

УДК 004.932.2

ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МНОГОСЕРВЕРНОЙ ОБРАБОТКОЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ БОЛЬШОГО ОБЪЕМА ОТ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ

*Кузнецов А.Е., д.т.н., профессор, зам. директора НИИ «Фотон» РГРТУ, e-mail: foton@rsreu.ru;
Рыжиков А.С., м.н.с НИИ «Фотон» РГРТУ; e-mail: foton@rsreu.ru.*

MULTISERVER PROCESSING SOFTWARE MANAGEMENT FOR LARGE-SCALE REMOTE SENSING IMAGERY

Kuznechov A.E., Ryzhikov A.S.

In recent years, the requirements for the efficiency of the remote sensing products formation have become more stringent. In this regard, the topical problem is the effective software organization of multi-server parallel processing of large-volume images from space observation systems of the Earth. The Hadoop technology is shown in the article to be inappropriate for solving the problem. A solution which provides an efficient organization of multi-server parallel processing of remote sensing data has been proposed.

Key words: distributed processing, remote sensing, Hadoop, MapReduce.

Ключевые слова: распределенная обработка, дистанционное зондирование Земли, Hadoop, MapReduce.

Введение

Общемировая тенденция развития систем ДЗЗ высокого пространственного разрешения связана с повышением детальности и оперативности получения информации о наблюдаемых территориях. Это, в свою очередь, приводит к увеличению объемов передаваемой на приемные центры информации и ужесточению требований к скорости ее обработки. Поэтому в настоящее время для получения выходных информационных продуктов стандартных уровней применяются серверные кластеры. Для сокращения временных затрат осуществляется распределение маршрутов съемки по серверам и их параллельная обработка. Такое решение оказывается весьма эффективным для маршрутов длительностью 10-15 секунд и объемом 15-20 Гбайт. Однако для маршрутов съемки длительностью порядка 100 секунд и более и объемом 200-300 Гбайт вычислительных ресурсов одного сервера оказывается недостаточно и временные затраты на получение выходной продукции становятся значительными. Выходом из этой ситуации является организация распределенной обработки фрагментов одного маршрута съемки на нескольких серверах. При этом добиться близкого к линейному снижения временных затрат оказывается сложно, поскольку требуется минимизировать накладные расходы, возникающие при межсерверном обмене данными, необходимыми для обработки каждого фрагмента исходного маршрута съемки. В связи с этим целью работы является анализ известных программных решений по организации многосерверной обработки, выбор и обоснование наиболее эффективного подхода.

Организация многосерверной обработки

Процесс обработки маршрута съемки, представленного многозональным изображением $I_i(m, n)$, где i –

В последние годы ужесточаются требования к оперативности формирования продуктов ДЗЗ. В связи с этим актуальна задача эффективной программной организации многосерверной параллельной обработки изображений большого объема от систем космического наблюдения Земли. В работе показано, что технология Hadoop не подходит для решения поставленной задачи. Предложено решение, обеспечивающее эффективную организацию многосерверной параллельной обработки данных ДЗЗ.

номер спектральной зоны, и вектором входных параметров \bar{u} , связан с последовательным выполнением определенных технологических операций T_j , где j – идентификатор вида обработки [1]. Укрупненную модель получения изображения выходного информационного продукта $D_i(x, y)$ представим в виде

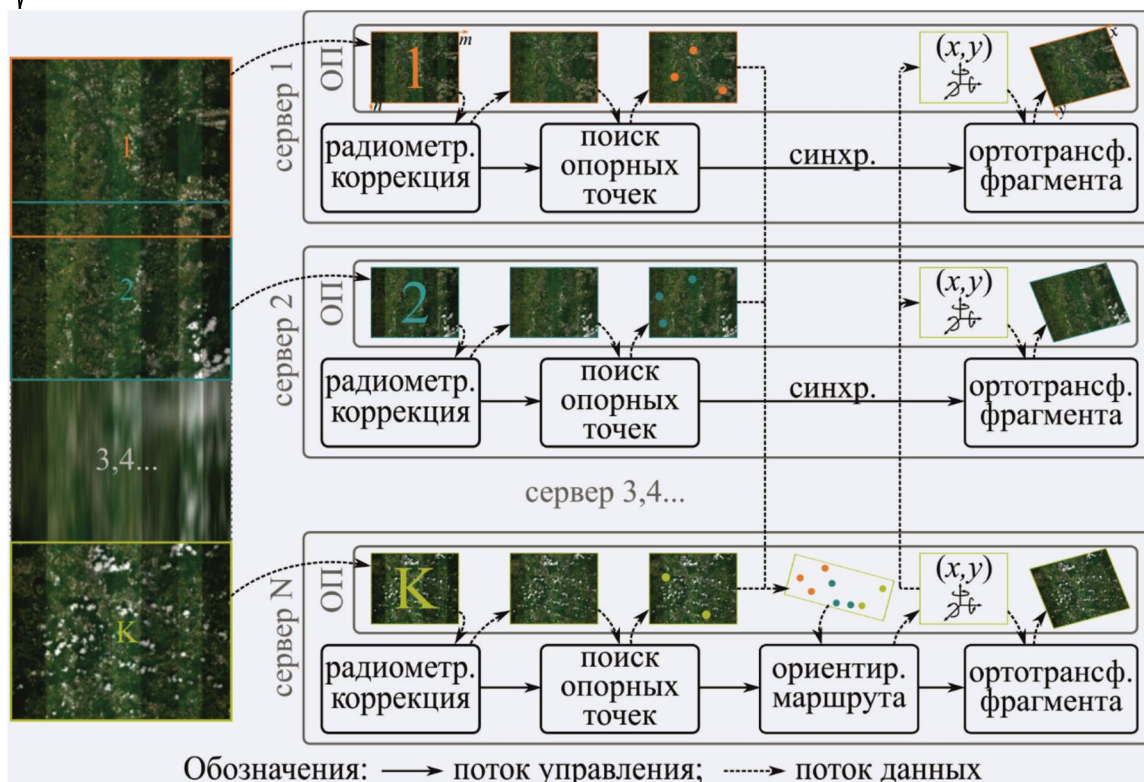
$$D_i(x, y) = T_k[T_g[T_{отм}[T_p(I_i(m, n), \bar{u})]]],$$

где индекс k обозначает операцию ортотрансформирования в картографическую проекцию, g – геодезическое ориентирование, $отм$ – поиск опорных точек, p – радиометрическую коррекцию.

В этой модели операция T_p связана с поэлементным яркостным преобразованием исходного изображения $I_i(m, n)$ и может выполняться как для всего маршрута съемки, так и для отдельных его фрагментов. Т.е. при ее выполнении достаточно распараллеливания вычислительного процесса.

Операция поиска опорных и одноименных точек $T_{отм}$ предназначена для подготовки исходных данных для операции геодезического, межматричного и межзонального ориентирования [1]. Она так же может выполняться параллельно для каждого фрагмента исходного изображения $I_i(m, n)$.

Операция геодезического ориентирования T_g связана с уточнением по опорным и одноименным точкам элементов внешнего ориентирования, описываемых вектором \bar{u} . В результате выполнения этой операции гарантируется высокоточное совмещение спектральнозональных



Обозначения: —→ поток управления; - - - -> поток данных

Рис. 1. Схема многосерверной обработки фрагментированного изображения

изображений $D_i(x, y)$. При выполнении этой операции для каждого фрагмента исходного изображения по своим исходным данным фрагменты выходного изображения $D_i(x, y)$ не будут совмещаться между собой с субпиксельной точностью. Т.е. операция T_2 не распараллеливается.

Операция трансформирования в картографическую проекцию T_x допускает независимую обработку каждого фрагмента по уточненным значениям вектора \vec{u} .

Схема распределенной обработки изображения маршрута съемки с учетом рассмотренных выше ограничений приведена на рис. 1. На этой схеме, в частности, показано, что геодезическое ориентирование маршрута съемки выполняется с привлечением опорных точек, найденных независимо на всех фрагментах, а параметры ориентирования далее распространяются на все сервера. Время выполнения геодезического ориентирования не зависит от протяженности маршрута, поэтому при организации многосерверной обработки по этой схеме достижимо ускорение обработки изображения, близкое к линейному. Для достижения максимального быстродействия основной задачей программной реализации является минимизация накладных расходов на межсерверное взаимодействие.

Программная реализация многосерверной обработки. В работах [2, 3] предлагается использовать Apache Hadoop реализацию парадигмы MapReduce в качестве основы для построения распределенной многосерверной обработки изображений. Анализ этих работ позволил выявить три особенности.

Первое. Входные и выходные данные, промежуточные результаты хранятся в файловой системе HDFS на накопителях. Это удобное свойство для задач, связан-

ных с обработкой сверхбольших (десятки ТБ) объемов слабо структурированных данных, на которые Hadoop изначально ориентирован. Однако объем спутниковых изображений высокого разрешения редко превышает 100 Гб. Фрагменты таких изображений целесообразно обрабатывать с применением парадигмы резидентных вычислений, обращаясь только к данным в оперативной памяти, однако Hadoop не предоставляет такую возможность. Избыточные операции ввода/вывода в HDFS приводят к существенным временным затратам.

Второе. Hadoop предлагает API на языке Java, в то время как промышленная разработка современных вычислительно сложных приложений ведется на сравнительно низкоуровневых языках, таких как C, C++, Rust. Наличие сборщика мусора и виртуальной машины в Java создает труднопреодолимые ограничения для эффективной реализации вычислительных задач на этом языке. Интерфейс Hadoop Streaming позволяет интегрировать в Hadoop программы, написанные на любом языке. Но его использование связано с накладными расходами на конвертацию данных и их передачу между процессами.

Третье. Экосистема Hadoop содержит множество разнообразных абстракций и инструментов, ускоряющих разработку и отладку распределенных приложений. Однако почти все они ориентированы на обработку текстов. Готовых инструментов для загрузки, фрагментирования и доступа к данным изображений нет.

Для оценки степени влияния первых двух особенностей на производительность обработки на основе Hadoop Streaming было создано экспериментальное приложение, выполняющее загрузку изображения в HDFS, его разбиение на перекрывающиеся фрагменты, поворот каждого фрагмента на фиксированный угол и

объединение результатов в единый растр. Затраты времени на операции ввода-вывода составили около 60% всего времени работы, примерно 40% из которых пришлось на операцию объединения. При этом реализация объединения (reduce) нетривиальна, т.к. HDFS не поддерживает запись в произвольное место выходного файла.

В связи с выделенными недостатками для управления распределенной обработкой фрагментированного маршрута предлагается использовать специализированное программное решение на языке C++.

Для исключения избыточных операций ввода-вывода обеспечим на каждом сервере прямую запись входных фрагментов изображений в ОП минуя жесткий диск; хранение промежуточных данных в ОП. Для организации взаимодействия согласно схеме, приведенной на рис. 1, реализуем упрощенную модель MapReduce.

Структурно предлагаемое решение состоит из нескольких программных компонент, представленных на рис. 2.

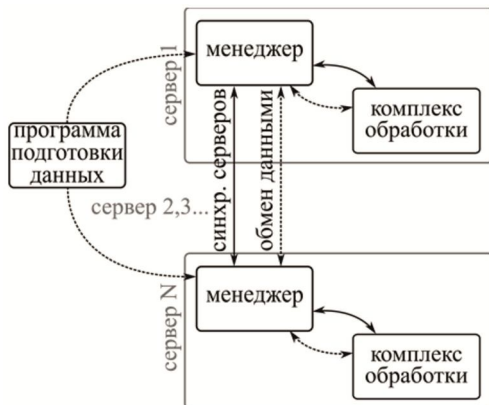


Рис. 2. Схема взаимодействия программ при распределенной работе

Программа подготовки исходных данных выполняет распаковку и декомпозицию непрерывного изображения маршрута съемки на перекрывающиеся фрагменты. Эта программа помещает сформированные фрагменты в ФС Серн, хранящую данные в ОП кластера серверов. Менеджер обеспечивает управление работой комплекса обработки, межсерверный обмен данными, синхронизацию этапов обработки на разных серверах и оповещение о текущем прогрессе. Менеджер передает между серверами только необходимую для их совместной работы информацию – опорные точки, результаты ориентирования и служебную информацию, включающую квитанции синхронизации. Суммарно объем передаваемого менеджером трафика не превышает 20 Мб при объеме маршрута 40 Гб.

Комплекс обработки, реализованный на языке C++, работает под управлением менеджера и реализует алгоритмы обработки изображений маршрута для каждого этапа. Комплекс имеет прямой доступ к фрагменту изображения и промежуточным результатам, в т.ч. самостоятельно выполняет их аллокацию, что позволяет при необходимости задать требуемое выравнивание для векторных операций AVX(параллелизм на уровне данных), обеспечить DMA (прямой доступ к памяти) доступ при использовании графических ускорителей (CUDA) и т.п. без создания дополнительных копий.

Менеджер обработки

Для повышения быстродействия программа подготовки исходных данных выделяет из входного потока фрагменты на обработку, не дожидаясь его окончания. Поэтому в момент начала обработки первого фрагмента неизвестно, сколько всего фрагментов будет передано в обработку и сколько серверов будет задействовано. Эта информация появляется лишь после исчерпания входного потока и выдачи последнего фрагмента. В связи с этим менеджер обработки реализован в виде унифицированной программы, без выделения клиентской и серверной части и установлен на каждом сервере. Каждый менеджер анализирует сопровождающую информацию обрабатываемого фрагмента маршрута. Если фрагмент является последним, менеджер переходит в режим координатора. Все остальные менеджеры получают роль клиентов. Менеджеры-клиенты обеспечивают поэтапную обработку каждый своего фрагмента, передачу найденных опорных точек координатору и ожидание от него результатов ориентирования. Координатор также обрабатывает один фрагмент изображения (последний), но дополнительно реализует сбор опорных точек, выполнение этапа ориентирования и выдачу результатов менеджерам-клиентам.

На рис. 3 приведена диаграмма, иллюстрирующая последовательность выполнения этапов обработки. Синхронизация серверов выполняется только при ориентировании, что позволяет амортизировать возможную разницу во времени выполнения предшествующих этапов.

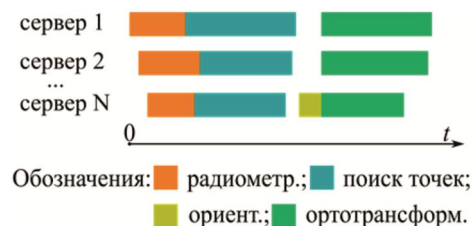
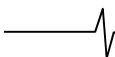


Рис. 3. Диаграмма последовательности выполнения этапов обработки

В реализованном на данный момент прототипе синхронизация реализована на основе файлов-квитанций в ФС Серн. После завершения выполнения k -ого этапа менеджер-клиент помещает в разделяемую папку Серн файл-квитанцию с уникальным именем, включающим имя этапа и номер обрабатываемого фрагмента. В случае, если при обработке возникла ошибка, в этот файл помещаются сведения об ошибке. Менеджер-координатор ожидает появления всех квитанций, свидетельствующих об успешном завершении выполнения k -го этапа, выполняет $k+1$ -й и создает квитанцию, разрешающую клиентам запуск следующего этапа. Если хотя бы одна квитанция содержит информацию о критической ошибке, аналогичным способом координатор сигнализирует о прерывании обработки и возвращает код ошибки управляющей программе.

Синхронизация на основе квитанций просто реализуется, обеспечивает корректное совместное функционирование менеджеров обработки, но вероятно не является оптимальным решением с точки зрения быстродействия. В будущем планируется заменить файлы-кви-



танции на асинхронный опрос координатора посредством REST API.

Заключение

В предложенном программном решении отсутствует ввод-вывод с использованием дисковых накопителей. В отличие от Hadoop MapReduce, исходные фрагменты маршрута помещаются в ФС, построенную на базе ОП, после чего передается на сервер обработки и загружаются в ОП. Создаваемые далее в процессе обработки промежуточные изображения хранятся только в ОП сервера, обрабатывающего данный фрагмент и не передаются по сети на другие машины. Анализ результатов работы описанного ранее экспериментального приложения, реализованного в виде комплекса обработки в рамках предложенного решения, показал, что накладные расходы на межсерверное взаимодействие составили менее 7 % общего времени работы. При этом объем кодовой базы менеджера обработки на несколько порядков меньше объема исходного кода Hadoop, и как следствие, проще в поддержке и сопровождении.

Рассмотренное в статье программное решение по

организации многосерверной обработки маршрутов съемки большого объема является составной частью специального программного обеспечения обработки информации от спутников серии «Ресурс-П», «Ресурс-ПМ», РБКА и других систем ДЗЗ.

Литература

1. Р.Н. Ахметов, И.И. Зинина, А.А. Юдаков, В.В. Еремеев, А.Е. Кузнецов, В.И. Пошехонов, О.А. Пресняков, П.Н. Светелкин. Точностные характеристики выходной продукции высокого разрешения КА «Ресурс-П» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 41–47.

2. Almeer, M.H. Cloud Hadoop Map Reduce For Remote Sensing Image Analysis / M.H. Almeer // J. of Emerging Trends in Computing and Information Sciences. – 2012. – Vol. 3, no.4, pp. 637-644.

3. Wiley, K. Astronomical Image Processing with Hadoop / K. Wiley, A. Connolly, S. Krughoff, J. Gardner, M. Balazinska, B. Howe, Y. Kwon, Y. Bu // Astronomical Data Analysis Software and Systems XX. ASP Conference Proceedings. – 2010. – Vol. 442, pp. 93-98.

Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас принять участие в формировании тематических выпусков журнала «Цифровая обработка сигналов» и размещению рекламы продукции (услуг) Вашей организации на его страницах. В случае положительного решения просим представить в редакцию журнала Ваши предложения по плановому размещению информационных материалов и макет рекламы продукции (услуг) с указанием желаемого её месторасположения: обложка (2-я, 3-я или 4-я стр.), цветная внутренняя полоса (объем полосы).

Журнал «Цифровая обработка сигналов» издается с 1999 года. Выходит ежеквартально, тиражом – 250 экз. Распространяется по подписке через агентство «Роспечать» в России (индекс 82185), СНГ и странах Балтии (индекс 20630), а также на Конференции: «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA».

Научно-технический журнал «Цифровая обработка сигналов» включен в Перечень изданий, рекомендуемый ВАК РФ для публикации результатов научных исследований соискателями ученой степени доктора и кандидата технических наук в области радиотехники, связи, вычислительной техники, электроники, приборостроения, информационных технологий, информационно-измерительных и управляющих систем. Журнал «Цифровая обработка сигналов» включен в базу данных Web of Science - Russian Science Citation Index (287-я позиция)

Планируемые сроки издания отдельных номеров журнала:

- № 4 декабрь 2020 г. Тематический выпуск: «ЦОС в радиотехнике и системах телекоммуникаций».
- № 1 март 2021 г. Тематический выпуск: ЦОС в инфокоммуникационных системах».
- № 2 июнь 2021 г. Тематический выпуск по материалам 23-й Международной научно-технической конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение-DSPA».
- № 3 сентябрь 2021 г. Тематический выпуск: «Цифровая обработка изображений».

Ориентировочная стоимость рекламных услуг:

- 4-я (внешняя) страница цветной обложки – 25 тысяч рублей.
- 2-я и 3-я (внутренние) страницы цветной обложки – 15 тысяч рублей.
- 1\2 цветной внутренней полосы – 8 тысяч рублей.

Ждем Ваших предложений.

С наилучшими пожеланиями, зам. главного редактора
д.т.н., профессор Витязев Владимир Викторович, телефон 8-903-834-81-81.

Предложения прошу направлять по адресу: E-mail: vityazev.v.v@rsreu.ru или info@dspa.ru