

# *ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН*

## **Шестнадцатая Всероссийская Открытая конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»**

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».

**Разработка рекурсивного метода продолжения спектров при реализации сверхразрешения с использованием изображений модели группировки космических аппаратов**

***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

## Исходные предпосылки

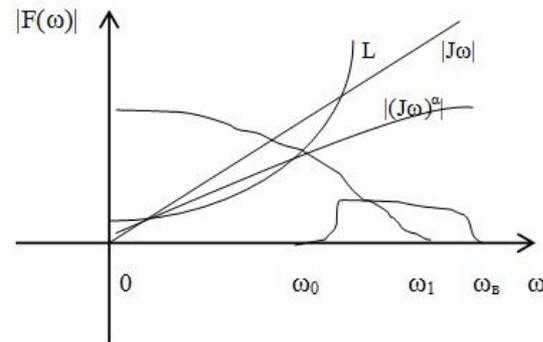
Методы продолжения спектров, в том числе методы аналитического продолжения могут служить средством коррекции резкости на космических изображениях, но **обладают недостаточно широким диапазоном коррекции. Модификация разработанного на основе аддитивной коррекции резкости итеративного метода продолжения спектра согласованием результатов этапов с требованиями отсутствия перерастания процедур коррекции в контрастирование изображения позволяет расширить диапазон значений коррекции резкости и использовать его в формировании изображений сверхвысокого разрешения в модели группировки спутников.**

**ПЕРЕРАСТАНИЕ в контрастирование в коррекции резкости объясняется спектральным представлением мажорирующего дифференциального оператора с нецелым порядком**

Цель работы: **Построение модели группировки аппаратов с формированием сверхразрешения на изображении ареала в тракте зондирования со спутника с коррекцией резкости методом продолжения спектров, согласованным с требованиями неконтрастирования изображения, т.е. согласования этапов метода с оптимизированной частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ) тракта**

# МОДЕЛЬ мажорирующего оператора , «Аддитивная коррекция ЧКХ тракта ДЗ для данного сформированного изображения» и объяснение перерастания в контрастирование

Выполнение контрастирования не увеличивает пропускную информационную способность тракта по сравнению с коррекцией разрешения



Главная часть спектрального представления градиентного оператора и деконволюции

В соответствии с возможностью компенсации провала ЧКХ тракта, используя  $grad_{\alpha\beta}(S)$  в виде  $grad_{\alpha\alpha}(S) = grad_{\alpha}(S)$  целесообразно реализовать коррекцию  $S_R$  в виде

$$S_{II} = S_R + a grad_{\alpha}(S_R)$$

с варьируемыми параметрами  $a$  и  $\alpha$ .

## СТАРТОВАЯ МОДЕЛЬ

Для отработки технологии работы с группировками спутников разработана стартовая модель формирования космического изображения сверхвысокого разрешения по изображениям спутниковой группировки, построенная на инспирированных из реальных космических исходных изображений высокого разрешения паттернах, соответствующих группировке спутников – нормализованных субпиксельно сдвинутых изображениях с разными функциями рассеяния точки и разными апертурами пикселей с использованием лидирующего для одиночных спутников метода сверхразрешения Iterative Back Projection (IBP)

# МЕТОД ИВР

Формулы итеративного метода ИВР:

$$S_{И}^{(n+1)} = S_{И}^{(n)} + \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K F_k^{-1}(L(S_{R_k} - S_{R_k}^{(n)}) * \Phi PT_k),$$

$$S_{И}^{(n+1)} = S_{И}^{(n)} + \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K F_k^{-1}(L(S_{R_k} - S_{R_k}^{(n)}) * \delta),$$

где  $S_{И}^{(n+1)}$  - следующая за  $n$ -ой итерация изображения со сверхразрешением;  $S_{И}^{(n)}$  -  $n$ -ая итерация изображения со сверхразрешением;  $F_k^{-1}$  - оператор проектирования инспирированных изображений на изображение со сверхразрешением;  $F_k$  - оператор проектирования изображения со сверхразрешением на инспирированные изображения;  $S_{R_k}$  - инспирированные изображения;  $S_{R_k}^{(n)}$  -  $n$ -ая итерация инспирированного  $k$ -го изображения;  $L$  - оператор увеличения изображений;  $\Phi PT_k$  - функция рассеяния точки на  $k$ -ом инспирированном изображении;  $\delta$  - ядро единичного преобразования или остаточная близкая к ядру единичного преобразования ФРТ;  $*$  - операция свертки;  $K$  - число инспирированных изображений.

# НОРМАЛИЗАЦИЯ

- При этом множество изображений одной и той же сцены могут быть получены одним из следующих способов :
- использование орбитальной группировки для съёмки исследуемого участка местности;
- использование последовательной съёмки объекта одним спутником за время пролёта района наблюдения;
- использование нескольких оптико-электронных преобразователей, расположенных в фокальной плоскости.

**Применение первых двух способов требует выполнения геометрического и яркостного согласования изображений, полученных различными системами или в разное время; в том числе необходимо выполнять согласования масштабов, динамических диапазонов цвето-яркостных представлений, углов поворотов изображений, осуществлять учет углов места солнца, выполнять ортотрансформирование и, таким образом, приводить изображения к нормализованному для сверхразрешения виду**

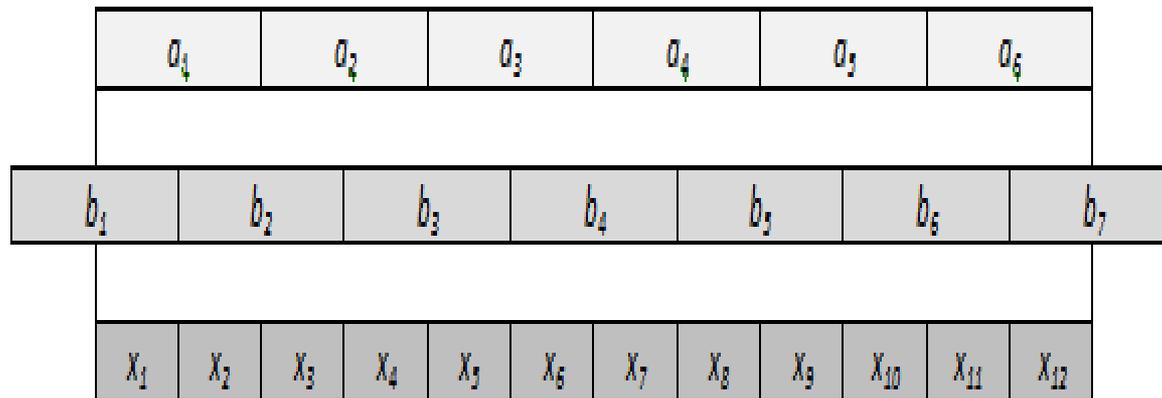
# Схематичная реализация свёрхразрешения в одномерном варианте и определение оператора F в методе ИВР по проектированию засветок пикселей

$$x_1 = b_1/2$$

$$x_1 + x_2 = a_1$$

$$x_2 + x_3 = b_2$$

....



# МОДЕЛЬ ГРУППИРОВКИ

На исходных изображениях высокого разрешения аппарата QuickBird (фрагмент г. Тампа, штат Флорида, США) построена модель группировки спутников с измеренными взаимными субпиксельными сдвигами: таких изображений одного и того же участка Земли получено два (в разное время) и выполнена нормализация обоих изображений с целью устранения невязок цветояркого портрета, геометрических параметров наблюдения поверхности и формирования изображения. **При этом во время тонкого совмещения по реперам изображений установлен субпиксельный сдвиг одного изображения относительно другого на север на  $1/3$  апертуры пиксела и на восток на  $1/5$  апертуры исходного пиксела.**

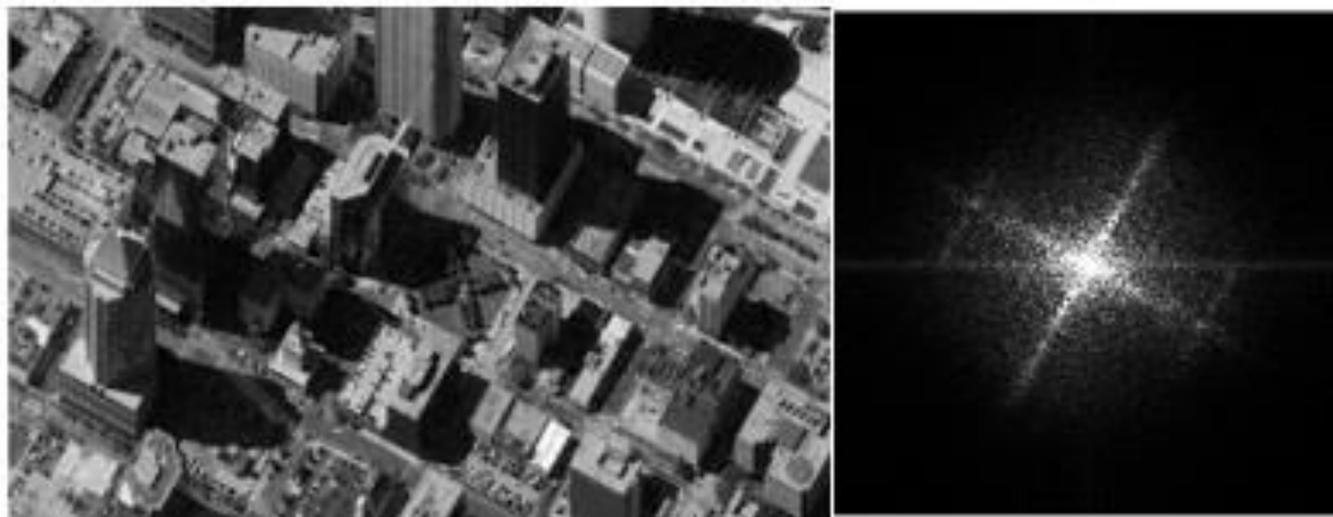
# ПРОБЛЕМА ИЗМЕРЕНИЯ СУБПИКСЕЛЬНОГО СДВИГА

Субпиксельный сдвиг изображений обнаружить и измерить в отличие от его реализации – нетривиальная задача. Сдвиг изображения на пиксел интуитивно понятен и измерим. А сдвиг на долю пиксела выполняется с соответствующей более частой дискретизацией (передискретизацией) и интерполяцией на «новые пикселы» значений «старых пикселов» изображения в окрестности  $2 \times 2$  или  $3 \times 3$  пикселов

# СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ СУБПИКСЕЛЬНОГО СДВИГА

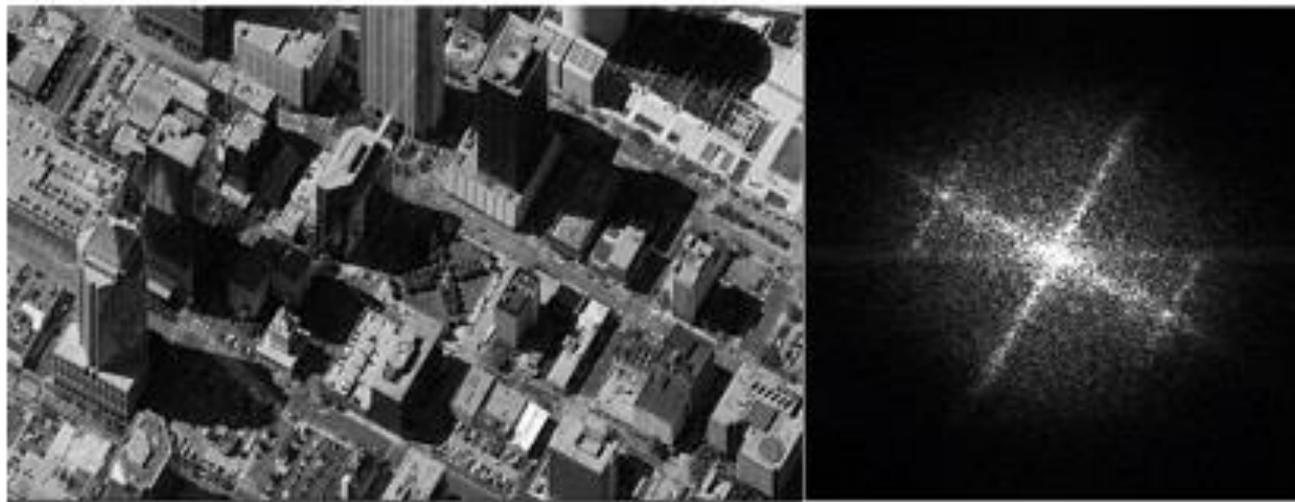
Способ однозначного определения субпиксельного сдвига – расфокусировка одинаковых по расположению областей изображений так, чтобы на опорном и на сдвинутом изображениях каждый пиксел занимал целую область на исходных паттернах. В дискретных преобразованиях Фурье (ДПФ) таких областей амплитудные составляющие идентичны, **а фазовые 2D-спектры отличаются соответствующим сдвигу фазовым множителем**, относительная погрешность определения которого мажорируется величиной, обратной произведению числа пикселей в выделенной области на число градаций в пикселах (индекс глубины палитры изображения). Фазовый множитель однозначно идентифицирует и измеряет субпиксельный сдвиг. Эта технология избавляет от неоднозначной и утомительной статистики при непосредственном подсчете трендов сюжетов изображений в состоянии их избыточной предпринятой передискретизации (такая передискретизация в реальных изображениях в группировке аппаратов просто отсутствует).

# Исходное изображение из пары и его ПЧС (пространственно-частотный спектр)



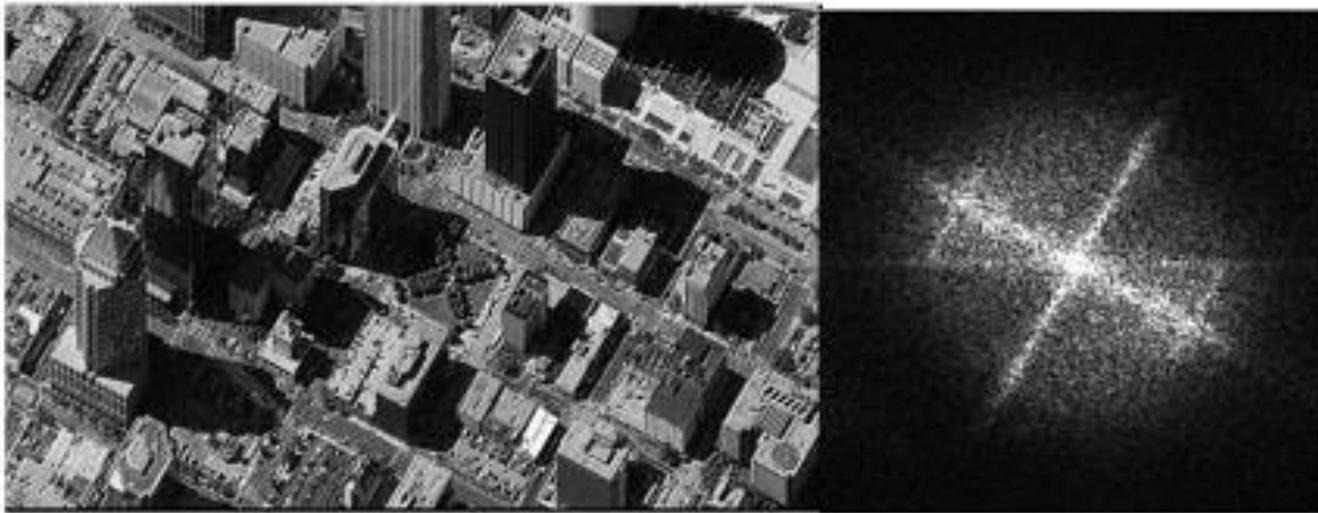
Фрагмент исходного изображения «[QuickBird\\_tampa\\_dwnntn\\_psh](#)» и его ПЧС

# Сверхразрешение на модели и ПЧС изображения



Фрагмент сформированного со сверхразрешением изображения «QuickBird tampa dwntn psh» с продолжением спектра до значения рекурсии  $L=40$

# Сверхразрешение на модели и ПЧС изображения с удлинненной рекурсией



Фрагмент сформированного со сверхразрешением изображения «QuickBird\_tampa\_dwntn\_psh» с продолжением спектра до значения рекурсии  $L=45-50$

# РЕКУРСИВНОЕ ПРОДОЛЖЕНИЕ СПЕКТРА

Пионеры продолжения спектра для уменьшения апертуры ФРТ:

*Прэтт У.* 1982. Цифровая обработка изображений. М. Мир. Ч.4. 115 с.

*Бейтс Р., Мак-Доннел М.* 1989. Восстановление и реконструкция изображений. М., Мир, 336 с.

*Грузман И.С., Киричук В.С., Косых В.П., Перетягин Г.И., Спектор А.А.* 2002. Цифровая обработка изображений в информационных системах. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 352 с.

## **ОГРАНИЧЕНИЯ и НЕДОСТАТКИ**

Реализация требования неполучения при продолжении спектра огибающей результирующего спектра, свойственной и для увеличения контраста изображений, сдвигающего значения яркостей к верхним уровням и снижающего при необходимой нормализации изображений разрешение мелких деталей на изображении в методах продолжения спектров не рассматривалась, что приводило к слишком малому количеству гармоник продолжения спектра

при этом популярный пример продолжения спектра, спадающего к нулю по экспоненциальному закону, например, можно моделировать покомпонентным его перемножением на подобранную по желанию возрастающую функцию частот, но как избежать перерождения в контрастирование ?

# УСЛОВИЕ ПРОДОЛЖЕНИЯ ПЧС

Изотропное продолжение ПЧС

ПЧС- пространственно-частотный спектр (2D Фурье представление изображения) при продолжается после нивелирования эффектов контрастирования – нормализации мод ПЧС с согласованием их с ЧКХ – частотно-контрастной характеристикой тракта зондирования.

Уменьшение пятна ФРТ соответствует продолжению спектра изображения

**Неизотропное продолжение ПЧС:**

**Случаи выявления ФРТ, связанной с расхождением фактической и запрограммированной СДИ (скорости движения изображения на фотоприемном транспаранте)**

# Стратегия коррекции резкости и подавления остаточных ФРТ

- Нетривиальная коррекция космических изображений высокого разрешения
- Моделирование и практика формирования космических изображений сверхвысокого разрешения
- LAP Lambert Academic Publishing ( 2018-07-10 )
- Снижение апертуры функции рассеяния точки, маскируемой на изображениях апертурой пиксела и развитие методов коррекции резкости с пространственным разрешением на космических изображениях с моделированием группировок спутников для преобразования изображений в паттерны со сверхразрешением с сохранением метрологических свойств их радиометрических характеристик заключается в восстановлении и оптимизации частотно-контрастной характеристики тракта дистанционного зондирования. **При этом первичная частотная характеристика имеет сингулярные значения, которые учитываются в виде моделей сингулярных на мере нуль функций с финитными спектрами. Выполняемая в связи с этим по требованиям теоремы Котельникова передискретизация изображений и ядер итеративных операторов деконволюции с учетом достоверности измеряемых функций рассеяния точки вынужденно приводит к согласованию условий теоремы Котельникова с процессами сходимости итеративных деконволюций и построения мер Лебега оценки значений восстанавливаемой резкости на изображениях.**

# ПОЛУЧЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ОСТАНОВА ИТЕРАЦИЙ коррекции резкости

- 1. Создать контрастированный и с коррекцией резкости образцы из изображения и искать необходимое соотношение коэффициента ФВК (функции взаимной корреляции) результата обработки с ними**
- 2. Реализовать оценку значения порядка мажорирующего по выбранной мере процесс коррекции дифференциального оператора нецелого порядка – при значениях порядка  $0,2$  есть вероятность контрастирования**
- 3. Реализовать анализ гистограммы амплитуд ПЧС результатов коррекции и сравнивать результаты анализа с ПЧС минимального контрастирования изображения**
- 4. Оптимизировать ЧКХ тракта зондирования для данного изображения и этапа коррекции (оптимизация по 6 основным соотношениям – требованиям квазипрямоугольности окна пропускания ПЧС изображения, получаемого из ЧКХ) с использованием параметра ограничения роста высших мод корректируемого ПЧС**

# Инверсная фильтрация

Определяемая из для каждого из  $N$  опорных ориентиров или полигонных объектов  $S_{OO}$  и их эталонов  $S_{HO}$  уникальная ЧКХ в виде

$$F(\Phi PT)_i = F(S_{OO})_i / F(S_{HO})_i$$

с оценкой  $F(\Phi PT)$  в виде  $\bigcup_i^N F(\Phi PT)_i$  дает оценку искомой ФРТ<sub>0</sub> в виде

$$\Phi PT_0 = F^{-1}\left(\bigcup_i^N F(\Phi PT)_i\right),$$

и выводит на инверсную фильтрацию вида

$$F(S_H) = F(S_R) / F(\Phi PT_0) = F(S_R)(F(\Phi PT_0))^{-1}$$

т.е. покомпонентное произведение спектра изображения и  $(F(\Phi PT_0))^{-1}$ ; где  $S_R$  – формируемое изображение;  $S_H$  – восстанавливаемое изображение; здесь  $F^{-1}$  – обратная Фурье-процедура, а  $(F)^{-1}$  – деление единицы на отсчеты комплексного спектра  $F$ . Спектры и ЧКХ всегда ограничены верхней модой  $\omega_\varepsilon$ , характеризующей полосу «прозрачности» тракта дистанционного зондирования, моды задаются  $(\omega_x, \omega_y)$  – координатами в спектре  $S(x, y)$ .

# Градиентный оператор

Множества гармоник  $F(\Phi PT)_i$  определяются как нечеткие множества с функциями принадлежности на них  $\mu_i$ , равными коэффициентам корреляции соответствующих  $S_{OO}$  и  $S_{HO}$ . Операция объединения  $\bigcup_i^N$  для построения множества  $F(\Phi PT_o)$  сопровождается минимаксной формулой исчисления  $\mu_o$  для каждой гармоники в  $F(\Phi PT_o)$  с медианной фильтрацией значений ряда гармоник из образующих множеств  $F(\Phi PT)_i$  с равными значениями  $\mu_i$ .

На базе прямого продолжения на вещественные значения порядка спектрального представления операции дифференцирования  $- D_x^\alpha D_y^\beta$  ( $0 \leq \alpha, \beta \leq 1$ ), определяемого для допускающих Фурье-представление функций виде:

$$D_x^\alpha D_y^\beta S(x, y) = \int (J\omega_x)^\alpha (J\omega_y)^\beta F_S(\omega_x, \omega_y) e^{(J(x\omega_x + y\omega_y))} d\omega_x d\omega_y,$$

(5)

где  $F_S(\omega_x, \omega_y)$  – прямое двумерное преобразование Фурье функции  $S(x, y)$ ,  $J = (-1)^{0,5}$ ,

конструируем градиентный фильтр (оператор) в виде нормы вектора  $(D_x^\alpha S(x, y), D_y^\beta S(x, y))$  т.е. в виде

$$grad_{\alpha\beta}(S) = ((D_x^\alpha S)^2 + (D_y^\beta S)^2)^{1/2}.$$

# Оператор аддитивной коррекции

целесообразно реализовать коррекцию  $S_R$  в виде

$$S_I = S_R + a \operatorname{grad}_\alpha (S_R),$$

с варьируемыми параметрами  $a$  и  $\alpha$ , т.е. коррекцию рекурсивным методом продолжения спектра.

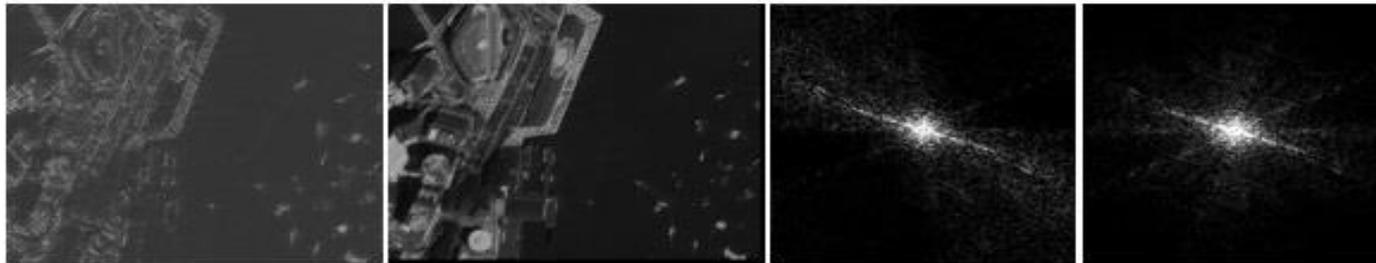
Чем ниже значение  $\alpha$ , тем медленнее растут амплитуды мод спектра оператора к периферии и чем меньше значение  $a$ , тем «мягче» коррекция изображения аддитивной добавкой | и тем больше может понадобиться итераций построенного таким образом продолжения спектра с учетом и контролем отсутствия контрастирования.

# Аддитивная коррекция резкости

Ниже представлены фрагменты изображения со спутника Icosnos с обработкой вариантами продолжения спектра: а) результат применения градиентного фильтра к  $S_R$  со значениями  $\alpha$  равными 0,7, 0,5 и 0,25, соответственно; б)  $S_{i=S_R+1} grad_{\alpha}(S_R)$  со значениями  $\alpha$  равными 0,7, 0,5 и 0,25, соответственно; в) спектр  $S_i$  со значениями  $\alpha$  равными 0,7, 0,5 и 0,25, соответственно; г) спектр  $S_R$ .

На рис. 1 видны характерные признаки контрастирования – подъем амплитуд гармоник ЧКХ за пределами спектра изображения  $S_i$ . На рис. 2 сравниваемые спектры практически совпадают. Из рис. 3 видно, что спектр  $S_i$  (Рис. 3в) сохранил топологию спектра исходного  $S_R$  (Рис. 3г) с компенсацией «завалов» на периферии, что соответствует увеличению резкости на  $S_i$ .

# Эффект уменьшения порядка оператора коррекции



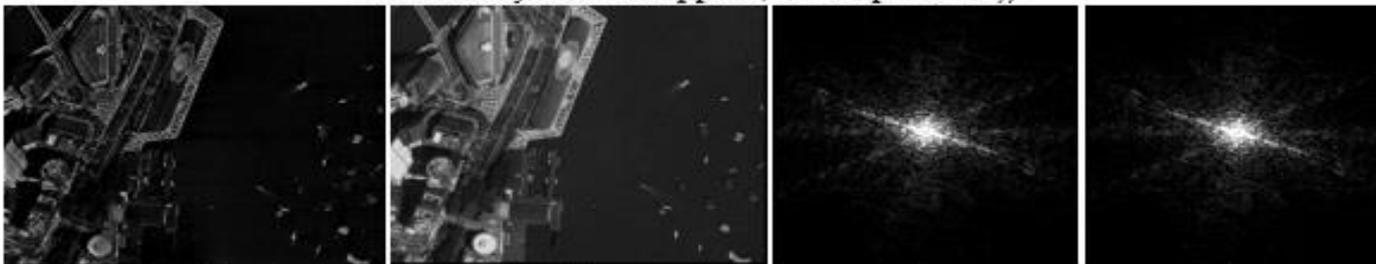
а) *а)а*

б)

в)

г)

Рис. 1. Результаты коррекции  $S_K$  при  $\alpha = 0,7$



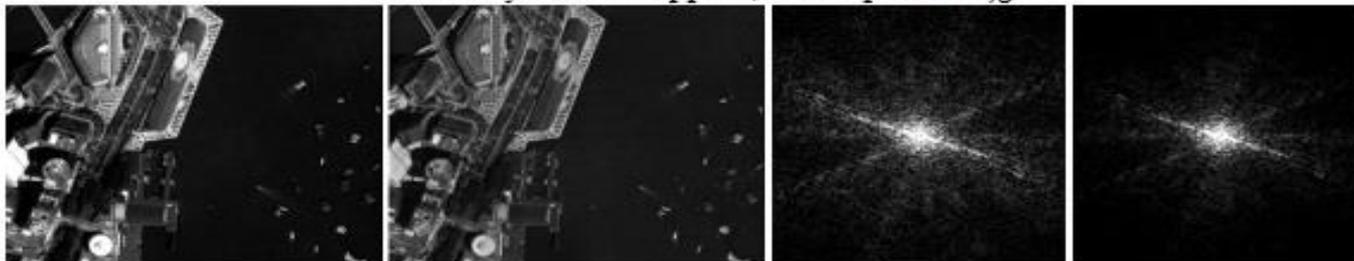
а) *а)а*

б)

в)

г)

Рис. 2. Результаты коррекции  $S_K$  при  $\alpha = 0,5$



а) *а)а*

б)

в)

г)

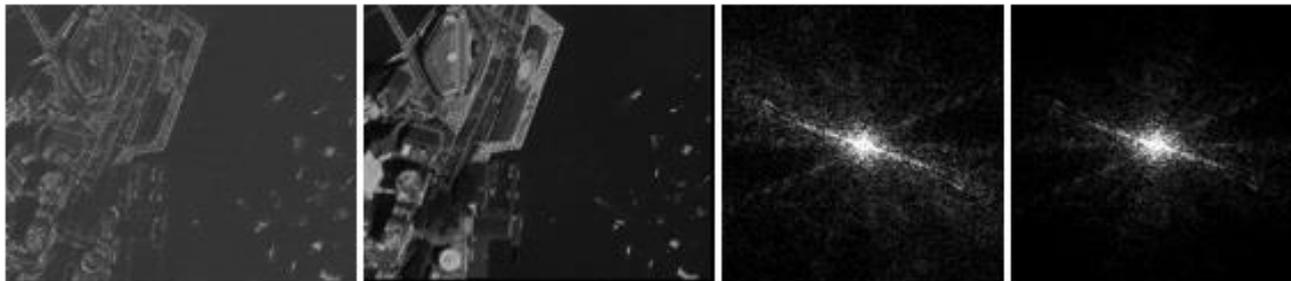
Рис. 3. Результаты коррекции  $S_K$  при  $\alpha = 0,25$

# Как переходить к рекурсии

Повторное применение оператора коррекции, например, в итеративном процессе означает повышение эффективного порядка оператора, и в приведенном примере приводит к подчеркиванию контуров и смешанному с контрастированием увеличению резкости (Рис.4), и соответствует выполнению соотношения

$$S_{k+1} = S_k + 2a \operatorname{grad}_\alpha(S_k) + a^2 \operatorname{grad}_\alpha(\operatorname{grad}_\alpha S_k),$$

порождающего сложный спектр (рис. 4в), который можно спутать со спектром, получающимся в процессе увеличения резкости при первой итерации аддитивной коррекции и при  $\alpha = 0,7$  (рис. 1в). Эффективный порядок повторной аддитивной коррекции при заданных  $a$ ,  $\alpha$  и спектре исходного изображения близок к значению  $0,7$  – можно сравнить результаты с рис. 1. **При увеличении длины рекурсии в  $L$  раз необходимо выбирать значение порядка оператора аддитивной коррекции  $(0,25)^{0,5/L}$**



а)

б)

в)

г)

Рис. 4. Результаты повторной коррекции  $S_k$  при  $\alpha = 0,5$

# Результат на неполном наборе инспирированных изображений

**Получено:** метод сверхразрешения при инспирировании группировки при коррекции резкости на инспирированных изображениях методом продолжения спектра с подавлением возможного контрастирования дает в 1,5 раза улучшение (по критерию Фуко), но зона начала останова должна начинаться раньше установленного числа (в данном случае 50). Это может объясняться дисперсным поведением расхождения средневзвешенных мод ПЧС ФРТ и изображения из-за псевдослучайного поведения сюжета на изображении.

Соответствующий показатель улучшения резкости для инспирированной из двух изображений группировки аппаратов, при работе над изображениями, модифицированными на согласование с оптимальной ЧКХ тракта зондирования фильтрами Винера с решением проблемы сингулярности синтезируемой ЧКХ имеет значение 1,65 - 1,7.

# Заключение

**Метод продолжения спектра, применяемый для подавления (остаточной) ФРТ или ее существенного ослабления в технологии сверхразрешения достаточно прост – не надо синтезировать для конструирования фильтра Винера оптимальную ЧКХ, нивелировать последствия возникающих сингулярностей в ЧКХ, применять передискретизацию изображений с высоким коэффициентом изменения апертур пикселей.**

**Профит итеративного метода продолжения спектра, построенного на принципе аддитивной коррекции резкости с вычислением этапов ЧКХ всего лишь для контроля наличия перерождения коррекции резкости в контрастирование изображения, отстает от результативности модернизированной Винеровской фильтрации с итеративным оператором деконволюции, хотя существенно отличается от «традиционных» методов аналитического продолжения в сторону повышения эффективности.**

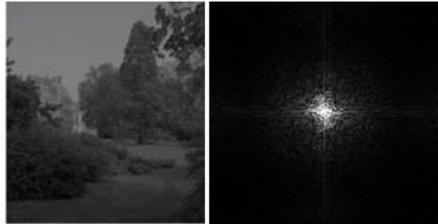
При этом ничто не мешает при использовании метода продолжения спектра в моделях группировок при установленной длине рекурсии метода  $L$ , выполнять неполное число рекурсий и переходить к итеративной деконволюции изображений с гарантированной коррекцией именно резкости

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1

- Существенной помехой при измерении субпиксельного сдвига пар изображений является смаз изображения (например, кинематический смаз первичных изображений большей или меньшей степени). Тем не менее наилучшее качество изображения Земли, достижимое при применении данного конкретного аппарата, определяется статическими параметрами его съёмочной аппаратуры, факторами орбитальной съёмки и её геометрическими и радиометрическими условиями, что дает возможность прогноза на выполнение замеров субпиксельных сдвигов при совмещениях

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2.

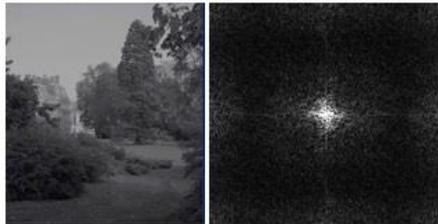
### Аддитивное представление сюжетные изображения и их ПЧС



Изображение сюжетное и его ПЧС

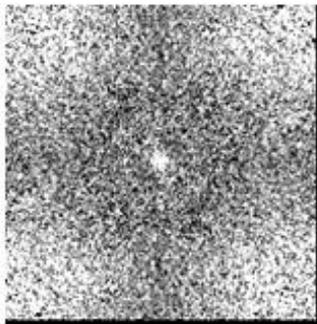


Изображение сюжетное с увеличенным контрастом и его ПЧС



Изображение сюжетное с подавленной ФРТ на основе коррекции оператора  
восстановления пространственно-частотных спектров и его ПЧС

# Приложение 3.ПЧС оператора, найденный отношением спектров



ПЧС оператора контрастирования для сюжетного изображения

# Приложение 4.

## Градиентный оператор на мире

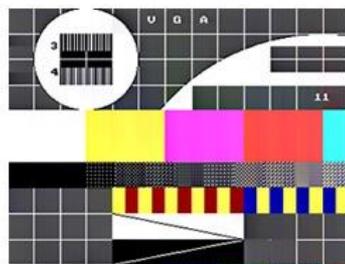


Рис.3. Порядок=0,05

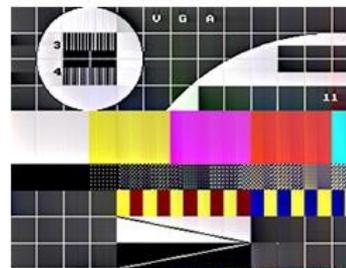


Рис.4. Порядок=0,1

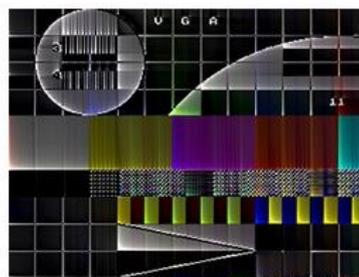


Рис.5. Порядок=0,3

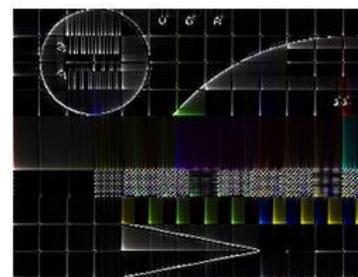


Рис.6.Порядок=0,5

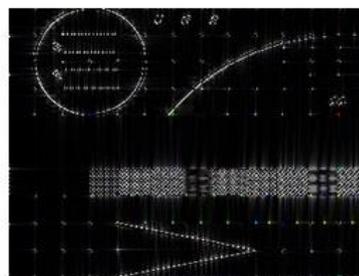


Рис.7. Порядок=0,8

# Приложение 5. Требования для оптимизации ЧКХ тракта

- а) максимизации функционала – объема под огибающей ЧКХ;
- б) отсутствия тенденции спада и роста аппликат ЧКХ вплоть до приближения к высшим спектральным модам тракта - примерной «гладкости» и параллельности огибающей поверхности ЧКХ координатной плоскости– это условие имеет всегда максимальный приоритет и, соответственно, высокое значение весового коэффициента при вычислении оптимальных параметров аддитивного оператора ;
- в) начала устойчивого завала огибающей ЧКХ с некоторой моды  $\omega_{2<}\omega_g$ , причем с минимизацией разницы  $\omega_g - \omega_2$ ;
- г) вписывания огибающей спектрального представления наблюдаемого на изображении линеаэлемента или границы в огибающую ЧКХ (в том числе -вписывания в огибающую ЧКХ СП обратного фильтру Винера- Тихонова;
- д) не превышения значением порога  $\alpha_p = 0,25$ , при котором резидентно присутствуют глобальное контрастирование или выделение контуров .
- Следует отметить, что одно из самых естественных требований к ЧКХ - инвариантности ЧКХ к повороту может относиться только к ЧКХ на выходе оптоэлектронного преобразователя, инвариантность нарушается для всего тракта формирования изображения, т.к. в тракт включаются сканирование строк чувствительных матриц и внесение коррекций на угол поворота оптической оси системы, на тонгаж и рыскание аппарата.

*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.

Ушакова Н.Н., Винтаев В.Н. Итеративный оператор деконволюции в вариантах модели формирования изображения со сверхразрешением в группировке космических аппаратов// Научные ведомости БелГУ. 2017. №20 (269)/48. С. 131-145.

*Все отмеченные в презентации программные модули имеются на съемном диске – возможна демонстрация их работы с изображениями*

# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

МОСКВА, 2018 ГОД