

***ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН***

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

## **Коррекция пространственно-частотных спектров изображений малоразмерных объектов на изображении высокого разрешения**

***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 № 19-07-00697 «Разработка основ системного анализа и моделирования коррекции резкости космических изображений сверхвысокого разрешения на базе модернизации теоретико-типовых математических и семантических подходов для прогноза и реализации максимально возможных характеристик по пространственному разрешению».

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАЛОРАЗМЕРНОГО ОБЪЕКТА НА КОСМИЧЕСКОМ ИЗОБРАЖЕНИИ

Под малоразмерным объектом понимаем объект, целиком вписывающийся в апертуру пиксела фоточувствительного матричного транспаранта.

# ПРОБЛЕМА СУЩЕСТВОВАНИЯ ОБЪЕКТА

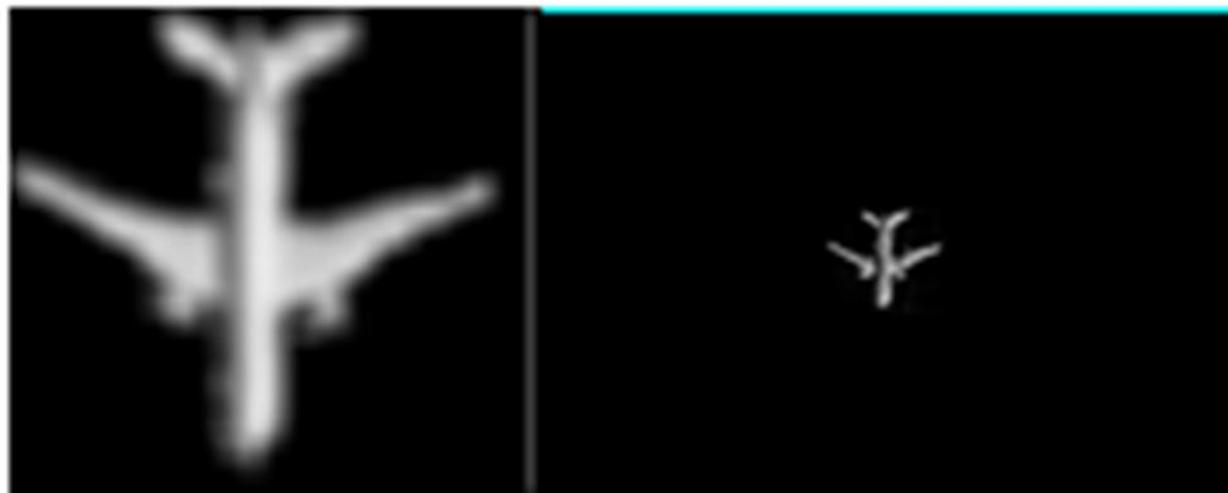
- ▶ Обнаружение наличия внутрипиксельного объекта наиболее вероятно при многоспектральном зондировании при выявлении отличий яркостей таких пикселей от ожидаемых яркостей (Винтаев, Ушакова, 2018)
- ▶ На фрагменте космического паттерна при формировании расфокусированных изображений его пикселей можно выделить один или несколько малоразмерных (внутрипиксельных) объектов в соответствии с обусловленной связью средних или максимальных апертур объектов и рассматриваемых и допустимых радиусов корреляции флуктуаций рассеянного на ареале зондирующего излучения.
- ▶ Задачи такого плана весьма актуальны, например, для достаточно удаленных наблюдаемых объектов (или уже удалившихся).

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСФОКУСИРОВКИ СВЕТОВОГО ПОТОКА

- ▶ Расфокусировка светового потока для формируемого изображения изменением положения чувствительного транспаранта относительно стандартной фокальной плоскости (ФП) не является увеличением изображения, т.к. нет изменения фокусного расстояния на телескопе аппарата, но может засвечивать необходимого размера площадки на ФП.
- ▶ Пятно на дискретном транспаранте ограничено замкнутым и неправильным по симметрии контуром; параметры расфокусировки заданы и известны и, соответственно, известны пределы изменения индексов (номеров) пикселей, входящих полностью или частично в это пятно.

# Модель внутрипиксельного объекта

- ▶ Фрагмент изображения Houston-24466-0-8bit со спутника OrbView-3 : показана фрагментарно реализация получения точечного объекта из наблюдаемого на исходном изображении самолета; процесс восстановления (расфокусировки) реализуется выбором соответствующего кадра в потоке редукций исходного изображения



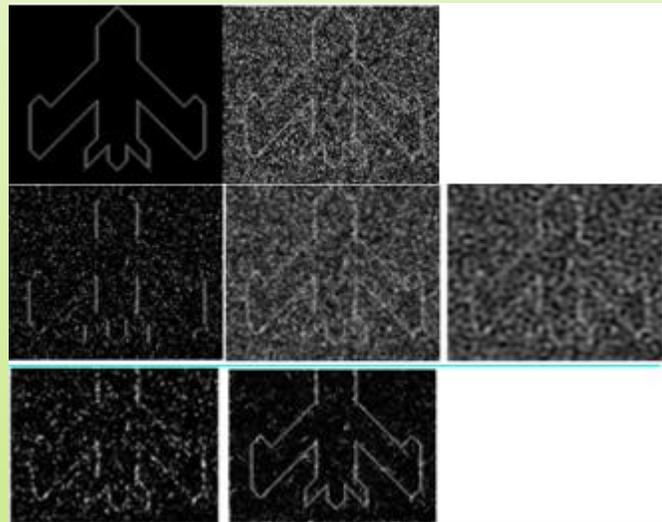
# ОСНОВНОЙ ЭФФЕКТ ОТ ПРЕДПРИНИМАЕМОЙ РАСФОКУСИРОВКИ

- ▶ Осуществляется возможность фильтрации внутрипиксельного шума с коррекцией пространственно-частотного спектра (ПЧС) внутрипиксельных объектов и стартовая обработка, не реализуемая стандартными подходами - объективизация яркостей пикселей в каналах формирования изображения при дерасфокусировке.

# ПОДГОТОВКА РАСФОКУСИРОВАННОГО УЧАСТКА К ШУМОПОДАВЛЕНИЮ

- ▶ Используется чувствительный к длинам радиусов корреляции по заданному направлению веерный фильтр.
- ▶ Слева направо и сверху вниз (на следующем слайде): исходное тестовое изображение, далее зашумленное равномерным нормальным шумом исходное тестовое изображение (соотношение сигнал/шум=0.8); далее результаты обработки зашумленного тестового изображения: фильтром Винера, линейным матричным фильтром с нормализацией, линейным фильтром в частотной области с обнулением кольца пространственных частот с номерами выше 50, адаптивным фильтром графического пакета PHOTOPAINT, веерным фильтром с параметрами: количество проходов - 2, длина базы - 17 и 5, количество направлений - 36, показывающим явное преимущество в отделении протяженных элементов от шума.

# ТЕСТИРОВАНИЕ ВЕЕРНОГО (ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО) ФИЛЬТРА



# ТЕКУЩИЙ ВАРИАНТ ВНУТРИПИКСЕЛЬНОГО ШУМОПОДАВЛЕНИЯ

- ▶ Один из вариантов, связанный с допустимыми значениями радиусов корреляции -удаление в пятне информации типа шума или ненужного фона может осуществляться попиксельным вычитанием паттернов, полученных нормализованной сверткой расфокусированного пятна с матрицами небольших, но разных размеров. Перебор значений этих размеров с пороговой обработкой, в пределах позволяемых формулой изменений вероятности ложной тревоги при первичной расфокусировке позволяет с точностью до вероятности 0,9 выявить на фоне шумов некоторый протяженный объект, для ПЧС которого выработаны ранее формулы коррекции в согласовании с оптимизированной и квазипрямоугольной по огибающей частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ) тракта обработки.
- ▶ Коррекция ПЧС реализуется на основе согласования ПЧС объекта с оптимизированной ЧКХ тракта обработки изображения с подавлением функции рассеяния точки (ФРТ) на изображении.

# ОПТИМИЗАЦИЯ ЧКХ ТРАКТА ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

- ▶ Оптимизация ЧКХ проводится нахождением минимаксных значений функционалов при коррекции изображения, сформулированных на требованиях:
  - минимизации тенденции спада и роста аппликат ЧКХ вплоть до приближения к высшим спектральным модам в заданных пределах;
  - максимизации гладкости ЧКХ (за исключением наличия встраиваемых моделей сингулярных на мере нуль всплесков);
  - наиболее крутого спада ЧКХ в области высшей спектральной моды тракта.

# ИНВЕРСНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ФРТ

- ▶ Для подавления ФРТ строится модификация фильтра Винера на соотношении инверсной фильтрации изображения (для гипотетического случая определения полного спектрального портрета  $F(\Phi PT_0)$ ):

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

здесь  $F$  - двумерное преобразование Фурье (т.е. ПЧС),  $(F)^{-1}$  - деление единицы на отсчеты комплексного ПЧС, спектры и ЧКХ всегда ограничены верхней модой  $\omega_B$ , моды задаются  $(\omega_x, \omega_y) = (\omega_i, \omega_j)$  - координатами в двумерном ПЧС изображения  $S(x, y)$ ,

$S_R$  - наблюдаемое и сформированное постфактум изображение,  $S_{И}$  - восстанавливаемое изображение.

# 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 широко используемый в коррекции резкости модифицированный фильтр Винера-Тихонова как спектральное представление (СП) оператора деконволюции  $H_M^{-1}$

# ПЕРЕХОД К ФОРМУЛЕ ВИНЕРА-ТИХОНОВА

Замена  $F(\Phi P T_0)$  на  $H(\omega_i, \omega_j)$ , т.е. на спектр ФРТ с неполнотой покрытия диапазона частот задачи:

$$F(S_{\mu}) = H^*(\omega_i, \omega_j) F(S_{\delta}) / (|H(\omega_i, \omega_j)|^2 + \alpha(\omega_i^2 + \omega_j^2)^{\mu/2}) = H_{\mu}^{-1} F(S_{\delta})$$

# ФОРМУЛА ВЫЧИСЛЕНИЯ ТЕКУЩЕГО ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ ВЫДЕЛЕННОГО В РАСФОКУСИРОВАННОМ ФРАГМЕНТЕ ОБЪЕКТА

$$\sum \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} R_{xy} / \sum R_{x,y} = \begin{Bmatrix} x_r \\ y_r \end{Bmatrix}$$

где  $\begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix}$   $\begin{Bmatrix} x_r \\ y_r \end{Bmatrix}$ , – вектор координат пикселей, входящих в пятно расфокусировки объекта (с захватом на границе более 50% апертур соприкасающихся пикселей) и пара значений координат вычисленного положения центра тяжести пятна от объекта, соответственно,  $R_{x,y}$  – значения яркостей соответствующих пикселей.

# ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ УСТАНОВКИ ПОРОГОВ РАЗГРАНИЧЕНИЯ ОБЪЕКТА ОТ СТОХАСТИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Установку порогов, применяющихся при распознавании целесообразно регламентировать такими характеристиками изображения как:

$\sigma^2$  - дисперсия яркости исходного изображения;

$D_c$  – динамический диапазон контрастов выделяемых образов;

$\Omega$  - полоса пространственных частот, занимаемая спектральными портретами образов;

$\Delta_p$  - полоса пересечения пространственных частот спектральных портретов образов и шумов;

$\tau$  - радиус корреляции шума;

$A$  – средняя апертура выделяемого образа;

Наибольшей значимостью среди перечисленных параметров обладают  $\sigma$ ,  $D_c$ ,  $\Omega$ , причем  $\tau$  и  $A$  по абсолютной значимости могут быть заменены на следующий параметр:

$$\varepsilon = \frac{\tau}{A}.$$

# ВЫЧИСЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ПОРОГА РАЗГРАНИЧЕНИЯ

В выбранном окне обработки для выделяемого элемента вычисляется соотношение

$$PG = \frac{\Delta_p \cdot \sigma \cdot \varepsilon}{D_c \cdot \Omega}, (D_c, \Omega \neq 0),$$

квазипропорциональное отношению "энергия шума/энергия сигнала", умноженному на величину  $\varepsilon = \tau/A$ , пропорциональную вероятности ложной тревоги в процедуре корреляционного обнаружения (минимальное значение этой вероятности наступает при  $\tau=0$ ). При этом величина  $\varepsilon = \tau/A$  нормирует отношение  $\Delta\sigma/D_c\Omega$  так, что при выборе для коррекции разрешения объектов, для которых  $\varepsilon \ll 1$  она удерживает значения  $PG \leq 0.3$ . Это эквивалентно значению ошибки в распознавании  $\Pi \leq 0.3$ .

# ФОРМУЛА ВИНЕРА-ТИХОНОВА С ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМОЙ ДОБАВКОЙ, ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ ПО ОПТИМИЗИРОВАННОЙ ЧКХ

$$P(S_{yy}) = P(S_{yy}) |H|^2(\omega_1, \omega_2) |H(\omega_1, \omega_2)|^2 + \alpha(\omega_1^2 + \omega_2^2)^{1/2} + V(\omega_1, \omega_2) = P(S_{yy}) |H_{\text{opt}}|^2 + V$$

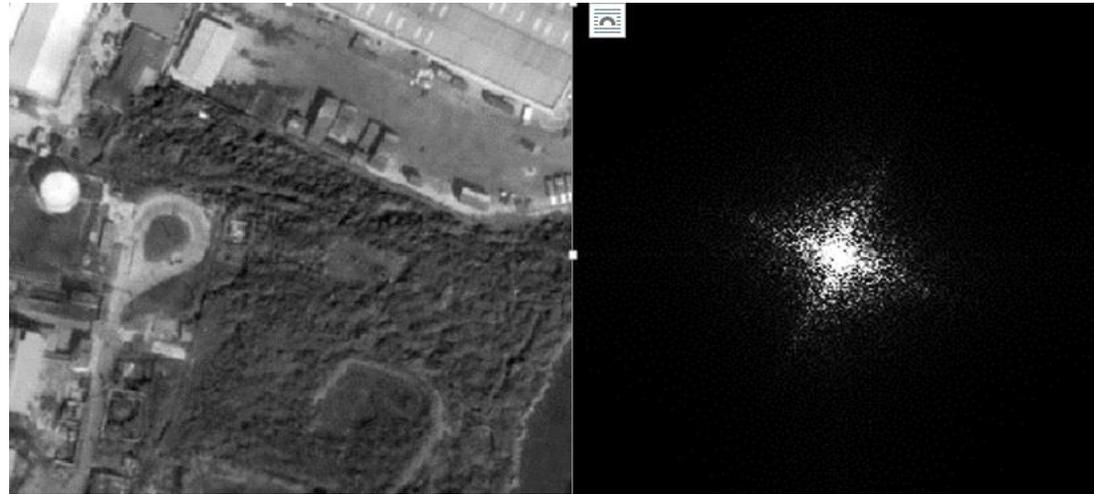
# ВЫПОЛНЕНИЕ ПЕРВИЧНОЙ КОРРЕКЦИИ РЕЗКОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

- ▶ Первичная коррекция изображения выполняется градиентным обобщенным оператором (с нецелым порядком) с малыми значениями параметров:

$$S_{\mathcal{H}} = S_{\mathcal{R}} + \alpha \operatorname{grad}_{\alpha}(S_{\mathcal{R}})$$

- ▶ Первичная коррекция дает возможность вычислить первичную ЧКХ тракта обработки изображения и далее ее оптимизировать под квазипрямоугольную форму огибающей (до наступления контрастирования изображения) (Макриденко и др., 2017).

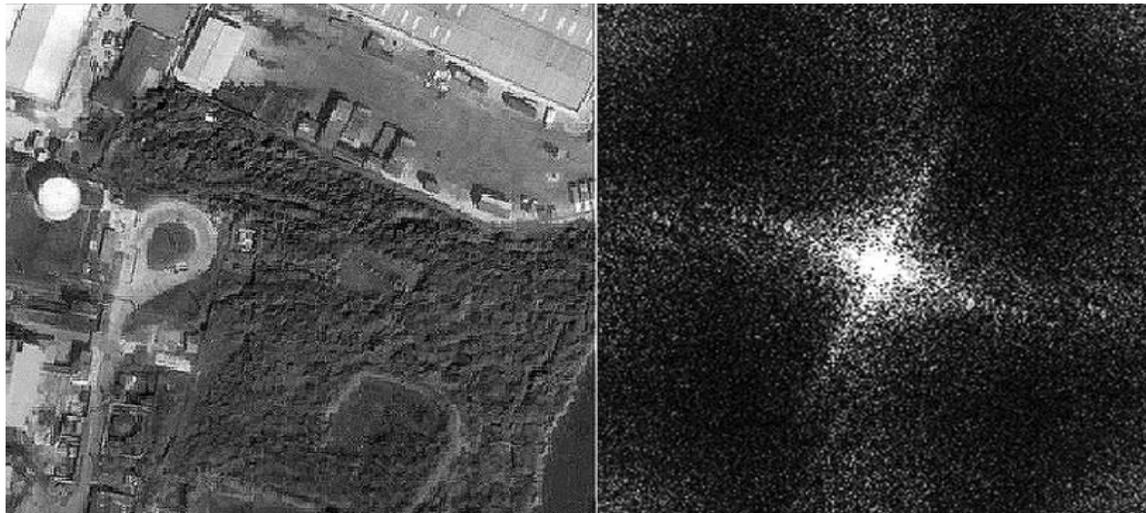
# ИСХОДНОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ QUICKBIRD\_HAVANA\_INDUSTRY\_IMAGE\_CHIP-0.6 М И ЕГО ПЧС



QUICKBIRD\_HAVANA\_INDUSTRY\_IMAGE\_CHIP-0.6 М  
ЕГО ПЧС: РЕЗУЛЬТАТ АДАПТИВНОЙ  
ДЕКОНВОЛЮЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ С  
ОПТИМИЗАЦИЕЙ ЧКХ



QUICKBIRD\_HAVANA\_INDUSTRY\_IMAGE\_CHIP  
-0.6 м м и ЕГО ПЧС ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ  
МЕТОДА КИРХГОФА ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ  
КОЭФФИЦИЕНТА КОРРЕКЦИИ ОПЕРАЦИИ  
УЛУЧШЕНИЯ РЕЗКОСТИ



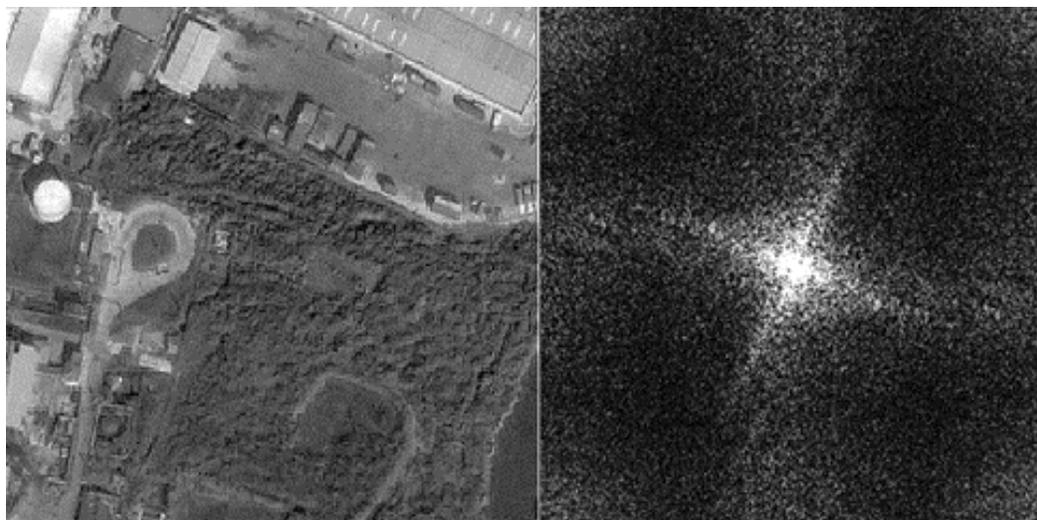
Уравнение для Вычисления частотно-зависимых добавок  $g$  на учете механизма рассеяния и/или при внутрипиксельной фильтрации в  $S_{ij}$  над ареалом

$$F_i(S_{ij}) \equiv F(S_R) (H_M^{-2} + v + g_i);$$

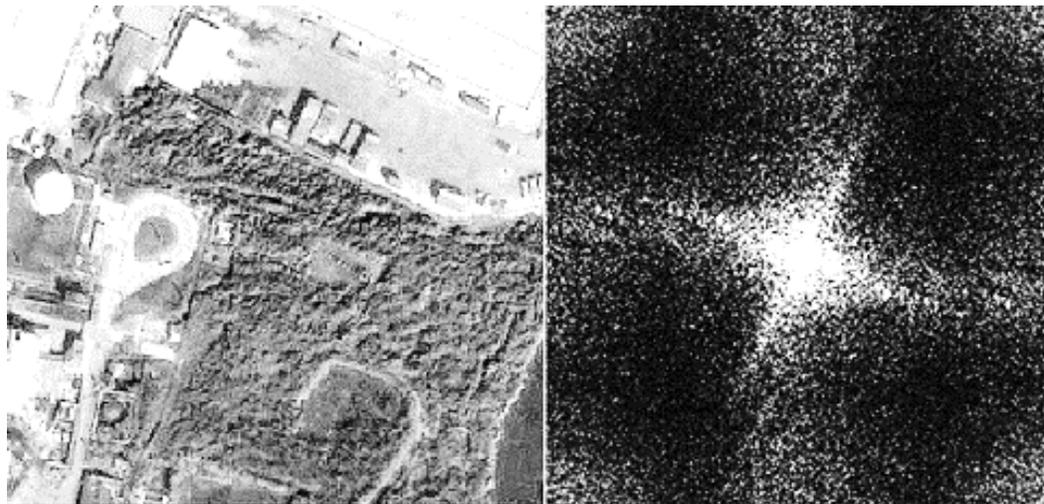
Вычисление добавок  $g$  на учете механизма рассеяния и/или при внутривидовой фильтрации в  $S_{ij}$  над ареалом

$$F_i(S_{ij}) / F(S_R) - (H_M^{-1} + v) = g_i$$

Изображение QuickBird\_havana\_industry\_image\_chip-  
0.6 m м и его ПЧС при использовании метода  
Кирхгофа для вычисления коэффициента  
коррекции операции улучшения резкости и при  
выполнении внутрипиксельной обработки



QuickBird\_havana\_industry\_image\_chip-0.6 m м и его ПЧС  
при использовании метода Кирхгофа для вычисления  
коэффициента коррекции операции улучшения резкости и  
выполнении внутрипиксельной обработки (первичный  
вариант с гипертрофированной контрастностью) (50  
разрядов промежуточной палитры)



# Заключение

- ▶ Применение метода Кирхгофа определения поля распределения интенсивности при формировании изображения для внутрипиксельной обработки (рассеяния излучения на спрямляемых площадках по законам отражения, т.к. размер площадки больше длины волны) реализует разброс лучей в раскрыве индикатрисы рассеяния с максимумом интенсивности в углах, близких к направлению отражения излучения и приводит к изменению масштаба изображения. Кроме того, контрастность на изображении становится гипертрофированной и разрядность цифрового представления пикселей приходится многократно увеличивать при итеративных расчетах с последующей нормализацией. При сборке изображения после восстановления масштаба эффект контрастирования необходимо выявить, отделить как процедуру и снизить до исходного уровня по анализируемым гистограммам. В целом, детальность и фактура полученного методом Кирхгофа изображения отличаются в лучшую сторону от детальности и фактуры изображений при формально объективных методах поддержки квазипрямоугольности ЧКХ тракта зондирования.
- ▶ **Именно приближение формы ЧКХ к прямоугольному виду на данном этапе является критерием корректности предпринятой обработки. Коррекция ПЧС внутрипиксельных объектов с минимизацией энергии стохастической составляющей улучшает резкость и увеличивает радиус ПЧС изображения в целом, и при избытке разрядности для результатов обработки не противоречит нормализации гипертрофированной контрастности на паттерне.**

## Эффект пропадания увеличения детальности при увеличении разрешения в тракте

- ▶ Если полоса «пропускания» пространственных мод у ЧКХ телескопа аппарата невелика, то попытки улучшения разрешения за счет дообработки формируемого изображения приведут только к уменьшению апертур псевдопикселов на ареале с отсутствием как улучшения разрешения по Рэлю, так и увеличения детальности на формируемом изображении зондируемого ареала.
- ▶ Увеличения детальности можно добиться, по крайней мере, с начальной моды спада полосы «пропускания» упоминаемой ЧКХ.

## *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 отмеченные в презентации программные модули  
имеются на съемном диске - возможна демонстрация их  
работы с изображениями.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

МОСКВА, 2019