

Труды XXIX научной конференции по радиофизике

**СЕКЦИЯ
«ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИЙ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ
И ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ»**

Председатель – А.Л. Умнов, секретарь – С.Б. Сурова.
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского.

ИССЛЕДОВАНИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭКОЛОГИЧЕСКОМ И ИНТЕНСИВНОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ

А.В. Желтов

ООО «ТИМБЕРА»

Долгосрочные исследования эффективности органического земледелия

Современные научные исследования подтверждают высокую эффективность органических систем земледелия. Долгосрочное исследование, проведённое в Боннском университете в течение более 20 лет на растениях ячменя, продемонстрировало адаптацию генетического материала растений к условиям органического земледелия. Исследователи сравнивали традиционные методы ведения сельского хозяйства с органическими на двух соседних полях, используя одинаковые почвенные и климатические условия.

Уникальное полевое испытание DOK в Швейцарии, продолжающееся с 1978 года, показало, что органические системы земледелия обеспечивают 85% от обычного урожая при значительных экологических преимуществах. Органические почвы содержат на 16% больше гумуса и до 83% более активные почвенные организмы, что положительно сказывается на структуре почвы. Биодинамическая система земледелия показала наилучшие результаты по плодородию почвы, содержанию гумуса и воздействию на климат.

Современные методы анализа почвенной микробиологии. Метагеномные технологии в почвоведении

Метагеномика – революционный подход к изучению почвенных микроорганизмов, позволяющий анализировать генетический материал всех членов микробного сообщества. Метагеномный анализ определяет статус микробиоты и позволяет оценивать биомаркеры для сравнения состава микробиома. Современные технологии высокопроизводительного секвенирования позволяют анализировать крупные объёмы генетической информации.

Развитие «мета-омик» включает исследование метагенома, метапротеома и метаболома почв – пулов ДНК, РНК, белков и метаболитов, содержащихся в почве. Метагеномика определяет потенциальные свойства и функции целого сообщества микроорганизмов. Анализ ферментативной активности позволяет оценивать интенсивность биохимических процессов в почве.

Ферментативная активность как показатель здоровья почвы

Ферментативная активность почвы – важнейший показатель её здоровья и плодородия. Ферменты участвуют в разложении органических остатков, образовании гумуса, фиксации азота и формировании защитных механизмов почвы. Оптимальная температура для большинства ферментов почвы составляет 20–30 °С, а оптимальный pH – 6,0–7,0.

Все ферменты классифицированы в шесть основных классов: оксидоредуктазы, трансферазы, гидролазы, лиазы, изомеразы и лигазы. Содержание органического

вещества, температура, влажность и pH почвы – основные факторы, влияющие на ферментативную активность.

Инновационные технологии в современном земледелии. Точное земледелие и цифровые технологии

Точное земледелие – принцип гибкого управления технологиями выращивания сельскохозяйственных культур для получения максимального урожая наилучшего качества. Угодья оценивают и обрабатывают не гектарами, а отдельными участками земли с учётом неоднородности всходов, вегетации, влажности и продуктивности почвы.

Современные агротехнологии включают географические информационные системы GIS, системы глобального позиционирования GPS, дистанционное зондирование земли и технологии оценки урожайности. Эти технологии обеспечивают фермерам возможность с высокой точностью выполнять полевые работы, что способствует повышению урожайности и снижению затрат.

Умное сельское хозяйство и IoT-технологии

Умное сельское хозяйство основано на внедрении IoT, датчиков, БПЛА, GPS и автоматизирующих систем в процесс получения сельскохозяйственной продукции. Smart-датчики измеряют влажность и температуру почвы, объёмное содержание воды в почве, температуру, влажность и давление воздуха. Беспроводные датчики используют нелицензируемую сеть LoRaWAN для передачи данных с полей.

Искусственный интеллект в сельском хозяйстве позволяет оптимизировать производство и улучшить качество продукции. Компьютерное зрение позволяет с высокой точностью выявлять признаки заболеваний растений, автоматически отбирать зрелые плоды и классифицировать сорняки.

Биологические методы защиты растений и управления плодородием. Современные биологические средства защиты

Биологические методы защиты растений основаны на использовании естественных врагов сельскохозяйственных вредителей – энтомофагов. Наибольшую известность получил метод «наводнения» с использованием насекомых из рода трихограмма. Каждая самка трихограммы может отложить до 40 яиц, период развития которых составляет около 20 дней.

Современные биологические средства включают хищных клещей, полезных нематод и микроорганизмы. В США биологический метод защиты используется на 8% посевных площадей, а в Китае применение биологических средств позволило снизить использование химических пестицидов при возделывании хлопка на 90%.

Микоризные технологии и биологическая фиксация азота

Микориза – эволюционно сложившийся симбиоз между грибом и корнем растения. Микоризные симбиозы способствуют улучшению питания растений и повышению их устойчивости к неблагоприятным условиям. Использование микоризных инокулянтов увеличивает усвоение питательных веществ растениями на 30%.

Азотфиксация – важный сельскохозяйственный процесс, позволяющий трансформировать атмосферный азот в доступные для растений формы. Биологическая азотфиксация – более экономичный и экологичный вариант по сравнению с внесением минеральных удобрений. Азотфиксирующие культуры предотвращают эрозию почвы, повышают плодородие при использовании в качестве сидератов и удерживают влагу в грунте.

No-Till и минимальная обработка почвы

No-Till технология предполагает нулевое или минимальное нарушение почвенного покрова. Особенности концепции нулевой культивации включают минимальное нарушение почвы техникой, мульчирование, сохранение пожнивных остатков и чередование культур в севообороте. Земледелие по технологии no-till экономит ресурсы, повышает плодородие, предотвращает эрозию почвы и повышает урожайность культур.

Традиционная обработка вызывает эрозию почвы, разрушает почвенный покров, вызывает дисбаланс в микробообществах и высвобождает почвенный углерод в воздух. No-till технология позволяет сохранить от 15% до 25% почвенной влаги.

Современные удобрения и их влияние на почвенную микробиологию. Жидкие комплексные удобрения

Исследования сравнительной эффективности жидких комплексных удобрений показали их равноценность или даже большую эффективность в сравнении с твёрдыми формами минеральных удобрений. В системе удобрения озимой пшеницы жидкие комплексные удобрения вносят в дозе, рекомендованной по фосфору, с дополнительным внесением азота в виде подкормки.

Хелатные удобрения и микроэлементы

Органохелатная форма жидких комплексных удобрений даёт высокую усвояемость полезных веществ – 90% и более. В состав комплексных удобрений входят азот, калий, фосфор, кальций, сера, магний, железо, цинк, медь, марганец, бор и молибден. Хелатирующие агенты способствуют быстрому и полному проникновению полезных элементов во все части растения.

Вермикомпостирование и биогукус

Современные технологии получения биогукуса включают вермикомпостирование с использованием дождевых червей «Красный калифорнийский гибрид». В качестве субстрата применяют смесь торфа и подстильного соломистого навоза в соотношении 1:4 по массе при влажности 75–80%. Вермикомпостирование осуществляют в течение 3–4 недель при температуре +20...+25 °C.

Внесение культуры микофильного целлюлозолитического гриба *Trichoderma viride* позволяет получить биогукус с высокими защитными свойствами и ростостимулирующей активностью.

Экологические технологии очистки и восстановления почв. Фиторемедиация

Фиторемедиация – комплекс методов очистки грунтов с использованием зелёных растений. Основные механизмы включают ризофилтрацию, фитоэкстракцию,

фитоволатилизацию, фитостабилизацию, фитодеградацию и фитостимуляцию. Главную роль в деградации загрязнений играют микроорганизмы, а растение создаёт для них среду обитания.

Карбоновое земледелие и секвестрация углерода

Секвестрация углерода подразумевает улавливание и хранение углекислого газа для предотвращения его выброса в атмосферу. Биологическая секвестрация происходит благодаря фотосинтезу, когда растения поглощают CO_2 из атмосферы и сохраняют углерод в своей биомассе. Леса становятся обширными поглотителями углерода, эффективно изолируя его из атмосферы.

Цифровизация углеродных рынков позволяет фермерам фиксировать объём связанного углерода в почве и продавать углеродные кредиты. Системы с искусственным интеллектом отслеживают и анализируют углеродный след хозяйств.

Таблицы

Таблица 1. Сравнение органического и интенсивного земледелия

Параметр	Органическое земледелие	Интенсивное земледелие
Урожайность	85 % от интенсивного	100 % (базовый уровень)
Затраты на удобрения	Низкие (органические удобрения)	Высокие (минеральные удобрения)
Экологическое воздействие	Минимальное	Значительное
Содержание гумуса в почве	На 16 % выше	Снижение при использовании только минеральных удобрений
Активность почвенных микроорганизмов	До 83 % более активные	Снижена из-за химических препаратов
Биоразнообразие	Высокое	Низкое
Устойчивость к эрозии	Высокая	Повышенный риск
Энергозатраты	Средние	Высокие
Рентабельность	Стабильная долгосрочная	Высокая краткосрочная

Таблица 2. Современные технологии в земледелии

Технология	Область применения	Эффективность
Точное земледелие	Дифференцированное внесение удобрений и семян	Снижение затрат на 20–30 %
No-till технология	Минимальная обработка почвы	Сохранение влаги на 15–25 %
Биологическая защита растений	Контроль вредителей энтомофагами	Снижение пестицидов до 90 %
Метагеномный анализ почвы	Оценка микробиома почвы	Точная диагностика за 24–48 часов
Smart-датчики почвы	Мониторинг влажности и температуры	Оптимизация полива на 40 %
Микоризные препараты	Улучшение питания растений	Увеличение усвоения питательных веществ на 30 %
Нанотехнологии в удобрениях	Точечная доставка питательных веществ	Повышение усвоения до 90 %
Фиторемедиация	Очистка загрязнённых почв	Очистка почвы на 70–95 %

Таблица 3. Влияние различных типов удобрений на почвенную микробиологию

Тип удобрения	Влияние на микробиом	Ферментативная активность	Долгосрочный эффект
Органические (навоз, компост)	Увеличение разнообразия на 40–60 %	Повышение на 25–45 %	Устойчивое улучшение структуры
Минеральные азотные	Снижение активности на 20–30 %	Снижение при длительном применении	Возможная деградация при избытке
Биоудобрения с микроорганизмами	Повышение активности на 50–80 %	Стимуляция специфических ферментов	Формирование устойчивого микробиома

Жидкие комплексные удобрения	Сбалансированное воздействие	Стабилизация активности	Поддержание плодородия
Хелатные удобрения	Улучшение метаболизма микроорганизмов	Активация металл-зависимых ферментов	Предотвращение дефицитов микроэлементов
Микоризные инокулянты	Увеличение симбиотических связей	Усиление фосфатной активности	Долгосрочное улучшение питания растений

ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ТРАКТА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЯ С КОНВЕЙЕРНОЙ АРХИТЕКТУРОЙ

Д.В. Люлява, Н.А. Дуксин, И.И. Дуксина, Д.С. Потехин

РТУ МИРЭА

Введение

Трансцендентные функции находят широкое применение в различных областях инженерной и научной деятельности: начиная, от цифровой обработки сигналов до криптографических методов, задач управления и пр. Особенной актуальностью пользуются задачи повышения эффективности реализации аппаратных вычислителей на основе рассматриваемых алгоритмов в условиях высокой скорости обработки, ограниченных ресурсов, необходимости в повышенной точности вычислений и т.д.

Анализ сигналов представляет собой фундаментальную область науки и техники, которая находит широкое применение в различных сферах человеческой деятельности. Одной из важнейших областей применения трансцендентных функций в этом ключе является вейвлет-преобразование при помощи модифицированной вейвлет-функции Морле. С помощью вейвлет-функций можно определять амплитуду, частоту и фазу гармонических сигналов [1], производить обработку сигналов доплеровского сдвига частоты [2], фильтрацию, подавление зеркального канала, демодуляцию в системах связи [3], а также акустические измерения [4].

Модифицированная вейвлет-функция Морле в аналитическом виде приведена в формуле 1.

$$\psi(\tau) = (\cos 2\pi f_0\tau + j \cdot \sin 2\pi f_0\tau) \cdot e^{-\frac{(2\pi f_0\tau)^2}{k}}, \quad (1)$$

где f_0 – центральная частота; k – коэффициент затухания; j – мнимая единица.

Соответственно, для вычисления значения функции критически необходимо получать значения тригонометрических функций синуса и косинуса, а также экспоненциальной функции, которые в свою очередь являются трансцендентными.

Одним из наиболее эффективных методов аппаратного вычисления трансцендентных функций является алгоритм CORDIC (Coordinate Rotation Digital Computer). Особенностью метода является тот факт, что он способен производить вычисления с использованием исключительно операций сложения и сдвига на основе заданной таблицы коэффициентов. Алгоритм основан на поэтапном приближении к требуемому значению путём последовательного вращения вектора на заданные углы.

Алгоритм находит применение в вычислительных системах, построенных на базе программируемых логических интегральных схем, поскольку, в сравнении с другими существующими алгоритмами, для его размещения на кристалле требуется задействовать меньше аппаратных ресурсов, при этом вычислительная логика может быть реализована на основе компонентов логических ячеек без необходимости задействования специализированных блоков.

Алгоритмическая структура CORDIC позволяет использовать конвейерную архитектуру вычислителей для реализации ускорителей. Структурированный набор стадий конвейерного вычислителя, в котором все стадии следуют друг за другом в строго фиксированном порядке, а каждая стадия соответствует этапу вычисления алгоритма, представляет собой архитектурный паттерн, для которого путём изменения латентности может быть повышена тактовая частота работы устройства, при этом с определённого момента через каждый такт на выходе появляются новые данные.

Разработка вычислительных систем производится в пределах трёх основных этапов маршрута проектирования специализированных вычислителей (рис. 1). Для конвейерных вычислителей актуальной задачей на системном уровне становится разбиение комбинационной логики вычислителя между стадиями конвейера с целью балансировки задержек и увеличения показателя максимальной тактовой частоты работы устройства. Так или иначе расчёты ведутся на основе сведений о задержках базовых элементов аппаратной платформы для реализации.

При этом физическая модель размещения может обладать иными показателями, нежели логическая модель, причина этого кроется в необходимости учёта топологии кристалла. Процесс размещения, как правило, осуществляется с применением алгоритмов глобальной оптимизации, которые в свою очередь являются эвристическими, вследствие чего характеристики итогового варианта размещения не могут быть точно предсказаны заранее. В общем смысле задача размещения и трассировки для любых вариантов специализированных вычислителей не может быть решена в силу математической сложности, однако, ограничиваясь архитектурным паттерном конвейера, может быть применён способ размещения, учитывающий особенности выбранной архитектуры.



Рис. 1. Маршрут проектирования специализированных вычислителей

Подход к оптимизации топологического представления конвейеров

Предлагаемый подход к размещению конвейерного вычислителя подразумевает близкое расположение стадий вычислителя друг относительно друга при сохранении регулярности исходной структуры [5]. При этом рекомендация состоит в фиксировании положения регистровых элементов стадии в соответствии с порядком их следования, оставляя всякий раз участок кристалла, достаточный для размещения комбинационной логики стадии между регистровыми элементами. Такой подход позволяет снизить влияние трассировки на итоговые показатели задержки.

Апробация подхода

Для апробации предложенного подхода был разработан набор RTL-представлений вычислителя на базе алгоритма CORDIC, учитывающий разное разбиение комбинационной логики между стадиями вычисления. В качестве целевой аппаратной платформы использовались ПЛИС компании AMD, в частности, Virtex серии UltraScale. Основной предлагаемой метрикой для оценки полученных результатов выступает показатель

Worst Negative Slack (WNS). Также для оценки решения могут использоваться статистические критерии на основе центральных моментов.

Ниже приведён ряд примеров, демонстрирующих работу предложенного подхода. На рис. 2 представлен результат размещения 32-стадийного вычислителя тремя способами с ограничением предельной тактовой частоты в 1 ГГц. Первый представленный способ использует стратегию размещения в САПР Vivado «Performance_Explore», второй и третий варианты используют предложенный подход. Стоит также отметить, что последний вариант имеет дополнительное перекрытие областей размещения стадий в 20 %. Результат оценки согласно метрике Worst Negative Slack (WNS) представлен на рис. 3. Как видно из графика, применение подхода существенно сокращает величину задержки трассировки при неизменной величине задержки на элементах, причём вариант, использующий перекрытие стадий, показывает лучшие характеристики вследствие возможности распределения комбинационной логики встроенными алгоритмами размещения и трассировки более компактно.

Стоит заметить, что внесение изменений в топологическое представление вычислителя в соответствии с описываемым подходом способствует увеличению среднего значения показателя Slack, о чём можно сделать на основе изменения показателя математического ожидания (рис. 4). В свою очередь изменение показателя асимметрии относительно начального математического ожидания указывает на смещение путей из области с минимальным показателем Slack в область с большим показателем Slack, что способствует увеличению максимальной тактовой частоты работы вычислителя.

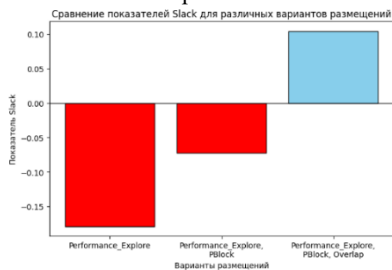


Рис. 3. Сравнение показателей Slack для различных вариантов размещения

Отдельно был проведён эксперимент по размещению двух 32-стадийных вычислителей на базе алгоритма CORDIC на одном кристалле AMD Virtex UltraScale. При этом конкретное разбиение по стадиям конвейера производилось исходя из различных вариантов периода синхросигнала. График представлен на рис. 6.

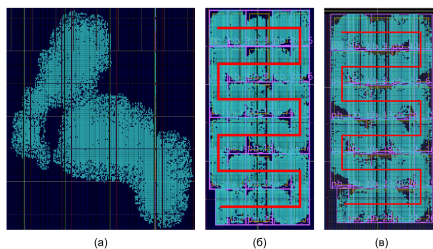


Рис. 2. Результаты размещения вычислителя при стратегии «Performance_Explore» (а), с применением методики оптимизации (б) и перекрытия стадий (в)

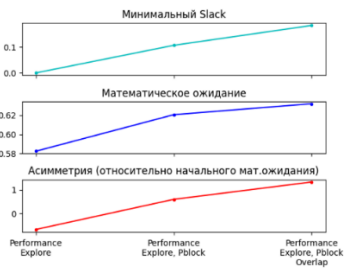


Рис. 4. Характеристики распределения временных запасов

Хаотичное распределение точек, относящихся к варианту “Performance Explore” соответствует выдвинутому предположению о невозможности прогнозирования характеристик вычислителя в таком случае. В свою очередь варианты, полученные при применении подхода, могут быть аппроксимированы прямой, что говорит о возможности предсказания итоговых характеристик вычислителя на основе логической модели.

Заключение

Таким образом, применение предложенного подхода позволяет добиться улучшения временных характеристик конечного решения, что в свою очередь способствует росту предельной тактовой частоты работы устройства. Помимо этого, можно отметить увеличение степени прогнозируемости характеристик вычислителя на основе данных о его логическом представлении с учётом применения описанного подхода к размещению.

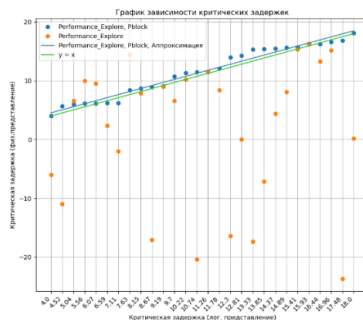


Рис. 6. График зависимости критической задержки на уровнях представления вычислителя

- [1] Потехин Д.С. Интегральный метод восстановления векторной диаграммы в системах цифровой обработки данных [Текст] / Д.С.Потехин // Системы управления и информационные технологии. 2011. № 2. 1(44). С. 161.
- [2] Потехин Д.С., Тетерин Е.П., Тарасов И.Е. Применение вейвлет-анализа к обработке доплеровского сигнала // Материалы научно-технической конференции «Управление в технических системах» – Ковров, 1998. С. 74.
- [3] Потехин Д.С., Карпенко А.С. SDR радиомодем с использованием технологии перепрограммируемых СнК и аппаратного вейвлет-фильтра [Текст] // Вооружение. Технология. Безопасность. Управление: материалы III научно-технической конференции аспирантов и молодых ученых. В 3 ч. Ч. 2. – Ковров: ГОУ ВПО «КГТА имени В. А. Дегтярева», 2008. С. 212.
- [4] Потехин Д.С., Тетерин Е.П., Тарасов И.Е. Применение вейвлет-анализа к обработке акустического сигнала // Тезисы докладов 1 всероссийской научно-технической конференции «Компьютерные технологии в науке, проектировании и производстве», 3-4 февраля 1999 г. – Н. Новгород, 1999. Ч. 4. С. 9.
- [5] Дуксин Н.А., Люлява Д.В. Применение подходов к размещению тракта обработки данных с целью повышения тактовой частоты работы специализированного вычислителя // Новые информационные технологии в научных исследованиях. // Материалы XXIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 27–29 ноября 2024 года. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, 2024. С. 88.

ИЗОХРОННОСТЬ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ СЕТЕВОЙ СТРУКТУРЫ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ВЕКТОРНЫМ ВЫЧИСЛИТЕЛЕМ

Д.А. Пальгугев

ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Введение

Информационные системы сетевой структуры востребованы и актуальны во многих областях, в частности в области мониторинга воздушного пространства для сбора и обработки информации от пространственно-разнесенных некогерентных источников. Исследования характера параллельных вычислительных процессов, происходящих в подобных системах, использующих распределенный векторный вычислитель, позволили выявить системную особенность – изохронность характера измерений, и определить основные требования, предъявляемые в связи с ней, к быстродействию и своевременности обработки радиолокационной и разнородной информации о воздушных объектах в системах мониторинга воздушного пространства.

Феноменологическая модель информационной системы сбора, обработки и обмена информацией сетевой структуры о прогнозируемых процессах дискретными датчиками-измерителями

Для изучения особенностей распределенных вычислительных процессов в информационных системах сетевой структуры, применяемых для сбора и обработки информации при мониторинге воздушной обстановки, воспользуемся феноменологической моделью информационной системы сбора, обработки и обмена информацией сетевой структуры о прогнозируемых процессах дискретными датчиками-измерителями (рис. 1, [1]). На рис. 1 в феноменологической модели выделены области применения распределенного векторного вычислителя (РВВ). Вместе с тем, при более детальном рассмотрении процессов измерения параметров воздушных объектов датчиками-измерителями (например, на рис. 1 ДИ-1 – Процесс 1, ДИ-1 – Процесс 2), не входящих в область применения распределенного векторного вычислителя, выявляются некоторые особенности именно процессов измерения, которые имеют существенное влияние на последующую обработку.

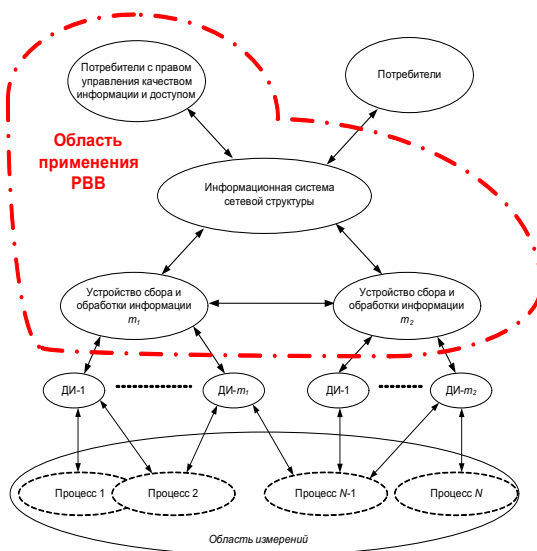


Рис. 1

Выводы

Процессы измерения положения воздушных объектов в системах мониторинга воздушного пространства имеют признаки изохронности, т.е. требования проведения измерений и вычислений в распределенной системе в достаточно четко определяемые временные промежутки. Если измерения, вычисления и последующая обработка информации проводятся без соблюдения выявленных особенностей, происходит резкое уменьшение достоверности информации, она может быть значительно задержана во времени и внести существенные искажения при объединении её с информацией от других источников. Требование по соблюдению изохронности в связке процессов измерения и последующей обработки может быть использовано при разработке и оценке эффективности информационных систем сетевой структуры, предназначенных для применения в системах мониторинга воздушного пространства.

- [1] Пальгусев Д. А. Сочетание алгоритмов обработки информации и структуры информационной системы как инструмент построения информационной системы сетевой структуры // Радиопромышленность. 2021. Т. 31, № 2. С. 49.
- [2] EUROCONTROL/ Информационный ресурс https://www.eurocontrol.int/library/search?keywords=ASTERIX&sort_by=search_api_relevance (дата обращения 27.04.2024)

УЧЕТ РЕДУКЦИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВОЗВЫШЕНИЯМИ НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Ю.М. Скрябин, Д.С. Потехин

РТУ МИРЭА

Введение

В настоящее время проблема обнаружения малых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является актуальной. Одним из способов по увеличению вероятности их обнаружения является объединение средств разведки различной физической природы [1]. Выделяют следующие средства разведки:

- радиолокационные средства разведки на основе отраженных от цели радиоволн;
- радиотехнические средства разведки на основе собственного радиоизлучения БПЛА;
- пассивные и активные оптические средства разведки, в том числе с использованием излучения ИК-диапазона;
- пассивные акустические средства разведки на основе звукового шума от цели.

Также существует идея об использовании электростатических средств разведки, которая основана на измерении в нескольких точках земной поверхности вариаций квазиэлектростатического поля, вызываемых перемещением трибозлектростатического заряда, несомого целью, перемещающейся в атмосфере. Данные средства разведки потенциально эффективны для обнаружения низколетящих целей, пересекающих охраняемый периметр, и по своим характеристикам сопоставимы с акустическими средствами разведки. Важными преимуществами электростатического метода является пассивность и возможность обнаруживать БПЛА, передвигающихся в режиме радиомолчания. Преимуществом электростатического метода обнаружения перед акустическим является невосприимчивость к движению воздушных потоков, а также возможность детектирования БПЛА самолетного типа, двигающихся в режиме планирования [2].

Однако экспериментально проверена только возможность использования электростатического метода. Сам алгоритм предложен в статье [2], однако он применим только для равномерно движущихся целей над ровной поверхностью. Существуют еще математические модели для расчета электростатического поля для морской поверхности с периодическими волнами [3]. Настоящее исследование предлагает математическую модель для модернизации алгоритма для поверхности с отдельным возмущением типа холм.

Математическая модель

Общий способ решения задачи электростатики с учетом вариаций поверхностного потенциала (ПП) осуществляется на основе уравнения Пуассона через расчет потенциалов. Для численного решения задачи с граничными условиями в этом случае важен нулевой потенциал на поверхности Земли и в полусфере, ограничивающей пространство нашей задачи (имитация бесконечности), и рассчитанный потенциал в малой сфере, окружающей БПЛА. Но данное решение требует особой аккуратности в разбивке пространства на конечные элементы или конечные разности и требует высоких вычислительных ресурсов.

Способом решения, который не требует высоких вычислительных мощностей, является метод зеркального отображения. Его суть заключается в том, что индуцированный заряд на проводниках можно задать при помощи системы фиктивных зарядов, расположенных под земной поверхностью. Если поверхность ландшафта окажется эквипотенциальной, то замена окажется адекватной в соответствии с уравнением Пуассона:

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}, \quad (1)$$

где ρ – объемная плотность заряда; φ – потенциал.

В самом деле, в соответствии с уравнением (1) если поверхность Земли эквипотенциальна, то решение задачи электростатики над поверхностью при нулевой плотности заряда будет единственным и верным. Фиктивные заряды располагаются под поверхностью, поэтому для интересующей нас области они не приводят к изменению решения относительно истинного. Им необходимо лишь задать верную эквипотенциальную поверхность Земли.

Строго говоря, использовать данный метод решения для конкретного ПП довольно сложно. Однако это не является целью численной модели. Численная модель должна произвести имитацию пролета БПЛА в некоторой местности, имеющей локальное искажение плоскости. Такое искажение требует возможности изменения в пределах ограниченного количества степеней свободы, но не более того. Численная модель должна использоваться для отработки алгоритмов адаптации анализирующей функции к пролету БПЛА над конкретной местностью, исходя из набора измерений, полученных при пробных полетах БПЛА. Считается, что если алгоритм будет правильно работать при ограниченном множестве вариантов ПП, то он применим и для более общего множества.

Для реализации численной модели предполагается следующее: все заряды, включая истинный заряд БПЛА, образуют диполи с центром на высоте 0 и электрическим моментом, направленным вверх. Таким способом обеспечивается эквипотенциальная поверхность на нулевой высоте вне области локального отклонения от плоскости ПП, который для краткости назовем «холмом».

Первоначально задача решается двумя видами диполей. Главный диполь образован зарядом БПЛА и фиктивным зарядом под поверхностью ПП. Этот диполь определяет решение электростатической задачи для бесконечной плоскости. Также в задаче будут присутствовать четыре диполя возмущения, расположенные по разные стороны от центра «холма», расположенного в $x = 0$ и $y = 0$. Ось x направлена к центру главного диполя. Ось z направлена вверх. Структура расположения диполей представлена на рис. 1.

Диполи 2 и 2' равны друг другу плечами и электрическими моментами так же, как и диполи 3 и 3'. Кроме того, данные пары расположены симметрично относительно оси x . Это обеспечивает симметрию «холма» относительно оси x . Для обеспечения симметрии холма относительно оси y диполи 3 и 2 уже не должны быть равны.

Для того, чтобы численная модель могла просчитать полет БПЛА необходимо определить уравнения, связывающие параметры диполей возмущения с параметрами главного диполя при условии неизменности эквипотенциальной поверхности.

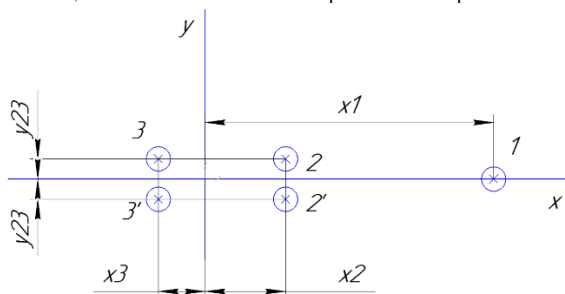


Рис. 1

Результаты

На основе описанной математической модели были разработан алгоритм расчета параметров диполей, который позволяет рассчитать квазистатическую задачу поля для каждой вариации расположения БПЛА относительно центра холма. Пример эквипотенциальной поверхности, построенной от диполей, расположенных согласно рис. 1, приведен на рис. 2.

Стоит обратить внимание, что все «холмы» были получены на примере заданного форм-фактора, то есть моделируемые «холмы» обладают отвесными стенами и по до-

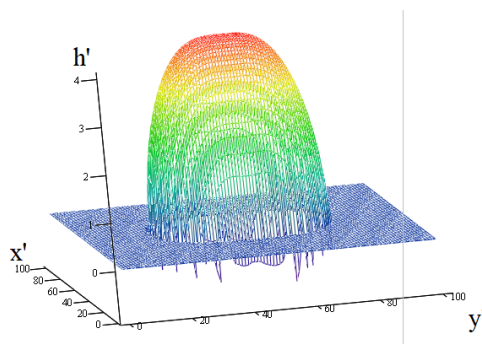


Рис. 2

стижению нулевой высоты резко переходят в плоскость. На границе перехода холма в плоскость наблюдаются резкие перегибы из-за погрешности расчета потенциала. Для моделирования «холмов» других форм необходимо изменить количество диполей и их ориентацию.

- [1] Макаренко С. // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 109.
- [2] Скрябин Ю.М., Потехин Д.С. // Труды МАИ. 2019. № 105. С. 1.
- [3] Ластовецкий А.Е. // Вестник Концерна ПВО Алмаз-Антей. 2015. № 3. С. 70.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ НА БАЗЕ МАССОВО-ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

И.Е. Тарасов

РТУ МИРЭА

При обработке сигналов, подверженных воздействию импульсных помех, часто возникает задача восстановления характеристик сигнала с минимальным влиянием помехи. Импульсный характер помех затрудняет использование методов фильтрации, основанных на применении устройств с заданной амплитудно-частотной характеристикой, вследствие широкой спектральной характеристики одиночного импульса. На практике применение цифровых фильтров сталкивается с невозможностью точно указать частотные диапазоны для подавления составляющих помехи.

Альтернативным вариантом является применение вероятностных методов оценки характеристик сигнала, при котором гипотезы о характеристиках сигнала оцениваются с точки зрения вероятности того, что идеализированный источник сигнала при наложении помех мог бы сформировать имеющуюся экспериментальную выборку цифровых отсчетов.

В качестве примера в статье рассмотрен анализ линейных зависимостей, которые априорно предполагаются в анализируемых экспериментальных данных. При этом применение регрессионного анализа для определения параметров линейной функции считается затрудненным ввиду действия импульсных помех. В работе [1] в качестве иллюстрации негативного действия помех сложного вида приведен т.н. квартет Энскомба, представляющий собой 4 набора экспериментальных данных, представляющих собой функции различных видов, которые, тем не менее, имеют одну и ту же регрессионную функцию $y = 0,5x + 3$.

Рассмотрим функцию расстояния между экспериментальной точкой с координатами $(X; Y)$ и сгенерированным представлением прямой с направляющими косинусами $(p_x; p_y)$, смещенной перпендикулярно вектору $(p_x; p_y)$ на расстояние ρ . Согласно уравнению прямой, это расстояние определяется как:

$$R = p_y X - p_x Y - \rho. \quad (1)$$

Если ввести критерий качества приближения в виде функции, принимающей максимальное значение при равенстве нулю расстояния между пикселем и сгенерированным представлением линии, то поиск набора параметров прямой может быть произведен путем максимизации критерия (2):

$$S(\vec{a}) = \sum_{X,Y} f(X, Y, \vec{a}), \quad (2)$$

где $\vec{a}$ – вектор параметров линии.

Использование в качестве функции качества приближения нормальное распределение (функцию Гаусса) позволяет трактовать (2) как количественную оценку вероятности того, что анализируемый набор экспериментальных данных принадлежит прямой с заданным вектором параметров, отклоняясь от нее по гауссовскому закону. В

этом случае параметр σ распределения Гаусса представляет собой характеристику дисперсии, предполагаемой для источника данных.

На рис. 1 представлены результаты анализа квартета Энскомба предложенным методом. Видно, что при умеренном значении $\sigma = 1$ максимизация вероятностного критерия наблюдается вблизи ожидаемых положений прямых.

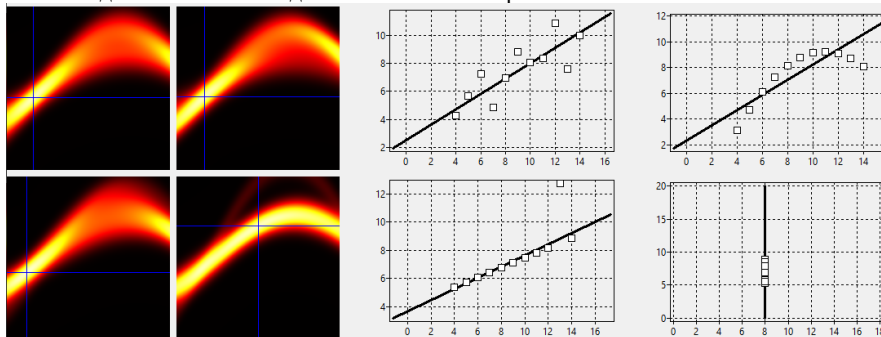


Рис. 1. Результаты анализа квартета Энскомба предложенным методом

Таким образом, рассматриваемый метод, основанный на синтезе гипотез о наличии параметров функции и оценке вероятности этих гипотез, предполагает вычисление согласно (2) для множества наборов векторов параметров. Это предполагает большой объем вычислений, который может быть сокращен за счет применения существующих алгоритмов поиска экстремумов в многомерном пространстве параметров, однако в общем случае требует решения задачи обеспечения большого объема вычислений.

Можно отметить независимость вычислений для отдельных наборов параметров, что позволяет использовать массово-параллельные вычислительные структуры. Наличие единственного источника данных облегчает реализацию интерфейсов ввода-вывода, поскольку такая система не предусматривает использования дополнительных данных, читаемых из внешней памяти. Для линейной функции вычисления согласно (1) может быть выполнено локальными вычислительными узлами, в том числе с заданием функции распределения в виде таблицы. Структурная схема специализированного вычислительного устройства для определения параметров приближающей зависимости показана на рис. 2.

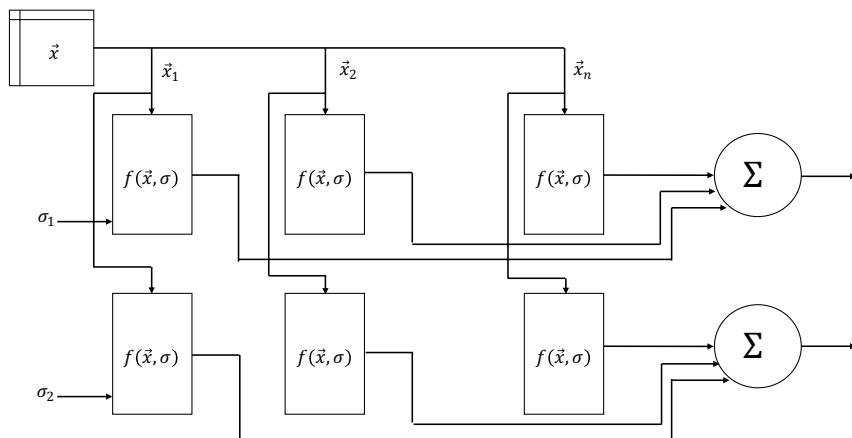


Рис. 2. Структурная схема специализированного вычислительного устройства для определения параметров приближающей зависимости

Представленный метод статистического анализа позволяет восстанавливать параметры функций известного вида для сигналов, подверженных действию импульсных помех.

[1] Anscombe F.J. // American Statistician. 1973. Vol. 27, no. 1. P. 17.

РАЗЛОЖЕНИЕ НА ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЫ В АНАЛИЗЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИГНАЛОВ НА ПРИМЕРЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

К.К. Пухкий, М.А. Лысов, А.М. Трыкин, Е.П. Васильев, В.Е. Турлапов

ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Введение

Метод разложения на эмпирические моды (empirical mode decomposition, EMD), был предложен в 1998 году как инструмент анализа нелинейных нестационарных сигналов [1]. Метод был поначалу одномерным (1D-EMD), но быстро завоевал популярность не только в обработке 1D-сигналов, но и в обработке трехмерных гиперспектральных изображений (HSI), где спектральная характеристика каждого пикселя рассматривалась как нелинейный нестационарный сигнал. Этот интерес особенно укрепился, когда вскоре появилась двумерная версия метода (2D-EMD), позволившая использовать также пространственные признаки объектов в каждом спектральном канале в случае сегментации спектрально неразличимых объектов. Экспериментальной базой стала серия открытых HSI, полученная первым авиационным гиперспектрометром AVIRIS [2] (диапазон 366-2500нм, 224 канала, разрешение 17.5м), которая актуальна до настоящего времени.

Обработка HSI имеет существенную специфику. Аппаратная точность гиперспектрометров составляет порядка 10^{-5} , что требует двухбайтового представления данных. Но влияние атмосферы, через которую проходят лучи отраженные от Земли, вносит заметные искажения, которые известные специалисты дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) оценивают в 2-5% (Landgrebe, 1999) [3], является источником шума. Известна и высокая коррелированность соседних каналов HSI, которая является прямым следствием их спектральной близости (3-10 нм), и аддитивное наложение рэлеевского рассеяния на спектр отражения объектов подстилающей поверхности Земли. На этой основе возникает желание считать HSI избыточными и в десятки раз понизить их размерность [3], используя метод главных компонент (PCA). В ряде публикаций первые моды классического 1D-EMD разложения (от одной до трех) рассматриваются как избыточно зашумленные и отбрасываются, в то время как эти же моды считаются несущими основную часть пространственной информации. Сообществом ощущается недостаточная разработанность инструментария анализа HSI, необходимость развития банка новых открытых HSI, размеченных для классификации, что констатирует подробный обзор публикаций по обработке HSI 2017 года [4].

Однако, в публикации [5] 2025 года в приоритете так же осталось улучшение качества сигнала гиперспектральной визуализации путем удаления шума, используя первую компоненту PCA, независимо от содержания критерия качества и того, информация какого частотного диапазона связана с этим критерием. Целью нашей публикации является поиск лучшей для HSI из трех модификаций метода 1D-EMD, включая нашу, путем анализа их свойств и сравнения возможностей.

1 Модификации EMD и данные HSI

Со времени появления классической EMD было предложено порядка 10 типов модификаций, главной целью которых было повышение производительности разложения для длинных временных рядов. Естественным решением для этих целей является отказ от сплайнов в пользу скользящего окна при вычислении низкочастотного остатка, представленный в статье [6] (2014). Мы также, кроме классического EMD, будем использовать нашу модификацию [7] (2020) со скользящим окном, но она будет иметь целью не повышение производительности, а повышение объема информации скрытой в пикселях HSI отражения объектов подстилающей поверхности.

В результате разложения сигнала $f(t)$ на эмпирические моды (ЕМ) мы должны получить:

$$f(t) = r(t) + \sum_{i=1}^N \varphi_i(t), \quad (1)$$

где $\varphi_i(t)$ – intrinsic mode function (IMF) или empirical mode (EM) i -го порядка; N – число мод в разложении; $r(t)$ – остаточный тренд. Заменим непрерывное t на дискретное j . В нашем случае это номер частотного канала и $j \in [1, J]$. Тогда эмпирическая мода i -го порядка $\varphi_i(j)$ в классическом варианте 1D-EMD:

$$\varphi_i(j) = f(j) - R_i(j), \text{ где } R_i(j) = (U_f + L_f)/2 \quad (2)$$

То есть, i -й низкочастотный остаток $R_i(j)$ вычисляется как среднее между сплайновыми огибающими максимумов U_f и минимумов L_f функции $f(j)$.

Важной составляющей алгоритма является проверка основных требований к $\varphi_i(j)$:
1) количество экстремумов моды (n) на рассматриваемом интервале ($n = n_{max} + n_{min}$), отличается от количества переходов этой функции через 0 (n_{zeros}) не более, чем на единицу, то есть $|n - n_{zeros}| \leq 1$;

2) сумма $\varphi_i(j)$ по интервалу равна нулю или почти нулю: $\sum_{j=1}^J \varphi_i(j) \approx 0$.

После стартового шага с $i = 1$, присваиваем $f(j) = R_i(j)$, $i = i + 1$. Далее повторяем (2), с проверкой выполнения к $\varphi_i(j)$, до выполнения условия образования тренда: если у очередной моды оказалось $n \leq 3$, то она становится трендом.

В нашей модификации 1D-EMD вместо (2) вводится расчет $R_i(j)$ со скользящим окном:

$$R_i(j) = \frac{1}{w} \sum_{k=j-w/2}^{k=j+w/2} f(k), \quad \varphi_i(j) = f(j) - R_i(j), \quad j \in [1, J]. \quad (3)$$

Далее при условии $n > 3$ вычисляется ширина скользящего окна на следующем шаге w . Для выбора w реализовано 2 варианта. Вариант А – адаптивный, выполняется независимо для каждого HSI-пикселя, по умолчанию стартовая величина $w=3$:

$$w = 2[d/2] + 1, \text{ где } d = \min(d_{min}, d_{max}). \quad (4)$$

И вариант В – степенной:

$$n > 3, \quad w = 2^i + 1. \quad (5)$$

Рассмотренные выше 3 модификации EMD исследуются далее на двух гиперспектральных изображениях (HSI), обладающих наибольшим спектральным разнообразием. Это HSI, известные как «Moffett Field» (рис. 1), с водно-болотным заповедником внутри города и «Cuprite97» (рис. 2), горный участок богатый минералами, снятые спектрометром AVIRIS.



Рис. 1



Рис. 2

На рис. 1 показаны точки снятия спектров характерных объектов: 1 – растительность; 2 – бетон; 3 – глинистая почва; 4 – вода на фарватере; 5 – вода на мелководье; 6 – соль. На рис. 2 дана тематическая раскраска, в которой каналы 172 (1,989 мкм), 187 (2,139 мкм) и 202 (2,288 мкм) показаны как R, G и B, чтобы выделить гидротермально измененные породы. По сиреневому цвету можно увидеть, что эти породы подсвечены в 172 (более) и 202 каналах.

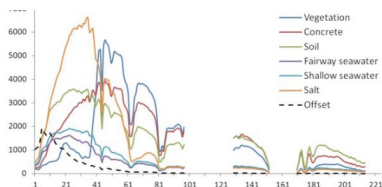


Рис. 3

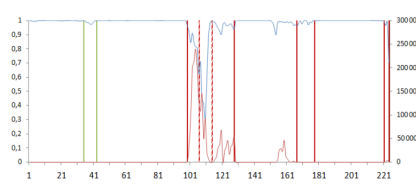


Рис. 4

На рис. 3 показаны спектральные характеристики объектов, размеченных на рис. 1 и смещение спектра Offset из-за Рэлеевского рассеяния, которое будет вычтено до выполнения EMD. Ниспадающая огибающая максимумов спектров обусловлена поглощением в верхних слоях атмосферы и получила название «континуум». Совпадающие ровалы в спектрах вызваны поглощением света в нижних слоях атмосферы. Из спектральных характеристик удалены участки с максимальным шумом из-за почти полного поглощения лучей атмосферой. На рис. 4 показаны графики коэффициента корреляции Пирсона между соседними каналами HSI (синяя кривая, левая шкала) для HSI "Moffett Field" и количество шумовых пикселей, имеющих отрицательные значения яркости в канале (красная кривая, правая шкала). Зона наибольшего шума в центре диапазона выделена красными вертикальными линиями. Синяя кривая коэффициента корреляции Пирсона почти всюду близка к единице, исключая отдельные узкие участки, наиболее

интересным из которых является участок в окрестности канала 40, выделенный зелеными вертикалями. Это зона резкого роста и доминирования отражения от растительности на границе красного и инфракрасного (IR), известная как Red-Edge. Выше 170 канала видны небольшие колебания, связанные со свойствами почв и минеральной составляющей.

2 Экспериментальное исследование

Наиболее интересными нам представляются первые, самые высокочастотные моды. На рис. 5 показаны три первых моды для морской воды (образец 4). На рис. 6 показано поведение первой моды для всех 6 объектов.

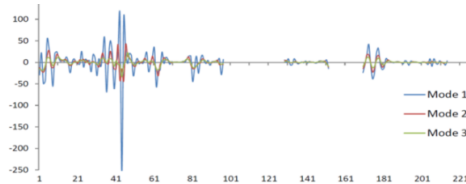


Рис. 5

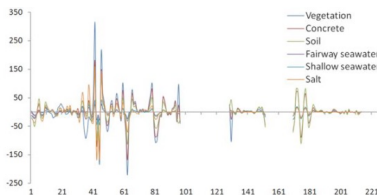


Рис. 6

Оценим далее на примере трех первых мод образца воды коэффициент корреляции Пирсона (рис.7–9): 1) между каналами исходного HSI и каналами 1-3 каждой моды (EM); 2) между каналами каждой пары из 3-х EMs; 3) между соседними каналами внутри каждой из трех мод, а также среднеквадратическое отклонение мод (рис. 10).

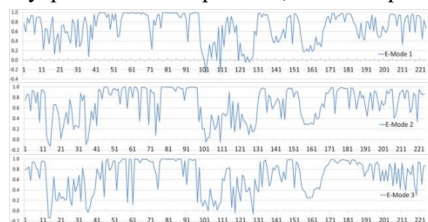


Рис. 7

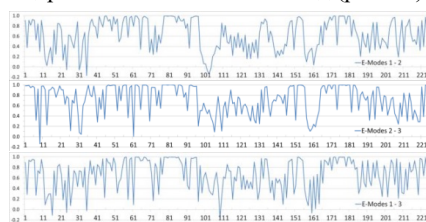


Рис. 8

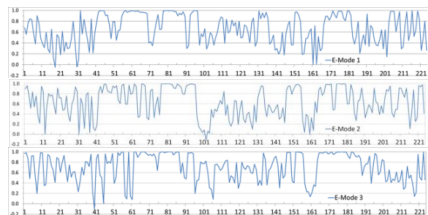


Рис. 9

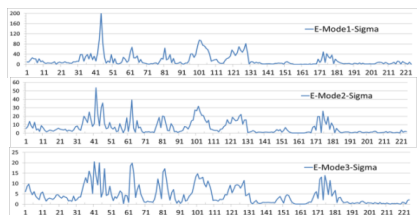


Рис. 10

Из графиков рис. 7 следует, что корреляция между каналами HSI и мод 1-3 в целом невысокая (колеблется относительно уровня 0.5), в видимой области она существенно ниже, чем в IR. У 3-й моды ниже, чем у 1-й и 2-й. Из рис. 8 следует, что корреляция

между соседними модами 1-3 чуть ниже (на 0,1) чем на рис. 7, и между соседями чуть выше, чем через моды. Между соседними каналами внутри мод (рис. 9) характер корреляции сохраняется. Для всех трех рисунков в ближнем IR (42-97 и 170-190 каналы) она вырастает и местами доходит почти до единицы.

Из рис. 10 видно, что на графиках среднеквадратического отклонения EMs прослеживается влияние континуума.

Для оценки возможности использования эмпирических мод для семантической сегментации поставлен эксперимент по расчету матриц кросскорреляции для 16 классов объектов (рис. 11, 12).

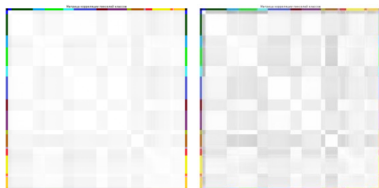


Рис. 11

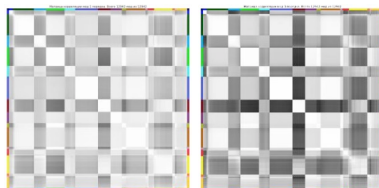


Рис. 12

Рис. 11 – кросскорреляция для исходных сигнатур HSI Moffett Field и для них же, но без рэлеевского рассеяния. Рис. 12 – кросскорреляция классов для 1 и, правее, для 3 моды. Как видно, объекты, принадлежащие одному классу, отчетливо выделяются ярким квадратом на диагонали. Для идентификации анализируемых классов, по контуру каждой матрицы нанесена раскраска близкая к цвету класса на семантической сегментации фрагмента HSI Moffett Field (рис. 13–14). Семантическая сегментация дана в виде цвета пикселей изображения канала 40 трех мод (1-2-3), используя моды в качестве RGB каналов. На рис. 13 показан 40 канал исходного HSI. Однородно серые области на рис. 11 оказываются достаточно контрастно разделены по цвету на рис. 12.

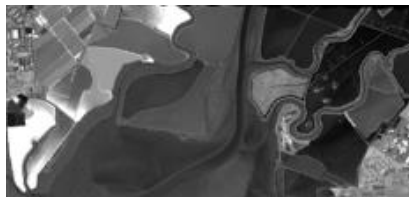


Рис. 13

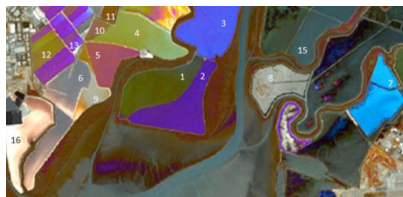


Рис. 14

Для подобной сегментации могут быть использованы почти любые тройки мод, причем для всех трех рассматриваемых модификаций EMD. Главное условие эффективности сегментации – минимальная коррелированность участвующих мод. В качестве одной из мод может быть выбрано исходное HSI, что будет способствовать улучшению качества изображения, если другие моды зашумлены. Для подавления шума в модах HSI, из которого не удалены зашумленные каналы, для всех трех вариантов EMD оказывается эффективным предварительное сглаживание скользящим окном. Экспериментально выбрана ширина сглаживающего окна $w = 7$.

Исследована связь размера скользящего окна с номером моды i , для каждого пикселя HSI при разных стартовых w на примере HSI Cuprite97 [8]. Связь выражена в итоге величинами, характеризующими HSI в целом (6). В формуле (6): k – это номер пикселя, принадлежащего HSI; w_k – минимальный размер окна для k -го пикселя; i – номер эмпирической моды.

Результат показан на рис. 15, где по оси X показана шкала для номера моды разложения, по оси Y в логарифмическом масштабе показана шкала w .

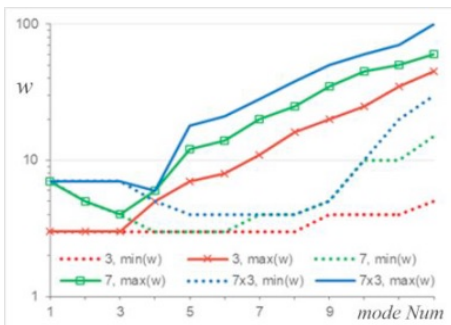


Рис. 15

$$w_{min}(i) = \min_{k \in HSI} (w_k, i), \quad w_{max}(i) = \max_{k \in HSI} (w_k, i). \quad (6)$$

Исследованы 3 режима старта: 1) $w = 3$ – красные кривые; 2) $w = 7$ – зелёные кривые; 3) $w = 7$ трижды – синие кривые. На первых 3 шагах разложения кривые $w_{max}(i)$ и $w_{min}(i)$ совпадают для всех трех случаев. Начиная с 4 моды они начинают расходиться, увеличивая потенциальное разнообразие значений w на множестве пикселей HSI. Это разнообразие мы отображаем в виде трех карт ширины окна (w -maps) HSI. Уже 5-я мода дает диапазон изменения $w \in [3, 19]$, который далее с номером моды увеличивается к 12-той моде до $w \in [3, 100]$. Отображение этих трех w -maps как тройки RGB каналов также предлагается использовать как объективный инструмент анализа и классификацией HSI, связанный со свойствами отражения солнечного света объектами HSI. Пример, отдельных 3 карт и цветной сегментационной карты показан на рис. 16: распределения значений w в пятой моде, для вариантов старта: $w=3$; $w=7$; $w=7 \times 3$ (слева-направо, в желто-синей палитре); соответствие каналам: BGR.

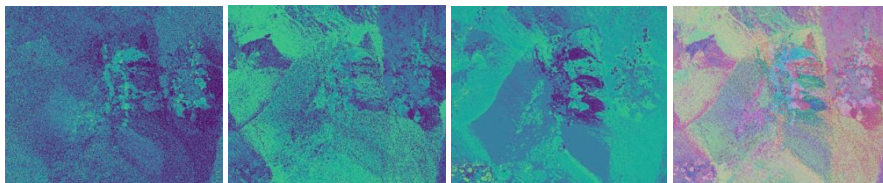


Рис. 16

Примеры семантической сегментации для HSI Cuprite97 путем использования трех эмпирических мод показаны на рис. 17. Слева-направо: 1) RGB-оцвечивание 15 канала 1,2,3 мод классического [1] алгоритма 1D-EMD; 2) GRB-оцвечивание 4,5,6 мод 15 канала, модификация (3)(4) алгоритма; 3) RGB-оцвечивание 3,4,5 мод 15 канала (окна = 3,5,9 после предварительного сглаживания 7×3), модификация (3)(5). 4) лучшая RGB-визуализация тройки каналов HSI, полученная в системе TNTmips (USA) инструментом Minimum Noise Fraction transform (MNF) с удалением континуума [8];

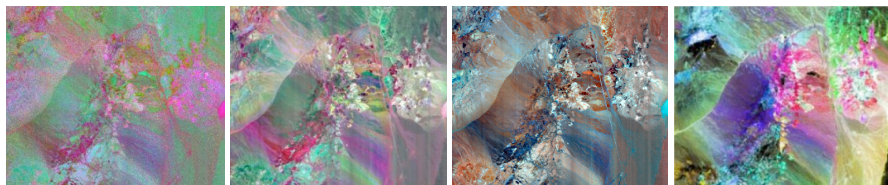


Рис. 17

Заключение

На примере HSI Moffett Field и Cuprite97 исследованы две модификации метода разложения на эмпирические моды 1D-EMD [1]. Модификация 1 включает: 1) вычисление локального среднего путем усреднения адаптивным скользящим окном; 2) параметр w – ширина скользящего окна сглаживания сигнала при расчете R_i , связан с физическими свойствами отражающего объекта, и 3) вычисление локального среднего при выходе окна за границу диапазона; 4) возврат к размеру окна меньшему стартового; 5) подавление шума в модах путем выбора стартового окна и кратности его применения. Данный вариант показал: 3-4 кратное увеличение числа мод в разложении по сравнению с классическим; предварительное сглаживание уменьшает число мод на 2-3 моды. Исследованы 3 режима старта EMD, с ширины окна $w=3$; $w=7$; трижды $w=7$. Тройки мод EMD являются эффективным инструментом семантической сегментации. Тройки карт w –maps, как и тройки мод, оцвеченные как RGB-каналы, являются инструментом анализа и классификации HSI. Модификация 2 - модификация с детерминированной шириной окна $w = 2^l + 1$ увеличивает число мод в разложении в 1.5 раза по сравнению с классическим.

Работа выполнена при поддержке Министерства экономического развития Российской Федерации (соглашение о предоставлении гранта № 139-15-2025-004 от 17 апреля 2025 г., ИГК 0000000Ц313925P3X0002).

- [1] Huang N.E. // Proc. R. Soc. London 1998. A 454. 93 p.
- [2] AVIRIS dataportal (<http://aviris.jpl.nasa.gov/dataportal/>)
- [3] Landgrebe D. // Purdue University, West Lafayette. 1999. 30 p.
- [4] https://www.lars.purdue.edu/home/references/LTR_121099.pdf
- [5] Ghamisi P. et al. // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. 2017. Vol. 5, no. 4. P. 37, doi: 10.1109/MGRS.2017.2762087.
- [6] Zhou J. et al. // Improvement of hyperspectral imaging signal quality using filtering technique. – Elsevier, 2025. 15 p. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2025.105386>
- [7] Stepien P. // EPJ Nonlinear Biomed Phys 2014. 2, 14. <https://doi.org/10.1140/epjnbp/s40366-014-0014-9>
- [8] Pahomov P. et al. // 2020 International Conference on ITNT, Samara, Russia, 2020, pp.1-5, doi: 10.1109/ITNT49337.2020.9253179.
- [9] Smith R.B. Analyzing Hyperspectral Images with TNTmips: Tutorial // MicroImages Inc. 2013. 40 p. <http://www.microima-ges.com/documentation/Tutorials/hypanly.pdf>

Секция «Физические основы и практическое применение технологий
беспроводной связи и информационно-телекоммуникационных технологий»

Заседание секции проводилось 14 мая 2025 г.
Председатель – А.Л. Умнов, секретарь – С.Б. Сурова.
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского