

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН

СЕМНАДЦАТАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ ОТКРЫТАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ
ИЗ КОСМОСА»

Техника снижения ранга неэрмитовости оператора деконволюции изображения высокого разрешения для коррекции его спектрального представления

Винтаев В.Н. (1), Жиленев М.Ю. (2), Ушакова Н.Н. (1)

(1) Белгородский университет кооперации, экономики и права, Белгород, Россия

(2) АО «Корпорация «ВНИИЭМ»», Москва, Россия

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ) в рамках научного проекта № 18-07-00201 «Разработка фундаментальных основ мягкого системного анализа и моделирования систем формирования и верификации космических изображений высокого и сверхвысокого разрешения по данным с группировок орбитальных аппаратов в неопределенных и предельно допустимых условиях орбитальных съемок».

Тракт дистанционного зондирования

- ▶ Тракт дистанционного зондирования (ТДЗ) при обработке изображения определяется оптимизированной, с возможным приближением к квазипрямоугольной форме огибающей поверхности, частотно контрастной характеристикой (ЧКХ), определяемой первично на наблюдаемом и «бесконечно мало» возмущенном том же изображении с усиленными верхними модами пространственно-частотного спектра (ПЧС) без достижения эффекта контрастирования, нередко принимаемого визуально за улучшение поддерживаемого разрешения.

Деконволюция и конволюция изображения для учета возмущений

- ▶ С учетом развиваемой в ряде работ технологии цифровой деконволюции сформированных постфактум изображений с целью коррекции или даже реанимации резкости и поддерживаемого изображениями пространственного разрешения на ареале изображения рассматриваются как элементы конечномерного комплексного Гильбертова пространства с определенными в пространствах операторами конволюции и деконволюции (спектральное представление (СП) последнего нередко имеет запись в виде формулы Винера-Тихонова и ее модернизаций и продолжается в итеративной форме до формул вида Ван Циттера) и процесс формирования изображения представляется процессом конволюции изображения (гипотетического), обратным процессу, порождаемому оператором деконволюции наблюдаемого изображения (одна из форм конволюции - уравнения Фредгольма для регистрируемого и восстанавливаемого изображений) (Винтаев, Ушакова, 2018).

ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ УСЛОВИЯ ОРБИТАЛЬНЫХ СЪЕМОК

- ▶ Предельно допустимые условия орбитальной съемки (ПДУОС) представляются возмущениями оператора конволюции изображения, создающими существенные подавления мод СП оператора деконволюции и, как следствие, предельно допустимо уменьшающие радиус ПЧС или достижения по его увеличению при восстановлении изображения (Макриденко и др., 2017).

ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ УСЛОВИЯ ОРБИТАЛЬНЫХ СЪЕМОК

- ▶ ПДУОС представляются аддитивными (и/или мультипликативными) возмущениями операторов конволюции мнимой составляющей в комплексном Гильбертовом пространстве. Этим нарушается свойство эрмитовости оператора, т.к. проекция его образа на изображение уже не является вещественным числом. Операторы конволюции и деконволюции кроме спектрального представления определяются и матрицей оператора.
- ▶ При обращении возмущенного с разложением в степенной ряд оператора конволюции (в соответствии с леммой Меррея о степенных рядах от операторов) выделяется оператор возмущения оператора деконволюции, т.е. мнимая составляющая, матрица которого имеет ранг неэрмитовости, связанный именно с диссипацией энергии на обрабатываемом изображении, а, следовательно, с диссипацией и его информативности. Образы оператора деконволюции рассматриваемые до его возмущения по размерности соответствуют его рангу, образы оператора мнимого возмущения также соответствуют рангу неэрмитовой добавки, но на изображении и те и другие как аппликаты (отсчеты) отображаются их модулями.

ТРУДНОДОКАЗУЕМОЕ АНАЛИТИЧЕСКИ ПОЛОЖЕНИЕ

- ▶ То, что диссипативная часть информации в тракте зондирования может отображаться на изображении, хорошо демонстрируют смазы, из-за действия которых порождаются или преобразуются некоторые аппликаты части или всего образа объекта в диссипативную часть информации, расширяя в целом в направлениях смазов апертуру образа несуществующими на гипотетическом изображении аппликатами.
- ▶ На последующих трех слайдах приведена описанная ситуация с различной степенью различимости отсчетов, относимых к диссипативной части информации, смешиванию которой с интерпретируемой информацией препятствует мнимость оператора диссипативной добавки, что не мешает строить операторы конволюции и деконволюции на полных объемах данных, используя их модульное представление.

СМАЗ С МИНИМАЛЬНОЙ СТЕПЕНЬЮ РАЗЛИЧИМОСТИ



«СМАЗ» БОД ПРИБЛИЖЕНИЯ

СМАЗ С ДОСТАТОЧНОЙ СТЕПЕНЬЮ РАЗЛИЧИМОСТИ



→
Направленный «смаз» / размытие

СМАЗ С ПДУОС



«Смаз» от вибраций(флаттера)

НЕОБХОДИМОСТЬ СНИЖЕНИЯ РАНГА НЕЭРМИТОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ОПЕРАТОРА ДЕКОНВОЛЮЦИИ

- ▶ Целесообразно принять исходное положение: сумма диссипативной энергии на изображении и энергии, свободно интерпретируемой в доступную информацию в ТДЗ, синтезированном для данного изображения инвариантна.
- ▶ Физический смысл необходимости снижения ранга неэрмитовой составляющей оператора деконволюции: ранг матрицы этого оператора соответствует размерности образа оператора, а размерность образа исчисляется в количестве независимых (ортогональных) отсчетов на изображении. Снижение их числа в комплексном Гильбертовом пространстве - это снижение части энергии (суммы квадратов отсчетов), ассоциируемой с диссипацией для данного изображения.
- ▶ С подавлением смазов уменьшается радиус корреляции на изображении, т.к. уменьшается средняя и максимальная апертуры образов объектов.

ПЕРЕХОД К ФОРМУЛЕ ВИНЕРА-ТИХОНОВА

- ▶ Определяемая по опорным ориентирам функция рассеяния точки (ФРТ) требует пополнения спектрального портрета до оптимизированной частотно-контрастной характеристики $ЧКХ_o(\omega_i, \omega_j)$. Заменяя 2D-Фурье спектр $F(\text{ФРТ})$ на $H(\omega_i, \omega_j)$, т.е. на спектр ФРТ с неполнотой покрытия диапазона частот задачи числитель и знаменатель в инверсном фильтре домножим на $H^*(\omega_i, \omega_j)$ (* - символ комплексного сопряжения) и, добавляя аддитивно в знаменатель «умеренно» подавляющий верхние моды ПЧС изображения параметр регуляризации $\rho(\omega_i^2 + \omega_j^2)^{1/2}$, получим используемый широко в коррекции резкости модифицированный фильтр Винера-Тихонова как СП оператора деконволюции H_M^{-1}

ОПЕРАТОР ДЕКОНВОЛЮЦИИ В СПЕКТРАЛЬНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ С ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМОЙ ДОБАВКОЙ

- Формула Винера-Тихонова с частотно-зависимой добавкой, определяемой методом согласования спектрального представления оператора деконволюции с оптимизированной ЧКХ ТДЗ:

$$F(S_y) = F(S_x) \left(H^*(\omega_1, \omega_1) \left(|H(\omega_1, \omega_1)|^2 + \alpha(\omega_1^2 + \omega_1^{-2})^{1/2} \right) + \nu(\omega_1, \omega_1) \right) = F(S_x) (H_{\text{в}}^{-1} + \nu)$$

ОПЕРАТОР КОНВОЛЮЦИИ КАК ОБРАТНЫЙ ОПЕРАТОРУ ДЕКОНВОЛЮЦИИ В СПЕКТРАЛЬНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ

$$\text{Conv}S = 1/(F(S_R)(H_M^{-1} + \nu))$$

СПЕКТРАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОПЕРАТОРА КОНВОЛЮЦИИ С ВОЗМУЩЕНИЕМ НА ПДУОС

$$\text{Conv}1S = \frac{1}{F(S_R)(H_M^{-1} + \nu)} + JF(A\mu(x, y)),$$

где J – мнимая единица,

F – Фурье-представление,

A – оператор искажения,

μ – функция Кронекера

ПОЛУЧЕНИЕ ИТОГОВОЙ ФОРМУЛЫ -
СПЕКТРАЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ
ОПЕРАТОРА ДЕКОНВОЛЮЦИИ С
ВОЗМУЩЕНИЯМИ НА ПДУОС ОПЕРАТОРА
КОНВОЛЮЦИИ ФОРМИРУЕМОГО
ИЗОБРАЖЕНИЯ

$$Deconv1S = \left(\frac{1}{F(S_R)(H_M^{-1} + \nu)} + JF(A\mu(x, y)) \right)^{-1}$$

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЗНАЧЕНИЯ РАНГА ДИССИПАТИВНОГО ОПЕРАТОРА

- ▶ Для преобразований значений ранга оператора отметим, что ядра интегральных операторов и их передискретизированные версии инициируют одну и ту же операцию, но с разными рангами операторов. Например, ядро интегрального оператора с отсчетами $(1, -1)$ в первой строке может придать оператору ранг 2 и вычисляет по строке дифференциал, а ядро с отсчетами $(1, 1, 1, 1, -1, -1, -1, -1)$ в первой строке может придать оператору ранг 8 и также вычисляет дифференциал по строке на усредненном изображении по окрестности выбранной точки. Операции класса усреднения так или иначе выполняются, т.к. при любой описываемой обработке космические изображения нормализуются (преимущественно в соответствии с соотношением Коши-Буняковского), где и присутствует операция деления образа оператора на соответствующий коэффициент.

РЕАЛИЗАЦИЯ ДИССИПАТИВНОГО ОПЕРАТОРА

- ▶ Для изображения фрагмента г. Тампа интегральный оператор диссипации реализуется с ядром в виде маски, повторяющей имеющиеся тени и перемножаемой на функцию принадлежности тени к соответствующим областям изображения - на символ Кронекера с заданными координатами. Ранг оператора снижается интерполяционным пересчетом элементов матрицы оператора в сетку с вдвое (или другое число раз) прореженными узлами расположения элементов новой матрицы. Снижается ранг итеративно на фоне минимизации возмущения инвариантности образа оператора, т.е. результата описанной выше основной операции, выполняемой исходным оператором.
- ▶ На изображениях высокого разрешения аппарата QuickBird с достаточно темными тенями от строений (фрагмент г. Тампа, штат Флорида, США) представлена модель технологии снижения ранга неэрмитового (с комплексными или чисто мнимыми собственными значениями) оператора деконволюции - возмущающей и согласованной с ПДУОС добавки к базовому оператору деконволюции (с вещественными собственными значениями).
- ▶ В работе рассматриваются модели ПДУОС: существенное падение освещенности (или радиометрического разрешения), появление на изображении достаточно контрастных теней, возникновение высокоэнергетической и неинвариантной к трансляциям функции рассеяния точки.
- ▶ В докладе представлена работа с ПДУОС в виде контрастных теней.

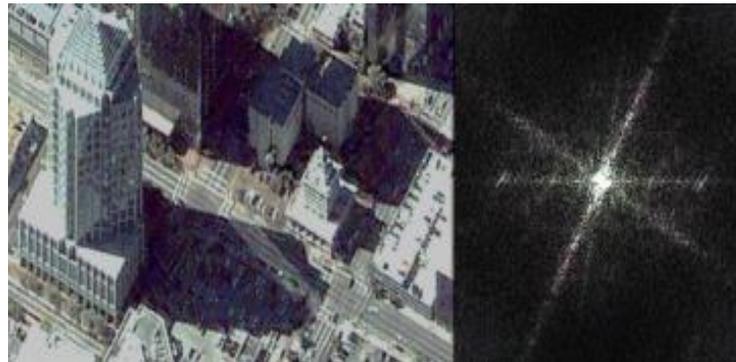
Обработка изображения с учетом
диссипативной составляющей:
QuickBird_tampa_dwntn_psh_60 sm.bmp
исходный фрагмент и его ПЧС



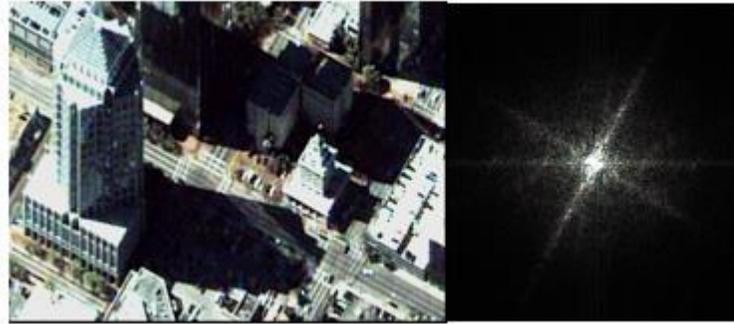
QUICKBIRD_TAMPA_DWNTN_PSH_ 60 SM.ВМР С
ДЕКОНВОЛЮЦИЕЙ ПРИ ОПТИМИЗИРОВАННОЙ ЧКХ
ТРАКТА ОБРАБОТКИ (РАДИУС ПЧС УВЕЛИЧЕН В 1,8
РАЗА, ЧТО СООТВЕТСТВУЕТ ПОТЕНЦИАЛУ
РАЗРЕШЕНИЯ, БЛИЗКОМУ К 33 СМ ПО ФУКО)



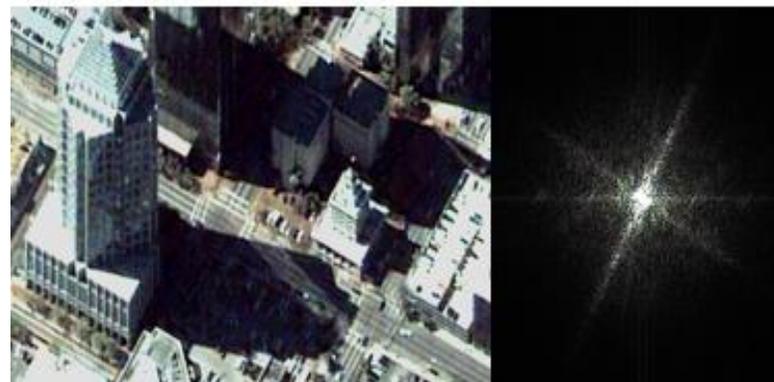
QUICKBIRD_TAMPA_DWNTN_PSH_60 SM.ВМР С
ДЕКОНВОЛЮЦИЕЙ ПРИ ОПТИМИЗИРОВАННОЙ ЧКХ ТРАКТА
ОБРАБОТКИ И УЧЕТЕ НЕЭРМИТОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ
ОПЕРАТОРА КОНВОЛЮЦИИ СО СНИЖЕННЫМ В 3 РАЗА
РАНГОМ (РАДИУС ПЧС УВЕЛИЧЕН ДОПОЛНИТЕЛЬНО В 1,3
РАЗА, ЧТО СООТВЕТСТВУЕТ ПОТЕНЦИАЛУ РАЗРЕШЕНИЯ ,
БЛИЗКОМУ К 22,5 СМ ПО ФУКО)



QuickBird_tampa_dwntn_psh_60 sm.bmp с деконволюцией при оптимизированной ЧКХ тракта обработки и учете неэрмитовой составляющей оператора конволюции со сниженным в 1,5 раза рангом (радиус ПЧС увеличен дополнительно в 1,2 раза, что соответствует потенциалу разрешения, близкому к 28 см по Фуко)



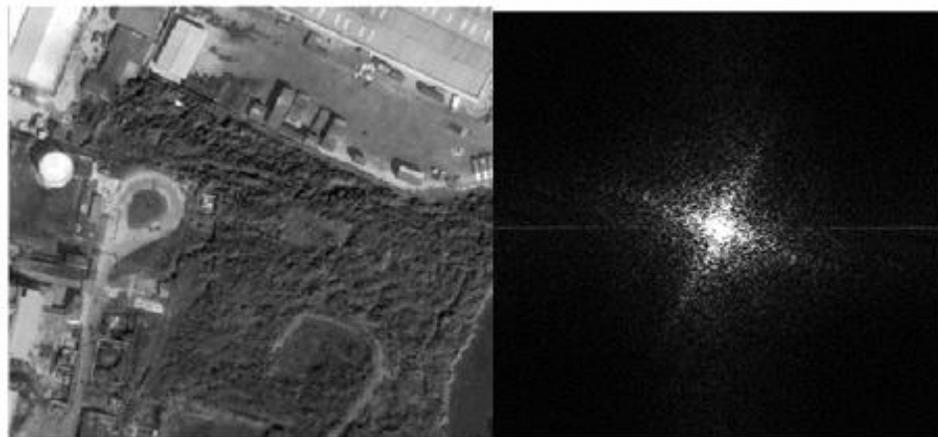
QUICKBIRD_TAMPA_DWNTN_PSH_60 SM.VMP С ДЕКОНВОЛЮЦИЕЙ ПРИ ОПТИМИЗИРОВАННОЙ ЧКХ ТРАКТА ОБРАБОТКИ И УЧЕТЕ НЕЭРМИТОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ОПЕРАТОРА КОНВОЛЮЦИИ СО СНИЖЕННЫМ В 2 РАЗА РАНГОМ (РАДИУС ПЧС УВЕЛИЧЕН В 1,3 РАЗА, ЧТО СООТВЕТСТВУЕТ ПОТЕНЦИАЛУ РАЗРЕШЕНИЯ, БЛИЗКОМУ К 28 СМ ПО ФУКО)



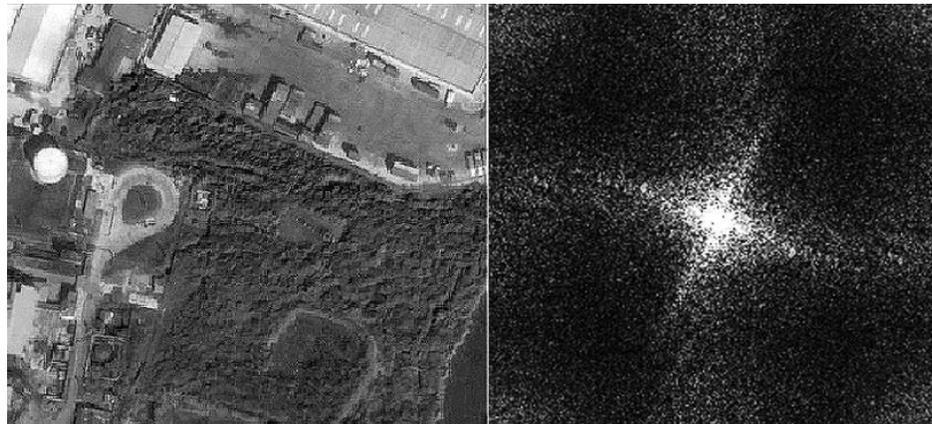
МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОЧЕВИДНЫХ ПДУОС

- ▶ Разработанная технология рекомендуется в достаточно сложных (для визуального восприятия) случаях ПДУОС, когда приходится, например, для выявления диссипативного оператора привлекать модели рассеяния световых потоков в спектральных представлениях на ареалах в приближениях Кирхгофа, приближениях возмущений или в двухмасштабных приближениях, что отражено на фрагментах космических изображений высокого разрешения QuickBird - Havana - industry - image - chip -- 0.6 m: сравнение ПЧС до и после применения моделей рассеяния на неоднородностях показывает потери в модах ПЧС из-за воздействия ПДУОС

QUICKBIRD_HAVANA_INDUSTRY_IMAGE_CHIP-0.6 м И ЕГО ПЧС: РЕЗУЛЬТАТ АДАПТИВНОЙ ДЕКОНВОЛЮЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ



QUICKBIRD_HAVANA_INDUSTRY_IMAGE_CHIP-0.6 м И ЕГО ПЧС
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА КИРХГОФА ДЛЯ КОРРЕКЦИИ
ОПЕРАЦИИ УЛУЧШЕНИЯ РЕЗКОСТИ С ВЫПОЛНЕНИЕМ
НЕОБХОДИМОЙ ДООБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- ▶ Оптимальное представление изображения (фрагмент г. Тампа, штат Флорида, США) соответствует снижению ранга оператора диссипации с ПДУОС по теням в два раза. При этом реализуется увеличение радиуса ПЧС в 1,3 раза с квазилогарифмическим видом кривой зависимости радиометрического разрешения от значений яркости.
- ▶ США в зондировании из космоса достигает разрешения на ареалах до 30 см исключительно средствами аппаратуры и обработки сформированных паттернов на аппаратах

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- ▶ Работая с постфактум сформированными изображениями следует заметить: по крайней мере оценки потенциала в достигаемом по ФУКО разрешении актуальны. При этом не всегда ясно, особенно в схемах со сверхразрешением при формировании на результирующем паттерне пикселей с вдвое или вчетверо меньшими апертурами, что в паллиативе соответствует вдвое или вчетверо улучшенному разрешению, позволяет ли ЧКХ имеющейся на аппарате оптики и преобразований сигналов в изображение не редуцировать достигнутые радиусы ПЧС и поддерживать соответствующую детальность снимков. Сложность построения схем обработки для сформированных изображений достаточно высока (по описаниям спутников класса SPOT в несколько порядков выше функций сложности бортовых операций).

ПОСТФАКТУМ: ИЗ ДОКЛАДА «РЕКУРСИВНЫЙ МЕТОД ПРОДОЛЖЕНИЯ СПЕКТРОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ СВЕРХРАЗРЕШЕНИЯ В МОДЕЛИ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ» ВИНТАЕВ В.Н., УШАКОВА Н.Н. ЗАПАДНО-СИБИРСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР. МАТЕРИАЛЫ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ 16 МАЯ 2019 Г.

- ▶ Следует учитывать связанную с качеством изготовления элементов оптики и методами учета и компенсации ухудшающих качество изображения факторов при формировании изображения ЧКХ аппаратуры формирования световых потоков (ЧКХ телескопа, например) КА. Если полоса полезной «прозрачности» ЧКХ невелика, то улучшение разрешения за счет параметра снижения апертуры пикселей может приводить только к уменьшению апертур пикселей на ареале с постоянством самого сюжета изображения и его детальности. Увеличение детальности возможно, по крайней мере, с начальной моды спада полезной «прозрачности» упоминаемой ЧКХ, если эта и последующие ее моды входят во множество мод, предшествующих вычисляемой по методу Фуко верхней пространственной частоты определяемой ЧКХ тракта.
- ▶ Используя в аппарате «Ресурс ДК» для сверхразрешения каналы 1 и 2, и параллельно 2 и 3 получаем с найденным субпиксельным сдвигом два изображения с потенциалом разрешения по строке в 50 см и на этих изображениях получаем далее вторым каскадом сверхразрешение по строке без присвоения цветовых кодов родительским изображениям, т.е. в панхроматическом режиме с потенциалом в 25 см - 30 см.
- ▶ Показано на рисунках с изображениями эксперимента с аппаратом «Ресурс ДК», что преодоление спада пропускной способности ЧКХ телескопа и формирующей изображение аппаратуры не было реализовано в полной мере, а именно: представление изображений в пикселях меньших по апертуре исходных пикселей в 2 и 4 раза получено, но детальность изображений для поддерживаемого разрешения (по Фуко) в 0,25 м не увеличена.

ЛИТЕРАТУРА:

- ▶ Винтаев В.Н., Ушакова Н.Н. Нетривиальная коррекция космических изображений высокого разрешения. Саарбрюккен, Германия: Lambert Academic Publishing, 2018. 208 с.
- ▶ Макриденко Л. А., Волков С. Н., Геча В. Я., Жиленёв М. Ю., Казанцев С. Г. Основные источники снижения качества изображений земли, получаемых при орбитальной оптической съёмке с борта МКА//Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2017. Т. 160. С. 3-19.

Все разработанные и отмеченные в презентации программные модули имеются на съемном диске - возможна демонстрация их работы с изображениями.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

МОСКВА, 2019