двумерного БПФ оценивается по формуле:

$$t = 5 N \log_2(N) / V \quad (1),$$

где, N – число пикселей в изображении (произведение числа пикселей по его сторонам).

Время БПФ одного изображения на одном процессоре Pentium 4, 3.6 ГГц, оцененное по формуле (1) составляет ~160 с. В Таблице 2 приведены результаты тестов по определению времени, необходимого для выполнения БПФ, полученные на суперкомпьютере BlueGene/P (МГУ), а также оценки, полученные для суперкомпьютеров «Ломоносов» (МГУ) и компактных супер-ЭВМ ВНИИЭФ.

Время выполнения БПФ для изображения 40000x40000 пикселей на различных суперкомпьютерах.

Таблица 2.

Суперкомпьютер, производительность	Число процессоров/ядер	Время на выполнение БПФ, с
«Ломоносов», МГУ, 1373 Tflops	2048 / 33072	< 0.1
IBM Blue Gene/P, МГУ (2 x 1024 четырех-ядерных вычислительных узлов), 27,9 Tflops	128 / 512	6.5
	256 / 1024	3.4
	512 / 2048	1.6
ВНИИЭФ – 5 Tflops	41 / 164	7
ВНИИЭФ – 1.1 Tflops	36 / 144	25

При обработке потоков изображений и каналов мультиспектрального изображения время, расходуемое на БПФ, возрастает пропорционально числу обрабатываемых изображений (каналов). Например, для обработки 10 изображений с использованием суперкомпьютера IBM Blue Gene/P потребуется 16 с. Суперкомпьютер «Ломоносов» (МГУ) обработает те же каналы менее чем за 1 с.

При синтезе радарных изображений процесс обработки радиолокационного сигнала $U_{рли}$ в одном канале дальности можно описать выражением:

$$U_{рли}(k) = \left| \sum_{n=1}^{N_n} \dot{U}(k+n) \times \dot{h}(n) \right|, \quad (3)$$

где

$\dot{U} = Ug(k) + jUm(k)$, – цифровой комплексный сигнал;

k – номер отсчета сигнала вдоль линии пути;

$\dot{h}_{(n)} = h_g(n) + j \cdot h_m(n)$ – цифровая комплексная опорная функция;

N_n – количество отсчетов за время синтезирования.

Как видно из формулы (3), процедура обработки радиолокационного сигнала состоит в перемножении двух комплексных чисел и суммировании результатов умножения. Такая обработка потребует порядка $2 \cdot N_n$ операций с комплексными числами, то есть всего $\sim 4 \cdot N_n$ элементарных операций для чисел с плавающей точкой.

Для синтеза радиолокационной сцены потребуется провести расчёты для каждого пикселя. Число операций для этой процедуры составит:

$$K = 4 \cdot N_n \cdot N_x \cdot N_y, \quad (4)$$

где N_x и N_y – размеры радиолокационной сцены.

Для современных радиолокаторов количество отсчётов за время синтезирования (N_n) составляет величину, приблизительно равную $\sim 10^3$, а типовые размеры сцен $\sim 10^4 \times 10^4$ пикселей. Таким образом, согласно (4) для синтезирования такой сцены необходимо произвести $K = 4 \cdot 10^{11}$ операций. Можно предположить, что при развитии радиолокационных средств для синтезирования одной радиолокационной сцены в ближайшем будущем потребуется 10^{12} операций.

В ходе обработки производятся и другие операции, требующие существенных затрат компьютерного времени (трансформирование, калибровка, фильтрация, сегментация и др.). Общее число операций при обработке радиолокационного изображения можно оценить как $\sim 5 \cdot K$. Отметим, что основные алгоритмы обработки загружают процессоры ЭВМ менее чем на 50 %, а часть ресурсов ЭВМ будет занята операционной системой. Кроме того, помимо расчётных операций, выполняются операции записи и считывания исходных файлов, присвоения значений переменных, ввода и вывода служебной информации и др., которые требуют сопоставимых затрат компьютерного времени. С учётом приведенных количественных показателей обработка одной радиолокационной сцены будет эквивалентна выполнению $2 \cdot (5/0.5) \cdot 10^{12} = 2 \cdot 10^{13}$ вычислительных операций. При обработке потоков изображений, формируемых в процессе аэрокосмического мониторинга, можно ожидать, что одновременно могут обрабатываться не менее 5 изображений.

В Таблице 3 приводятся оценки временных затрат на выполнение этой задачи с использованием различных ЭВМ.

Для обработки 100 изображений с использованием компактных супер-ЭВМ потребуется от 6,7 до 33,3 минут.

*Оценка временных затрат на обработку 5-ти изображений
с использованием различных ЭВМ.*

Таблица 3.

Класс ЭВМ	Производительность	Число операций	Временные затраты, с
Настольные ПК	10 Gflops	$5 \cdot 2 \cdot 10^{13} = 10^{14}$ (операций с плавающей точкой)	$10^{14} / (0,01 \cdot 10^{12}) = 10000$
	50 Gflops		$10^{14} / (0,05 \cdot 10^{12}) = 2000$
Компактные супер-ЭВМ	1 Tflops		$10^{14} / 10^{12} = 100$
	5 Tflops		$10^{14} / (5 \cdot 10^{12}) \sim 20$

При оценке временных затрат на обработку изображений необходимо иметь в виду, что с увеличением производительности ЭВМ невозможно добиться их пропорционального снижения. Поэтому приведенные данные являются пиковыми.

Таким образом, выполненные оценки свидетельствуют о необходимости и возможности использования суперкомпьютеров для обработки потоков космических изображений, формируемых при аэрокосмическом мониторинге для решения различных задач.

Литература

1. Бондур В.Г. Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары 2010 г. // Исследование Земли из космоса, 2011, № 3, с. 3-13+6 с. цв. вклеек.
2. Valery G. Bondur, Importance of Aerospace Remote Sensing Approach to the Monitoring of Nature Fire in Russia // International Forest Fire News (IFFN) No. 40 (July-December 2010), p. 43–57.
3. <http://www.fft.w.org>
4. <http://numbercrunch.de/blog/2010/03/parallel-fft-performance/>