



Н. С. Абрамов, Д. А. Макаров, А. А. Талалаев, В. П. Фраленко

Современные методы интеллектуальной обработки данных ДЗЗ

Аннотация. В работе представлен обзор современных методов обработки данных дистанционного зондирования Земли. Дан анализ работ, посвященных решению задач предварительного анализа снимков, выделения и распознавания целевых объектов для их дальнейшего мониторинга. Сделаны акценты на гибридные методы анализа снимков с применением, в том числе, технологий высокопроизводительной обработки и искусственных нейронных сетей. Показаны особенности, проблемы и тенденции развития технологий обработки больших данных в различных прикладных задачах дистанционного зондирования.

Ключевые слова и фразы: дистанционное зондирование Земли, поиск, распознавание, обработка снимков, искусственная нейронная сеть, интеллектуальная система, программные комплексы, большие данные.

Введение

На сегодняшний день в области обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) наблюдается всплеск активности: создаются новые программные комплексы, модернизируются методы обработки изображений высокого разрешения [1]. Текущая ситуация характеризуется совершенствованием оборудования космических аппаратов (КА) и наземных станций управления, постоянным увеличением их количества, расширением функциональных возможностей и спектра выполняемых задач. В сферу применения КА входят мониторинг лесных, сельскохозяйственных и арктических зон, анализ природных

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты № 16–38–60198–мол_а_дк и № 18–29–03011–мк).

© Н. С. Абрамов⁽¹⁾, Д. А. Макаров⁽²⁾, А. А. Талалаев⁽³⁾, В. П. Фраленко⁽⁴⁾ 2018

© Институт программных систем имени А. К. Айламазяна РАН^(1,3,4) 2018

© Институт системного анализа ФИЦ "Информатика и управление" РАН⁽²⁾ 2018

© ООО «Технологии системного анализа»⁽²⁾ 2018

© Программные системы: теория и приложения (дизайн), 2018

 10.25209/2079-3316-2018-9-4-417-442



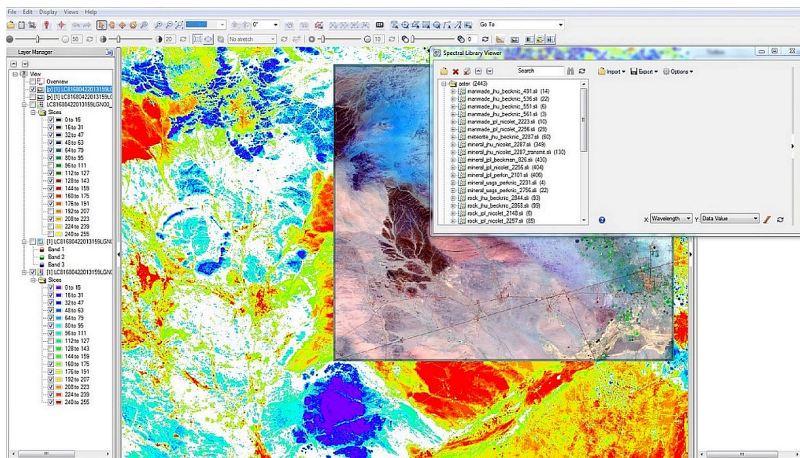


Рисунок 1. Интерфейс программного комплекса ENVI

катаклизмов, охрана окружающей среды, планирование и развитие городской инфраструктуры, государственная безопасность и др.

В течение нескольких десятилетий развиваются и совершенствуются программные комплексы, ориентированные на обработку данных ДЗЗ. Среди них отметим систему, реализованную по модульному принципу, ENVI [2]. В функции последней версии программного пакета ENVI (см. рисунок 1) входят, в том числе, обработка и глубокий анализ мульти-и гиперспектральных снимков, коррекция геометрических, радиометрических и атмосферных искажений, создание высокоточных цифровых моделей рельефа и местности, поддержка пространственных растровых и векторных форматов, интерактивное улучшение изображений, интерактивное дешифрирование и классификация, спецификация области обработки, анализ снимков в радиодиапазоне и др.

Программный комплекс может выполнять функции предварительной обработки входных данных, отображения, фильтрации, спектрального анализа, анализа рельефа, коррекции изображения, классификации, построения трехмерных моделей, построения топографических карт с координатной привязкой. Примером успешного применения данного продукта служит работа [3], в которой описывается высокопроизводительный алгоритм для предварительной обработки (подготовки) гиперспектральных данных с последующей их передачей на вход модулю атмосферной коррекции программного продукта Exelis

ENVI. Применение мульти-потокowego подхода позволило существенно сократить время загрузки снимка, процедур радиометрической калибровки и преобразований (BIL, VIP, BSQ), вплоть до 10 раз. Этого удалось добиться путем разбиения процесса обработки гиперспектрального изображения по каналам либо попиксельно; в первом случае общее количество каналов разделено равномерно по количеству вычислительных ядер процессора(-ов); во втором случае разбиение идет по ширине и/или по высоте снимка, а также благодаря порционной загрузке данных снимка в оперативную память. Достигнутое таким образом существенное снижение нагрузки на файловую систему приводит к сокращению времени выполнения данных операций.

В другом программном комплексе для работы с данными ДЗЗ ER Mapper [4] имеются следующие функциональные возможности: привязка данных к системам координат и картографические проекции; широкий выбор входных форматов; графические слои отображения данных с возможностью индивидуальной обработки; виртуальные наборы данных; обработка изображений с помощью формул и фильтров; векторизация растровых данных; динамический доступ к данным геоинформационными системам и СУБД; трехмерная визуализация.

Система обработки изображений ERDAS Imagine [5] в настоящее время является одним из наиболее развитых коммерческих продуктов для обработки данных ДЗЗ. Система состоит из множества модулей, которые представляют пользователю инструменты обработки изображений, инструменты импорта и экспорта изображений, инструменты монтажа изображений, трехмерной визуализации и картографирования. Например, в модуле Imagine Essentials имеется набор средств работы с изображениями: импорт из различных форматов, визуализация, привязка к географическим координатам, подготовка картографических документов. Модуль Imagine Advantage включает мощные средства коррекции изображений, позволяющие сделать снимки по точности сравнимые с топографическими картами. Модуль Imagine Professional включает средства визуального программирования обработки изображений и их классификации. Особый интерес для высокоточной обработки больших данных ДЗЗ представляет модуль Imagine OrthoBASE, он позволяет обрабатывать сотни космических и аэрофотоснимков, получая на выходе фотоплан картографической точности. Кроме того, с помощью отдельных инструментов программиста программная система может расширяться любыми функциями, которые необходимы пользователю.

Кроме рассмотренных выше программных комплексов широко используются системы IDRISI, MultiSpec, ScanEx, Photomod Radar и др. Все они опираются на различные интеллектуальные методы анализа информации, некоторые будут рассмотрены далее.

1. Методы интеллектуального анализа, поиска и распознавания целевых объектов на данных ДЗЗ большого объема

Растущие объемы пополняемых архивов данных ДЗЗ существенно повысили требования к скорости и качеству обработки данных. Разрабатываемые методы обработки снимков ДЗЗ можно разделить на два типа: предварительная обработка и специальная. С помощью методов предварительной обработки решают следующие задачи: повышение контрастности, изменение размеров, орторектификация, радиометрическая коррекция, морфологическая обработка, удаление фона, шума или других нежелательных объектов на изображении, повышение качества снимка, применение фильтров, сегментации и др. Подобные методы служат, как правило, первым этапом анализа снимков, после которого работает специальная обработка. К специальной обработке относятся методы, предназначенные для решения конкретных конечных задач, например, поиск и распознавание объектов, классификация объектов на снимке. В обеих обозначенных выше группах, в силу показанной на практике высокой эффективности, особый интерес представляет использование методов, построенных на применении нейросетевых моделей и технологий высокопроизводительных вычислений. Рассмотрим некоторые из них.

1.1. Методы предварительной обработки снимков ДЗЗ

Выделению целевых объектов предшествует сегментация изображений. В докладе [6] применено преобразование Гильберта-Хуанга для выделения текстурных признаков. Двумерное преобразование Хуанга позволяет произвести наиболее экономичное разложение изображения по частотным составляющим, поскольку при этом используются только те частоты, которые присутствуют в изображении. К получающимся при этом модам — аналитическим функциям — применимо указанное преобразование, в результате которого вычисляются мгновенные частоты и амплитуды, используемые как признаки текстур. Для построения огибающих была использована аппроксимация с помощью RBF-функций. В работе [7] предложен метод построения ансамбля

иерархических сеточных алгоритмов кластеризации для сегментации мультиспектральных спутниковых изображений. В основе метода — алгоритм, сочетающий преимущества сеточного и плотностного подходов: высокую вычислительную эффективность и способность выделять кластеры, имеющие сложную структуру [8]. Ансамблевый алгоритм является иерархическим, для получения окончательного решения к матрице связности применяется стандартный агломеративный метод построения дендрограммы по методу полной связи, использующий в качестве входной информации попарные расстояния между компонентами (матрицу связности). Применение ансамблевого подхода позволяет повысить качество результатов кластеризации и их устойчивость к изменению параметра сетки.

В работе [9] представлен метод выделения протяженных геопространственных объектов на космических снимках, основанный на поиске областей изображения, соответствующих пространственным характеристикам объектов целевого слоя с учетом их основных признаков и свойств. Алгоритм локализации объектов дорожной сети основывается на использовании фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтра). С его помощью выполняется аппроксимация «идеального» импульсного отклика, определяющего принадлежность точек космического снимка к участкам дорожной сети. Метод выделения протяженных геопространственных объектов на аэрокосмических изображениях заключается в поэлементном обходе изображения в порядке возрастания координат. Текущая точка изображения принимается за начало координат и проверяется на принадлежность объекту целевого слоя, с этой целью в точке определяется значение отклика КИХ-фильтра для каждого из углов поворота.

Одним из способов быстрого выделения целевых объектов на данных ДЗЗ большого объема является спектральное разделение, в частности, согласованная фильтрация. Согласованные фильтры повышают контраст целевого объекта относительно фона, имеющего структурированный или стохастический характер [10]. Результат обработки — изображение, в котором значения пикселей соответствуют процентному содержанию искомого эталона в элементах сцены (в интервале от 0 до 1). Другим способом преобразования данных с целью увеличения различий между фоном и целевыми объектами является метод главных компонент (principal component analysis, PCA). Метод позволяет осуществить декорреляцию изображений,

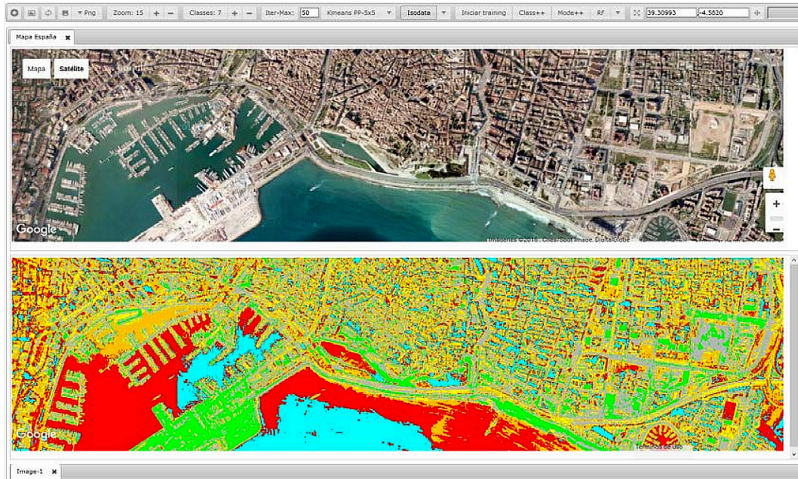


РИСУНОК 2. Интерфейс программной платформы Nurgim

полученных с различных спектральных каналов. Он удобен тем, что не требует знания исходных источников и основан на предположении, что среди компонентов смеси не более чем один имеет гауссовское распределение, а также что они статистически независимы, т.е. ни один из них не передает никакой информации другим компонентам. Помимо независимости, для того чтобы гарантировать единственное решение, необходимо чтобы количество наблюдаемых компонентов было не меньше, чем число исходных сигналов. Однако, малые целевые объекты не вносят существенного вклада в статистические характеристики изображений и не проявляются в новых компонентах, поэтому рекомендуется использовать метод независимых компонент (Independent Component Analysis, ICA) [11].

Возможности платформы Nurgim (см. рисунок 2), предназначенной для классификации спутниковых снимков и выделения регионов интереса описаны в работе [12]. Классификаторы построены на основе алгоритмов Isodata и K -means. При построении системы использована клиент-серверная архитектура, а для повышения производительности используются технологии параллельного программирования и GPGPU.

Статья [13] посвящена решению задачи дешифрования снимков высокого разрешения полученных с БПЛА DJI Phantom 3 Pro. Авторами решается задача поиска и выделения крон деревьев (агрокультур) на

обрабатываемом снимке. Анализируются изображения видимого RGB-диапазона, а обработка выполняется с использованием графического ускорителя. Методика выделения объектов базируется на применении метода *scale-space filtering* (SSF). Показано, что применение GPU значительно повышает эффективность обработки данных.

Метод автоматической сегментации мультиспектральных снимков ДЗЗ, основанный на комбинации теории графов и FNEA (*fractal net evolution approach*), предложен в работе [14]. Реализация метода выполнена с использованием библиотеки MPI и ориентирована на применение высокопроизводительных систем кластерного типа.

Одним из крупных направлений в области вспомогательных алгоритмов по обработке данных ДЗЗ является сжатие снимков. Вопросы о реализации алгоритмов сжатия данных ДЗЗ, способных повысить эффективность использования каналов передачи, рассмотрены в [15, 16]. В работе [15] предлагаются реализации метода сжатия без потерь, рекомендованного CCSDS, выполненные с использованием технологий FPGA и GPGPU, а в работе [16] предлагается алгоритм сжатия с потерями *HyperLCA*, отличающийся высокой степенью компрессии данных. Алгоритм *HyperLCA* предназначен для сжатия гиперспектральных снимков, поступающих с систем ДЗЗ космического базирования. Несмотря на то, что авторы не применяли технологии параллельного программирования, блочная организация алгоритма обработки (независимая обработка различных областей исходного изображения) позволяет легко адаптировать его к параллельным архитектурам.

Для решения задач обработки, идентификации и определения координат объектов на изображении может быть применена искусственная нейронная сеть (ИНС) с радиальными базисными функциями возбуждения (РБФ-сеть), что показано в работе [17]. Для оптимизации структуры нейросети предложено использовать модифицированный метод генетического обучения. Для достижения минимальной структуры сети к значению целевой функции добавляется штраф за количество нейронов в скрытом слое. Метод локализации целевых объектов позволил увеличить вероятность правильной локализации в условиях флуктуационных шумов и аддитивных помех на 15-25% относительно корреляционно-экстремальных методов.

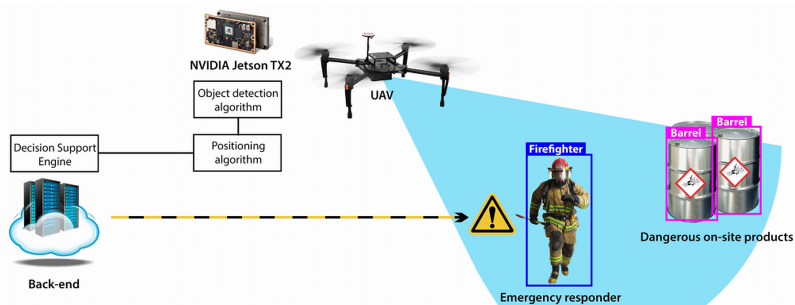
1.2. Методы специальной обработки снимков ДЗЗ

Возможности глубокого обучения искусственных нейронных сетей позволяет применять их в различных областях. В работе [18] авторы приводят обзор методов глубокого обучения ИНС и краткий обзор работ о применении ИНС при решении ряда прикладных задач, в том числе, для обработки данных ДЗЗ, полученных с использованием беспилотных летательных аппаратов.

В работе [19] представлен метод распознавания зданий на спутниковых изображениях, основанный на использовании нечеткой нейронной сети для классификации и предложенного множества информативных признаков для построения базы правил. Наилучший результат сегментации был получен с помощью комбинированного метода, заключающегося в последовательном применении метода роста регионов и нечеткой кластеризации *C*-средних. Применение нечеткой кластеризации позволяет сократить количество регионов и повысить качество сегментации. Выявлено, что для повышения качества сегментации спутниковых изображений целесообразно проводить морфологическую обработку, которая обеспечивает уменьшение количества анализируемых областей за счет слияния сегментов и удаления несущественных фрагментов с точки зрения рассматриваемой задачи. Среднее значение количества правильно распознанных зданий составило 84%.

Особый интерес представляет возможность применения сверточных нейронных сетей, построенных на основе библиотеки YOLO, для решения задачи обнаружения и распознавания объектов с использованием БПЛА [20]. Авторы утверждают, что данный алгоритм может быть использован не только в рамках наземного комплекса обработки, но и на борту беспилотного летательного аппарата (БПЛА), обеспечивая режим обработки видеоинформации в реальном масштабе времени. Приведены подробные результаты тестирования и сравнение нескольких модификаций данной ИНС, активно использующих преимущества GPGPU-технологии. Так, на рисунке 3 приведен пример схемы, по которой может работать автономный БПЛА, производящий основные вычисления по обнаружению и распознаванию за счет компактного бортового суперкомпьютера (NVIDIA Jetson TX2, около 1 ТФЛОПС при мощности потребления около 10 Вт) и передающий информацию в центр принятия решений операторами.

В работе [21] представлен язык пространственных запросов (Spatial Object Query Language, SOQL) для идентификации объектов на



Рисунк 3. Архитектура системы поддержки принятия решений на базе БПЛА

космических снимках высокого и сверхвысокого пространственного разрешения. Язык позволяет пользователю задавать описания признаков объекта в виде группы правил, учитывающих пространственные ограничения. Можно описать форму, положение, текстурные и спектральные признаки идентифицируемых объектов. Идентифицирующий алгоритм реализован в виде логического вывода, с помощью которого осуществляется поиск комбинации признаков, удовлетворяющих описанию объекта. Найденные комбинации оцениваются с помощью функции энергии, что позволяет выбрать наиболее релевантное положение объекта. На выходе получаем множество решений со значением функции энергии меньше порога, соответствующих запросу пользователя. Перебор возможных сочетаний признаков осуществляется поиском в глубину. На каждом шаге происходит извлечение признаков при помощи встроенных предикатов, для каждого встроенного предиката вычисляется значение функции принадлежности.

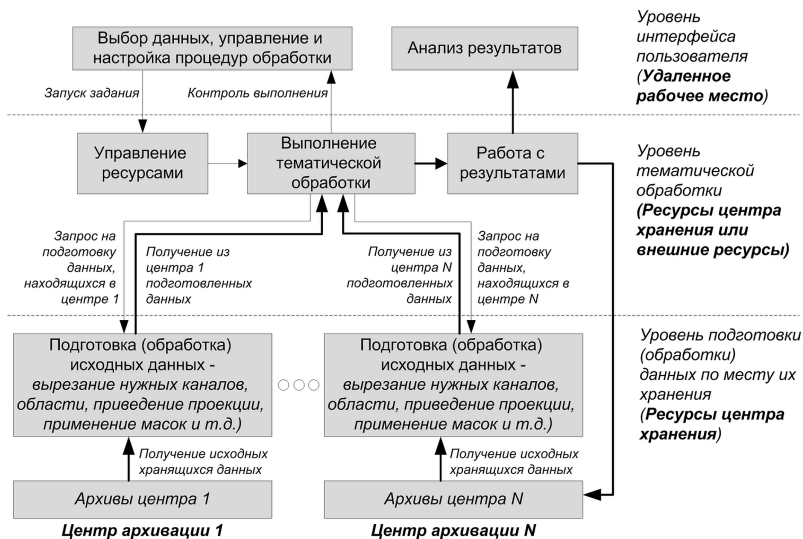
В докладе [22] рассмотрено применение теории метаграмматик для поиска различного рода структурированных информационных объектов в динамично пополняемых больших массивах разнородных картографических данных. Учет структурных и статистических особенностей в метаграмматической модели разнородных картографически привязанных данных и исходных данных ДЗЗ позволяет реализовывать эффективные процедуры синтаксического анализа метаграмматик для управления направленным взаимосвязанным по слоям и структурам перебором ячеек пространства поиска. Таким модели строятся на основе увязанных в грамматические сети систем продукционных правил.

В работе [23] разработаны решающие функции для прецедентного распознавания целевых объектов на основе субполосного анализа, использующие меру различий между сравниваемыми векторами долей энергии разных фрагментов целевых объектов и меру идентичности на основе нормированных коэффициентов корреляции отрезков трансформант Фурье из заданных подобластей плоскости пространственных частот. Разработаны алгоритмы обработки изображений земной поверхности, а именно — прецедентного распознавания объектов на основе субполосного анализа, использующие структурные признаки идентификации фрагментов снимка, что позволило минимизировать ошибки распознавания первого и второго рода.

Для нахождения целевых объектов успешно используется метод фрактальной селекции [24]. Фрактальные методы рассчитывают для каждой точки изображения значение фрактальной размерности — базового параметра фрактальной геометрии. Установив пороговое значение фрактальной размерности, можно определить, относится ли данная точка изображения к природному или антропогенному объекту. Исследования, проведенные в [25], позволяют определять порог фрактальной размерности для снимков, полученных с космических оптико-электронных снимков в диапазоне 2.5–2.7. Алгоритм основан на фрактальных преобразованиях, в основу которых положен метод призм [26]. Предложенный алгоритм чувствителен к масштабу исходного изображения и пороговому значению. Для его реализации необходимо знать линейные размеры выделяемых объектов. Доля критических ошибок типа «пропуск объекта» составляет не более 7%, причем их большая часть относится к самому сложному сюжету, для случая плотной компоновки разнотипных объектов. Для простых объектов доля правильно выделенных объектов приближается к 99%.

2. Методы и технологии работы с данными ДЗЗ большого объема

Вместе с технологиями предварительной обработки, выделения, распознавания объектов на снимках ДЗЗ развиваются методы и технологии, позволяющие эффективно распределять вычислительную нагрузку и организовывать системы хранения. Так, в работе [27] предложены методы работы со сверхбольшими распределенными архивами спутниковых данных с использованием развитых человеко-машинных интерфейсов, созданных на основе web-технологий. Предложена модель данных, обеспечивающая ведение распределенных систем



Рисунком 4. Схема организации систем распределенной интерактивной обработки информации

хранения и ориентированная на динамическое формирование сложных виртуальных информационных продуктов в момент их запроса на основе хранящихся. На рисунке 4 представлена схема организации систем распределенной интерактивной обработки информации, предоставляемой сверхбольшими глобальными архивами данных ДЗЗ, в соответствии с предложенным методом.

В статье [28] представлена распределенная информационно-вычислительная система на основе проекта Apache Hadoop для обработки данных ДЗЗ на примере гипер-и мультиспектральных спутниковых снимков. Отличительной особенностью системы является высокая скорость работы стандартных алгоритмов процессинга ДЗЗ, интегрированных в среду массово-параллельного исполнения программного кода относительно его исполнения в пределах одной машины. Реализованные программные алгоритмы расчета индексов имеют следующие функциональные особенности:

- (1) Модуль HDFStiffReader позволяет производить построчное считывание из tiff-файла, находящегося в хранилище данных в файловой системе HDFS, значений точек (пикселей) снимка, посредством библиотеки JAI; запись полученной информации на этапе извлечения

данных в файл, где каждая строка содержит ключ (номер строки в снимке и его наименование) и числовой массив, содержащий перечисление значений выбранных спектров точек.

- (2) Для работы с выходными данными препроецирования созданы алгоритмы расчета индексов, в соответствии с парадигмой MapReduce, на которой построен метод обработки данных. Метод Map разбивает входной поток на кортежи данных по паре ключ/значение. На этапе Reduce происходит объединение целочисленных массивов согласно значениям ключа, передача их на вход функции расчета индексов. Функция производит вычисление индексов и возвращает массив, содержащий значения типа float в контекст этапа Reduce и записывает его в промежуточный файл, созданный узлом кластера Hadoop.
- (3) На этапе работы алгоритма сортировки и сохранения создаются бинарные файлы, которые содержат последовательные, в соответствии с ключом, выходные данные расчета конкретного индекса, перечислений значений с плавающей точкой.
- (4) По окончании работы алгоритма создания файлов, содержащих результирующие значения индексов, на выходе получаем набор бинарных файлов, которые объединяются в один при помощи метода «merge» стандартного класса «FSDataOutPut» проекта Apache Hadoop, который на вход принимает значение, место расположения присоединяемого бинарного файла и путь до результирующего файла.

В настоящее время широко используются высокопроизводительные технологии для обработки данных дистанционного зондирования Земли на вычислительных кластерах с GPU. Так, в работе [29] предлагается подход к созданию высокопроизводительных технологий, реализованный и апробированный на гибридном кластере НКС-30Т+GPU Сибирского суперкомпьютерного центра. Технологии реализованы как расширение системы SSCCIP (Siberian Scientific Computing Center — Image Processing), интегрирующей удаленную многопроцессорную ЭВМ в процессы обработки и анализа данных ДЗЗ [30]. Система реализована на языке C++, межузловой обмен на многопроцессорной ЭВМ выполняется с помощью коммуникационной библиотеки MPI. Ядро библиотеки SSCC-PIPL расширено шаблонами выполнения на GPU типовых операций над изображениями. Каждый шаблон типовой операции содержит код, общий для всех операций данного типа (загрузка изображений в память GPU и обратно, загрузка

параметров обработки в память GPU, выполнение вычислительного ядра CUDA, итерирование по пикселям изображений, манипуляции с окрестностями пикселей, получение и задание значений отдельных пикселей и пр.). Также имеется код, специфичный для конкретных алгоритмов (сериализация параметров алгоритма в блок памяти и выполнение элементарной операции обработки над отдельным пикселем). GPU-реализация алгоритма поиска кольцевых структур с помощью библиотеки уступает по производительности лишь на 1–2% низкоуровневой реализации с помощью прямого вызова подпрограмм CUDA. При этом значительно упростился процесс создания программы для GPU.

В исследовании [31] приводятся результаты практического использования аппаратно-программных комплексов на базе распределенной грид-инфраструктуры суперкомпьютерных ресурсов для решения ресурсоемких прикладных задач зондирования Земли. Возможности программного комплекса на основе библиотеки параллельной обработки изображений PIPL тестировались в рамках программы Союзного Государства «Космос-НТ» на базе кластерной конфигурации POLYGON_GPU для отработки технологии параллельной обработки больших объемов информации данных ДЗЗ, представляющих собой высококачественные мультиспектральные изображения. В число задач цифровой обработки изображений входят восстановление зашумленных изображений; реконструкция объектов; повышение качества и сглаживание; обнаружение яркостных перепадов и линий; текстурный анализ; сегментация области и распознавание образов; преобразование полутонных изображений; картографическая генерализация; геометрические трансформации и др. Программно-аппаратная реализация на базе PIPL имеет архитектуру клиент-сервер, где серверная компонента реализует запрашиваемые операции параллельной обработки исходного изображения, а клиентская компонента предоставляет оператору пользовательский интерфейс.

В работе [32] представлены некоторые технологии обработки данных ДЗЗ в программном комплексе PlanetaMonitoring, разрабатываемом совместно ФГБУ «НИЦ «Планета»» и ИВМиМГ СО РАН. В том числе для классификации данных ДЗЗ используются методы, которые можно разбить на две группы: контролируемая классификация с обучением и классификация без обучения. Контролируемая классификация в программном комплексе PlanetaMonitoring основана на использовании байесовской стратегии максимального правдоподобия для нормально

распределенных векторов признаков [33]. В состав программного комплекса также входит реализация классического алгоритма жесткой кластеризации — алгоритма K -средних, широко используемого для разбиения на кластеры больших объемов многомерных данных [34]. Альтернативой жесткой разделяющей кластеризации является мягкая или нечеткая кластеризация. В состав системы кластеризации программного комплекса была включена реализация ряда алгоритмов нечеткой кластеризации на основе метода C -средних [35].

Работа [36] предлагает краткий обзор методов организации высокопроизводительных вычислений, используемых при решении ряда задач обработки мультиспектральных спутниковых снимков. Авторы рассматривают возможности применения параллельного программирования, распределенных и кластерных вычислительных систем.

Перспективы, открывающиеся при применении облачных технологий в сфере хранения и обработки данных ДЗЗ обсуждаются в публикации [37]. Текст носит научно-популярный характер, при этом в первую очередь речь идет о возможностях, которые получают поставщики данных ДЗЗ и конечные потребители. Аналогично предыдущей работе, в статье [38] рассматриваются возможности применения инфраструктуры распределенных вычислений для решения комплекса задач обработки данных ДЗЗ. Введены общие определения, рассмотрена теоретическая эталонная архитектура подобного наземного комплекса и приведен обзор ключевых примеров инфраструктуры распределенных вычислений, используемых в области хранения, обеспечения доступа и обработки данных ДЗЗ (Matsu, GENESI-DR и GENESI-DEC, G-POD, GEO Grid, GEOSS).

В работе [39] приведены результаты тестирования программы SARscape Persistent Scatterers, предназначенной для обработки данных радарной космической съемки. Авторами проведены эксперименты и представлены результаты тестирования, демонстрирующие значительный прирост производительности при использовании GPU-кластера для обработки больших массивов радарных данных (см. рисунок 5).

Еще одним наиболее востребованным направлением в области ДЗЗ является разработка методов и технологий, сочетающих в себе анализ данных ДЗЗ и технологии автономных БПЛА. При этом бортовой вычислитель БПЛА может брать на себя часть или полную работу по анализу снимков, без обращения к наземным станциям. Так, в статье [40] рассматривается общая архитектура бортового вычислительного комплекса БПЛА, построенного на основе мини-компьютера на базе

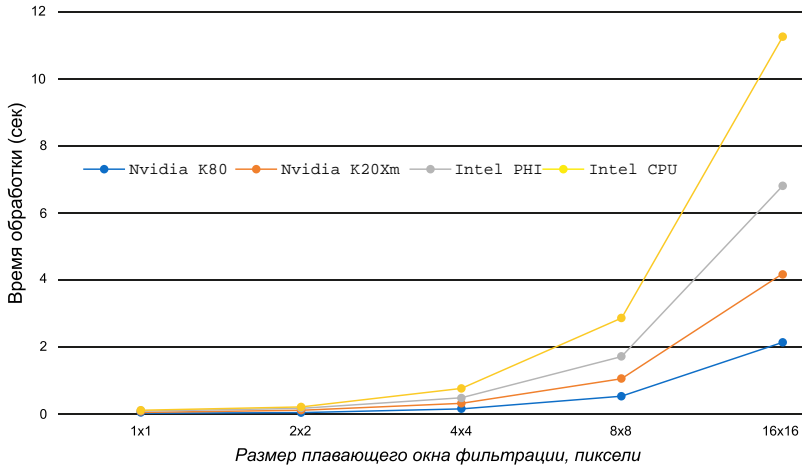


РИСУНОК 5. Результаты теста производительности для алгоритма фильтрации комплексного радарного снимка

платформы Intel NUC. Приведенные результаты экспериментального тестирования показывают возможность проведения полного цикла обработки данных, поступающих с установленной на борту БПЛА стереокамеры, с целью выделения заданных маркеров, определения дистанции до цели и положения целевого объекта. При организации вычислений используется модель параллельного (многопоточного) программирования.

Технологии FPGA успешно применяются и на бортовых вычислительных платформах БПЛА, решая задачу обнаружения подвижных объектов [41]. Предлагаемый авторами вариант реализации обеспечивает обработку видеопотока с разрешением 640x480 пикселей в реальном масштабе времени (30 кадров в секунду), при этом, авторы отмечают, что нагрузка на разработанный FPGA-модуль составляет менее 20%, что открывает дополнительные возможности по использованию технологии. В статье [42] речь также идет о возможности применения FPGA-технологии, авторами предлагается реализация алгоритма поиска ключевых точек, построенная на основе комбинации модифицированного SURF и BRIEF-дескрипторов. Реализация выполнена на основе аппаратной платформы ПЛИС Xilinx XC72K325T. Показано значительное превосходство FPGA-реализации по показателям скорости обработки данных. Статья содержит краткий обзор работ по

возможностям применения алгоритмов поиска ключевых точек и разработке их FPGA-реализаций.

В работе [43] авторами предлагается параллельная реализация SVM-классификатора на основе языка высокого уровня RVC-CAL, предназначенного для описания dataflow-моделей и поддерживающего автоматическое распараллеливание программ на различных архитектурах. Несмотря на то, что экспериментальные результаты были получены авторами на задаче анализа мультиспектральных снимков из области медицины, данный классификатор, как и рассмотренная технология программирования, могут быть использованы при обработке данных ДЗЗ.

В трудах четвертой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли» представлен доклад [44] о разработке отечественного программного обеспечения, предназначенного для анализа целевой (спутниковой) информации: решения задач географической привязки, радиометрической коррекции и калибровки, геометрической коррекции и перепроэцирования и др. Указано, что программный комплекс строится с использованием Apache Hadoop, обеспечивающего модель распределенной высокопроизводительной обработки данных.







Заключение

















Расширение спектра прикладных задач решаемых с использованием средств ДЗЗ и значительный рост объемов обрабатываемой информации, получаемой с их применением требуют разработки и внедрения современных методов и технологий для эффективной обработки поступающих данных. Крупные программные комплексы, присутствующие на рынке геоинформационных систем, активно развиваются и расширяют свой функционал. При этом исследователи и разработчики программного обеспечения ищут пути повышения эффективности обработки данных ДЗЗ, применяя технологии высокопроизводительных вычислений. Разрабатываемые методы и алгоритмы опираются на наиболее современные и актуальные решения: применяются как технологии параллельного программирования для многоядерных и/или многопроцессорных (кластерных) систем, так и распределенные вычисления, облачные и GPGPU-технологии. Применение подобных технологий позволяет не только снизить временные затраты на решение















прикладных задач, связанных с обработкой больших объемов данных, но и открывает возможности использования более ресурсоемких алгоритмов, позволяя повышать качественные показатели, обеспечивая высокоточную обработку данных. Значительный интерес у исследователей вызывает разработка и применение методов обработки, построенных с использованием ИНС. Это обуславливается тем, что использование искусственных нейронных сетей позволяет получить достаточно высокое качество обработки поступающей информации, архитектура ИНС обладает высоким уровнем параллелизма, а полученные решения зачастую являются более гибкими и могут применяться при решении целого ряда задач, связанных с обработкой графической и видеоинформации. Находит свое применение и FPGA-технология, способная обеспечить построение высокопроизводительных решений, функционирующих на борту, без использования ресурсов наземных комплексов обработки данных, что позволяет значительно повысить автономность БПЛА.














Анализ современного состояния исследований в предметной области показывает, что развитие технологий обработки данных ДЗЗ идет по пути разработки более высокоуровневых, интеллектуальных методов, предлагая конечному пользователю решения, позволяющие, в значительной степени, автоматизировать процесс обработки данных при решении прикладных задач.









Список литературы

- [1] В. М. Хачумов, Ю. Г. Емельянова, В. М. Ватутин и др. «Анализ баз данных ДЗЗ для решения задач мониторинга Арктической зоны», *Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий»* (Москва, 1-3 июня 2016 г.).  [↑](#)₄₁₇
- [2] *ENVI – Environment for Visualizing Images. Harris Geospatial Solutions.*  [↑](#)₄₁₈
- [3] В. П. Потапов, С. Е. Попов. «Высокопроизводительные алгоритмы радиометрической калибровки и преобразования порядка следования данных отдельных каналов сенсора EO-1 Hyperion», *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2014, №4, с. 286–299.   [↑](#)₄₁₈
- [4] *ERDAS ER Mapper. Hexagon Geospatial.*  [↑](#)₄₁₉
- [5] *ERDAS Imagine. ESTI MAP.*  [↑](#)₄₁₉

- [6] Е. С. Нежевенко, А. С. Феоктистов. «Преобразование Гильберта-Хуанга двумерных изображений и использование его для выделения текстурных признаков», *Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли*, Материалы международной научной конференции, Сибирский федеральный университет, Красноярск, 2014, с. 200–203.  [↑₄₂₀](#)
- [7] И. А. Пестунов, С. А. Рылов. «Метод построения ансамбля сеточных иерархических алгоритмов кластеризации для сегментации спутниковых изображений», *Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли*, Материалы международной научной конференции, Сибирский федеральный университет, Красноярск, 2014, с. 215–223.  [↑₄₂₀](#)
- [8] Е. А. Куликова, И. А. Пестунов, Ю. Н. Синявский. «Непараметрический алгоритм кластеризации для обработки больших массивов данных», *Труды 14-ой научной конференции «Математические методы распознавание образов»*, MAKS Press, М., 2009, с. 149–152. [↑₄₂₁](#)
- [9] С. Ю. Мирошниченко, В. С. Титов, А. А. Яценко. «Метод автоматической локализации протяженных геопространственных объектов на космических снимках», *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*, 2013, №6, с. 17–22.  [↑₄₂₁](#)
- [10] Т. И. Михеева. «Data Mining в геоинформационных технологиях», *Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки»*, 2006, №41, с. 96–99.  [↑₄₂₁](#)
- [11] Т. И. Михеева, А. А. Федосеев. «Кластеризация гиперспектральных данных мониторинга объектов транспортной инфраструктуры», *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, **16**:4(2) (2014), с. 404–408.   [↑₄₂₂](#)
- [12] A. García-Flores, A. Paz-Gallardo, A. Plaza, J. Li. “A new tool for supervised classification of satellite images available on web servers: Google Maps as a case of study”, High-Performance Computing in Geoscience and Remote Sensing VI (Edinburgh, United Kingdom, 26-29 September, 2016), Proc. of SPIE, vol. **10007**, 2016, 12 pp.   [↑₄₂₂](#)
- [13] H. Jiang, S. Chen, D. Li, C. Wang, J. Yang. “Papaya tree detection with UAV images using a GPU-accelerated scale-space filtering method”, *Remote Sensing*, **9**:7 (2017).   [↑₄₂₂](#)
- [14] H. Gu, Y. Han, Y. Yang, H. Li, Z. Liu, U. Soergel, T. Blaschke, S. Cui. “An efficient parallel multi-scale segmentation method for remote sensing imagery”, *Remote Sensing*, **10**:4 (2018).   [↑₄₂₃](#)
- [15] D. Báscones, C. González, D. Mozos. “Parallel implementation of the CCSDS 1.2.3 Standard for Hyperspectral Lossless Compression”, *Remote Sensing*, **9**:10 (2017).   [↑₄₂₃](#)
- [16] R. Guerra, Y. Barrios, M. Díaz, L. Santos, S. López, R. Sarmiento. “A new algorithm for the on-board compression of hyperspectral images”, *Remote Sensing*, **10**:3 (2018).   [↑₄₂₃](#)

- [17] А. А. Подорожняк. «Метод выявления объектов интереса при обработке данных в системе дистанционного зондирования Земли», *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, 2014, №4, с. 60–64.  [↑₄₂₃](#)
- [18] A. Carrio, C. Sampedro, A. Rodriguez-Ramos, P. Campoy. “A review of deep learning methods and applications for unmanned aerial vehicles”, *Journal of Sensors*, 2017.   [↑₄₂₄](#)
- [19] С. В. Надеран. «Информационная технология распознавания зданий на спутниковых изображениях с помощью нечетких нейронных сетей», *Int. J. Information Content and Processing*, 1:2 (2015), с. 188–193.  [↑₄₂₄](#)
- [20] N. Tijtgat, Wiebe Van Ranst, B. Volckaert, T. Goedeme, Filip De Turck. “Embedded real-time object detection for a UAV warning system”, *Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW)* (Venice, Italy, October 22-29, 2017), 2018, pp. 2110–2118.  [↑₄₂₄](#)
- [21] И. В. Бычков, Г. М. Ружников, Р. К. Федоров, Ю. В. Авраменко. «Интерпретатор языка SOQL для обработки растровых изображений», *Вычислительные технологии*, 21:1 (2016), с. 49–59.   [↑₄₂₄](#)
- [22] О. И. Атакищев, А. И. Костокрызов, В. А. Заичко, А. О. Атакищев, А. Г. Емельянов. «Метаграмматические методы поиска в больших массивах картографической информации», *Тезисы 14-ой Международной научно-технической конференции «От снимка к карте: цифровые фотограмметрические технологии»* (Хайнань, Китай, 18-24 октября 2014 г.), 2014, с. 3–4.  [↑₄₂₅](#)
- [23] Е. Г. Жилияков, А. Ю. Лихошерстный. «Архитектура нейросети в задаче прецедентного распознавания объектов на изображениях с использованием частотных признаков», *Вопросы радиоэлектроники*, 4:1 (2013), с. 35–45.  [↑₄₂₆](#)
- [24] А. С. Андрусенко, Е. И. Шабаков. «Метод фрактальной селекции объектов на аэрокосмических изображениях», *Труды всероссийской конференции «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов»* (Бердск, 29-31 августа 2017 г.), *CEUR Workshop Proceedings*, т. 2033, 2017, с. 50–59.  [↑₄₂₆](#)
- [25] E. Markov. “Fractal methods for extracting artificial objects from the unmanned aerial vehicle images”, *Journal of Applied Remote Sensing*, 10:2 (2016).   [↑₄₂₆](#)
- [26] W. Sun, G. Xu, P. Gong, S. Liang. “Fractal analysis of remotely sensed images: A review of methods and applications”, *International Journal of Remote Sensing*, 27:22 (2007).  [↑₄₂₆](#)
- [27] А. В. Кашницкий. «Технология создания инструментов обработки и анализа данных больших распределенных спутниковых архивов», *Оптика атмосферы и океана*, 29:9 (2016), с. 772–777.  [↑₄₂₆](#)
- [28] А. Ю. Ощепков, С. Е. Попов. «Разработка информационно-вычислительной системы на базе Apache Hadoop для обработки гипер-

- и мультиспектральных данных дистанционного зондирования Земли», *Вестник ВГУ, Серия: Системный анализ и информационные технологии*, 2016, №3, с. 95–105.   ↑₄₂₇
- [29] Е. В. Русин. «Технологии обработки данных дистанционного зондирования земли на гибридном кластере НКС-30Т+GPU», *Интерэкспо Гео-Сибирь*, 4:1, Сборник материалов Международной научной конференции «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» (2016), с. 46–49.  ↑₄₂₈
- [30] E. V. Rusin. “Technology of high performance image processing on multi-processor computer”, *Pattern Recognition and Image Analysis*, 22:3 (2012), pp. 470–472.  ↑₄₂₈
- [31] М. Е. Кулешова, Н. И. Парамонова, Н. Н. Парамонов, О. П. Чиж. «Разработка технологических решений по созданию и использованию специализированных аппаратно-программных комплексов на базе грид-инфраструктур суперкомпьютерных ресурсов», Труды международной конференции «Суперкомпьютерные дни в России 2015» (Москва, 28-29 сентября 2015 г.), CEUR Workshop Proceedings, т. 1482, 2015, с. 603–610.  ↑₄₂₉
- [32] В. В. Асмус, А. А. Бучнев, В. А. Кровотынцев, В. П. Пяткин, Г. И. Салов. «Комплекс программного обеспечения PlanetaMonitoring в прикладных задачах дистанционного зондирования», *Автометрия*, 54:3 (2018), с. 14–23.  ↑₄₂₉
- [33] В. В. Асмус. *Программно-аппаратный комплекс обработки спутниковых данных и его применение для задач гидрометеорологии и мониторинга природной среды*. Дис. ... докт. физ.-матем. наук, М., 2002, 75 с. ↑₄₃₀
- [34] A. K. Jain. “Data clustering: 50 years beyond K-means”, *Pattern Recognition Letters*, 31 (2010), pp. 651–666.  ↑₄₃₀
- [35] J. C. Bezdek, R. Ehrlich, W. Full. “FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm”, *Computers & Geo-sciences*, 10:2 (1984), pp. 191–203.  ↑₄₃₀
- [36] M. Bhojne, A. Chakravarti, A. Pallav, V. Sivakumar. “High performance computing for satellite data processing and analyzing – A review”, *Asian Journal of Science and Technology*, 4:8 (2013), pp. 19–25.  ↑₄₃₀
- [37] Б. Роде. «Облачные вычисления в сервисах компании DigitalGlobe», *Геоматика*, 2016.  ↑₄₃₀
- [38] Б. А. Дворкин (пер.). “Последние достижения в области высокоскоростной обработки данных ДЗЗ”, *Геоматика*, 2012, no.2(15), pp. 16–29; Сокр. пер. с англ. яз. статьи: C. A. Lee, S. D. Gasster, A. Plaza, Chein-I Chang, Bormin Huang. “Recent developments in high performance computing for remote sensing: a review”, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4:3 (2011).   ↑₄₃₀
- [39] Ю. И. Кантемиров, А. Петернье. «Результаты тестирования кластерной версии SARscape, предназначенной для обработки больших объемов данных радарных космических съемок», *Геоматика*, 2016.  ↑₄₃₀

- [40] Y. Deng, N. Xian, H. Duan. “A binocular vision-based measuring system for UAVs autonomous aerial refueling”, *Proceedings of 12th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA)* (Kathmandu, Nepal, June 1-3, 2016), 2016, pp. 221–226.  [↑₄₃₀](#)
- [41] Jia Wei Tang, N. Shaikh-Husin, Usman Ullah Sheikh, M. N. Marsono. “FPGA-based real-time moving target detection system for unmanned aerial vehicle application”, *International Journal of Reconfigurable Computing*, 2016.   [↑₄₃₁](#)
- [42] J. Huang, G. Zhou. “On-board detection and matching of feature points”, *Remote Sensing*, **9:6** (2017).   [↑₄₃₁](#)
- [43] D. Madroñal, H. Fabelo, R. Lazcano, G. M. Callicó, E. Juárez, C. Sanz. “Parallel implementation of a hyperspectral image linear SVM classifier using RVC-CAL”, *Remote Sensing*, 2016 (Edinburgh, United Kingdom, 26-29 September, 2016), *Proceedings of SPIE*, vol. **10007**.   [↑₄₃₂](#)
- [44] Б. В. Райченко, Д. И. Федоткин. «Программная реализация комплекса анализа и обеспечения качества целевой информации «МЕТЕОР-М» №2-1», *Тезисы докладов четвертой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли»* (Москва, 19 мая 2016 г.), 2016, с. 167–169.  [↑₄₃₂](#)

Поступила в редакцию 29.10.2018

Переработана 05.12.2018

Опубликована 30.12.2018


Рекомендовал к публикации

д.т.н. В. М. Хачумов

Пример ссылки на эту публикацию:

Н. С. Абрамов, Д. А. Макаров, А. А. Талалаев, В. П. Фраленко. «Современные методы интеллектуальной обработки данных ДЗЗ». *Программные системы: теория и приложения*, 2018, **9:4**(39), с. 417–442.

 10.25209/2079-3316-2018-9-4-417-442


 http://psta.psiras.ru/read/psta2018_4_417-442.pdf

Об авторах:



Николай Сергеевич Абрамов

К.т.н., старший научный сотрудник ИЦМС ИПС им. А.К. Айламазяна РАН. Область научных интересов: математические методы синтеза, обработки и анализа изображений и сигналов, искусственный интеллект и принятие решений, интеллектуальный анализ данных и распознавание образов, геометрия.


 0000-0002-1612-3879

e-mail: n-say@nsa.pereslavl.ru



Дмитрий Александрович Макаров

К.ф.-м.н., старший научный сотрудник ФИЦ ИУ РАН, ведущий научный сотрудник ООО «Технологии системного анализа». Автор более 40 работ. Область научных интересов: теория управления, нелинейные и сингулярно возмущенные системы, искусственный интеллект, интеллектуальное управление, робототехника.


 0000-0001-8930-1288

e-mail: makarov@isa.ru



Александр Анатольевич Талалаев

К.т.н., старший научный сотрудник ИЦМС ИПС им. А. К. Айламазяна РАН, автор более 40 публикаций. Область научных интересов: искусственный интеллект, машинная графика, распознавание образов, параллельные вычисления.


 0000-0003-0186-9499

e-mail: arts@arts.botik.ru



Виталий Петрович Фраленко

К.т.н., ведущий научный сотрудник ИЦМС ИПС им. А.К. Айламазяна РАН. Область научных интересов: интеллектуальный анализ данных и распознавание образов, искусственный интеллект и принятие решений, параллельные алгоритмы, сетевая безопасность, диагностика сложных технических систем, графические интерфейсы, блокчейн-технологии.

 0000-0003-0123-3773

e-mail: alarmod@pereslavl.ru

CSCSTI 89.57.35
UDC 004.932

Nikolai Abramov, Dmitry Makarov, Alexander Talalaev, Vitaly Fralenko. *Modern methods for intelligent processing of Earth remote sensing data.*

ABSTRACT. The paper presents an overview of modern methods for processing Earth remote sensing data. The analysis of works devoted to solving problems of preliminary analysis of images, the selection and recognition of target objects for their further monitoring is given. Emphasis has been placed on hybrid methods for analyzing images using, among other things, high-performance processing technologies and artificial neural networks. The features, problems and trends in the development of big data processing technologies in various remote sensing applications are shown. (*In Russian*).

Key words and phrases: Earth remote sensing, search, recognition, image processing, artificial neural network, intelligent system, software systems, big data.

2010 *Mathematics Subject Classification:* 00A66; 76M27,91E30

References

- [1] V. M. Khachumov, Yu. G. Yemel'yanova, V. M. Vatutin i dr. "Analysis of remote sensing data bases for solving problems of monitoring the Arctic zone", *Materialy VIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Aktual'nyye problemy raketno-kosmicheskogo priborostroyeniya i informatsionnykh tekhnologiy"* (Moskva, 1-3 iyunya 2016 g.) (in Russian). [URL](#)[↑]₄₁₇
- [2] *ENVI—Environment for Visualizing Images. Harris Geospatial Solutions.* [URL](#)[↑]₄₁₈
- [3] V. P. Potapov, S. Ye. Popov. "High-performance radiometric calibration and bands interleave conversion algorithms for EO-1 Hyperion data", *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, no.4, pp. 286–299 (in Russian). [URL](#)[↑]₄₁₈
- [4] *ERDAS ER Mapper. Hexagon Geospatial.* [URL](#)[↑]₄₁₉
- [5] *ERDAS Imagine. ESTI MAP.* [URL](#)[↑]₄₁₉
- [6] Ye. S. Nezhevenko, A. S. Feoktistov. "Hilbert-Huang's transformation of two-dimensional images and use it to highlight textural signs", *Regional'nyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli*, *Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, Sibirskiy federal'nyy universitet, Krasnoyarsk*, 2014, pp. 200–203 (in Russian). [URL](#)[↑]₄₂₀

© N. S. ABRAMOV⁽¹⁾ D. A. MAKAROV⁽²⁾ A. A. TALALAEV⁽³⁾ V. P. FRALENKO⁽⁴⁾ 2018

© AILAMAZYAN PROGRAM SYSTEMS INSTITUTE OF RAS^(1,3,4) 2018

© INSTITUTE FOR SYSTEMS ANALYSIS, FRC "COMPUTER SCIENCE AND CONTROL" OF RAS⁽²⁾ 2018

© LLC "TECHNOLOGIES FOR SYSTEMS ANALYSIS"⁽²⁾ 2018















© PROGRAM SYSTEMS: THEORY AND APPLICATIONS (DESIGN), 2018

 10.25209/2079-3316-2018-9-4-417-442



- [7] I. A. Pestunov, S. A. Rylov. “The method of constructing an ensemble of grid hierarchical clustering algorithms for the segmentation of satellite images”, *Regional’nyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli, Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, Sibirskiy federal’nyy universitet, Krasnoyarsk*, 2014, pp. 215–223 (in Russian). [URL](#)[↑]₄₂₀
- [8] Ye. A. Kulikova, I. A. Pestunov, Yu. N. Sinyavskiy. “Nonparametric clustering algorithm for processing large data arrays”, *Trudy 14-oy nauchnoy konferentsii “Matematicheskiye metody raspoznavaniye obrazov”*, MAKS Press, M., 2009, pp. 149–152 (in Russian).[↑]₄₂₁
- [9] S. Yu. Miroshnichenko, V. S. Titov, A. A. Yashchenko. “A method for localization of extended geospatial objects with satellite images”, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye*, 2013, no.6, pp. 17–22 (in Russian).[↑]₄₂₁
- [10] T. I. Mikheyeva. “Data mining in geographic information technologies”, *Vestnik SamGTU. Seriya “Tekhnicheskiye nauki”*, 2006, no.41, pp. 96–99 (in Russian).[↑]₄₂₁
- [11] T. I. Mikheyeva, A. A. Fedoseyev. “Hyperspectral data clustering of monitoring of transport infrastructure objects”, *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, **16**:4(2) (2014), pp. 404–408 (in Russian). [URL](#)[↑]₄₂₂
- [12] A. García-Flores, A. Paz-Gallardo, A. Plaza, J. Li. “A new tool for supervised classification of satellite images available on web servers: Google Maps as a case of study”, *High-Performance Computing in Geoscience and Remote Sensing VI (Edinburgh, United Kingdom, 26-29 September, 2016)*, Proc. of SPIE, vol. **10007**, 2016, 12 pp. [doi](#) [URL](#)[↑]₄₂₂
- [13] H. Jiang, S. Chen, D. Li, C. Wang, J. Yang. “Papaya tree detection with UAV images using a GPU-accelerated scale-space filtering method”, *Remote Sensing*, **9**:7 (2017). [doi](#) [URL](#)[↑]₄₂₂
- [14] H. Gu, Y. Han, Y. Yang, H. Li, Z. Liu, U. Soergel, T. Blaschke, S. Cui. “An efficient parallel multi-scale segmentation method for remote sensing imagery”, *Remote Sensing*, **10**:4 (2018). [doi](#) [URL](#)[↑]₄₂₃
- [15] D. Báscones, C. González, D. Mozos. “Parallel implementation of the CCSDS 1.2.3 Standard for Hyperspectral Lossless Compression”, *Remote Sensing*, **9**:10 (2017). [doi](#) [URL](#)[↑]₄₂₃
- [16] R. Guerra, Y. Barrios, M. Díaz, L. Santos, S. López, R. Sarmiento. “A new algorithm for the on-board compression of hyperspectral images”, *Remote Sensing*, **10**:3 (2018). [doi](#) [URL](#)[↑]₄₂₃
- [17] A. A. Podorozhnyak. “Method of interest objects detection while processing data in the system of Earth remote sensing”, *Informatsiynno-keruyuchi sistemi na zaliznichnomu transportu*, 2014, no.4, pp. 60–64 (in Russian). [URL](#)[↑]₄₂₃
- [18] A. Carrio, C. Sampedro, A. Rodriguez-Ramos, P. Campoy. “A review of deep learning methods and applications for unmanned aerial vehicles”, *Journal of Sensors*, 2017. [doi](#) [URL](#)[↑]₄₂₄
- [19] S. V. Naderan. “Automated building extraction system applied on high resolution satellite imagery using fuzzy neural network”, *Int. J. Information Content and Processing*, **1**:2 (2015), pp. 188–193 (in Russian). [URL](#)[↑]₄₂₄
- [20] N. Tijtgat, Wiebe Van Ranst, B. Volckaert, T. Goedeme, Filip De Turck. “Embedded real-time object detection for a UAV warning system”, *Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW)* (Venice, Italy, October 22-29, 2017), 2018, pp. 2110–2118. [doi](#)[↑]₄₂₄


- [21] I. V. Bychkov, G. M. Ruzhnikov, R. K. Fedorov, Yu. V. Avramenko. “Interpreter of Spatial Object Query Language for raster image processing”, *Vychislitel’nyye tekhnologii*, **21:1** (2016), pp. 49–59 (in Russian). [URL](#)[↑]₄₂₄
- [22] O. I. Atakishchev, A. I. Kostogryzov, V. A. Zaichko, A. O. Atakishchev, A. G. Yemel’yanov. “Metagrammatic methods of searching in large arrays of cartographic information”, *Tezisy 14-oy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Ot snimka k karte: tsifrovyye fotogrammetricheskiye tekhnologii”* (Khaynan’, Kitay, 18-24 oktyabrya 2014 g.), 2014, pp. 3–4 (in Russian). [URL](#)[↑]₄₂₅
- [23] Ye. G. Zhilyakov, A. Yu. Likhosherstnyy. “Architecture of neural networks in the problem pretsednogo object recognition using frequency signs”, *Voprosy radioelektroniki*, **4:1** (2013), pp. 35–45 (in Russian).[↑]₄₂₆
- [24] A. S. Andrusenko, Ye. I. Shabakov. “Method of fractal selection of objects on aerospace images”, *Trudy vsrossiyskoy konferentsii “Obrabotka prostranstvennykh dannykh v zadachakh monitoringa prirodnykh i antropogennykh protsessov”* (Berdk, 29-31 avgusta 2017 g.), CEUR Workshop Proceedings, vol. **2033**, 2017, pp. 50–59 (in Russian). [URL](#)[↑]₄₂₆
- [25] E. Markov. “Fractal methods for extracting artificial objects from the unmanned aerial vehicle images”, *Journal of Applied Remote Sensing*, **10:2** (2016). [DOI](#)[↑]₄₂₆
- [26] W. Sun, G. Xu, P. Gong, S. Liang. “Fractal analysis of remotely sensed images: A review of methods and applications”, *International Journal of Remote Sensing*, **27:22** (2007). [DOI](#)[↑]₄₂₆
- [27] A. V. Kashnitskiy. “Technology for creating tools for processing and analyzing data from large distributed satellite archives”, *Optika atmosfery i okeana*, **29:9** (2016), pp. 772–777 (in Russian). [DOI](#)[↑]₄₂₆
- [28] A. Yu. Oshchepkov, S. Ye. Popov. “Development of informational-computational systems on the basis of Apache Hadoop for the handling of digital data hyper- and multispectral remote sensors”, *Vestnik VGU, Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnyye tekhnologii*, 2016, no.3, pp. 95–105 (in Russian). [URL](#)[↑]₄₂₇
- [29] Ye. V. Rusin. “Technologies for the processing of earth remote sensing data on NKS-30T+GPU hybrid cluster”, *Inter-yekspo Geo-Sibir’*, **4:1**, Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii “Distantsionnyye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchey sredy, geoekologiya” (2016), pp. 46–49 (in Russian).[↑]₄₂₈
- [30] E. V. Rusin. “Technology of high performance image processing on multiprocessor computer”, *Pattern Recognition and Image Analysis*, **22:3** (2012), pp. 470–472. [DOI](#)[↑]₄₂₈
- [31] M. Ye. Kuleshova, N. I. Paramonova, N. N. Paramonov, O. P. Chizh. “Development of technological solutions in creating and using specialized hardware-software complex based on grid infrastructure supercomputer resources”, *Trudy mezhdunarodnoy konferentsii “Superkomp’yuternyye dni v Rossii 2015”* (Moskva, 28-29 sentyabrya 2015 g.), CEUR Workshop Proceedings, vol. **1482**, 2015, pp. 603–610 (in Russian). [URL](#)[↑]₄₂₉
- [32] V. V. Asmus, A. A. Buchnev, V. A. Krovotyntsev, V. P. Pyatkin, G. I. Salov. “PlanetaMonitoring software complex in applied remote sensing problems”, *Autometriya*, **54:3** (2018), pp. 14–23 (in Russian). [DOI](#)[↑]₄₂₉
- [33] V. V. Asmus. *Software and hardware complex for processing satellite data and its application for hydrometeorology and environmental monitoring tasks*, Dis. ... dokt. fiz.-matem. nauk, M., 2002 (in Russian), 75 pp.[↑]₄₃₀

- [34] A. K. Jain. “Data clustering: 50 years beyond K-means”, *Pattern Recognition Letters*, **31** (2010), pp. 651–666.  [↑₄₃₀](#)
- [35] J. C. Bezdek, R. Ehrlich, W. Full. “FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm”, *Computers & Geo-sciences*, **10:2** (1984), pp. 191–203.  [↑₄₃₀](#)
- [36] M. Bhojne, A. Chakravarti, A. Pallav, V. Sivakumar. “High performance computing for satellite data processing and analyzing—A review”, *Asian Journal of Science and Technology*, **4:8** (2013), pp. 19–25.  [↑₄₃₀](#)
- [37] B. Rode. “Cloud computing in the services of the company DigitalGlobe”, *Geomatika*, 2016 (in Russian).  [↑₄₃₀](#)
- [38] C. A. Lee, S. D. Gasster, A. Plaza, Chein-I Chang, Bormin Huang. “Recent developments in high performance computing for remote sensing: a review”, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **4:3** (2011).  [↑₄₃₀](#)
- [39] Yu. I. Kantemirov, A. Petern’ye. “The results of testing the cluster version of SARscape, intended for processing large amounts of radar satellite imagery data”, *Geomatika*, 2016 (in Russian).  [↑₄₃₀](#)
- [40] Y. Deng, N. Xian, H. Duan. “A binocular vision-based measuring system for UAVs autonomous aerial refueling”, *Proceedings of 12th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA)* (Kathmandu, Nepal, June 1-3, 2016), 2016, pp. 221–226.  [↑₄₃₀](#)
- [41] Jia Wei Tang, N. Shaikh-Husin, Usman Ullah Sheikh, M. N. Marsono. “FPGA-based real-time moving target detection system for unmanned aerial vehicle application”, *International Journal of Reconfigurable Computing*, 2016.   [↑₄₃₁](#)
- [42] J. Huang, G. Zhou. “On-board detection and matching of feature points”, *Remote Sensing*, **9:6** (2017).   [↑₄₃₁](#)
- [43] D. Madroñal, H. Fabelo, R. Lazcano, G. M. Callicó, E. Juárez, C. Sanz. “Parallel implementation of a hyperspectral image linear SVM classifier using RVC-CAL”, *Remote Sensing 2016* (Edinburgh, United Kingdom, 26-29 September, 2016), *Proceedings of SPIE*, vol. **10007**.   [↑₄₃₂](#)
- [44] B. V. Raychenko, D. I. Fedotkin. “Software implementation of the complex analysis and quality assurance of target information “METEOR-M” No.2-1”, *Tezisy dokladov chetvertoy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Aktual’nyye problemy sozdaniya kosmicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya Zemli”* (Moskva, 19 maya 2016 g.), 2016, pp. 167–169 (in Russian).  [↑₄₃₂](#)

Sample citation of this publication:

Nikolai Abramov, Dmitry Makarov, Alexander Talalaev, Vitaly Fralenko. “Modern methods for intelligent processing of Earth remote sensing data”. *Program Systems: Theory and Applications*, 2018, **9:4**(39), pp. 417–442. (In Russian).

 [10.25209/2079-3316-2018-9-4-417-442](https://doi.org/10.25209/2079-3316-2018-9-4-417-442)

 http://psta.psiras.ru/read/psta2018_4_417-442.pdf