

Санкт-Петербургский Государственный Университет  
Кафедра Системного Программирования

Марьина Анна Валерьевна

# **Построение субпиксельно точных моделей камер**

Курсовая работа

Научный руководитель:  
Пименов Александр

Санкт-Петербург, 2017

## Содержание:

1. Введение
  2. Постановка задачи
  3. Обзор
  4. Процесс калибровки
  5. Субпиксельный анализ
    - 5.1. Процесс байеризации
    - 5.2. Формирование пикселя
  6. Нахождения передаточной функции
    - 6.1. Нахождение ФРТ
  7. Стенд для проверки и уточнения результатов
  8. Результаты
  9. Дальнейшие направления работ
- Список литературы

# 1. Введение

Современный мир невозможно представить без индустрии компьютерного зрения. Камеры используются практически везде. Системами наружного видеонаблюдения оснащены многие объекты, облегчая процесс слежения и снижая уровень преступлений. В автомобильной промышленности камеры выступают в качестве сенсоров, повышая уровень безопасности. Снимки со спутников используются для составления карт, а так же военными для отслеживания опасностей у границ государств. Веб-камеры помогают налаживать связь между людьми, позволяя видеть друг друга на больших расстояниях. Киноиндустрия невозможна без камер. Рынок носимых гаджетов предлагает пользователям устройства, в которых качество фотографий стремительно растет с каждым годом. Научные исследования микробиологов, химиков, медиков предполагают в ходе работы фото и видео съемку.

Очевидно, что очень многое зависит от разрешения изображения, способности различить линии и определить локализацию объектов в пределах пикселя. Например, при уточнении границы линии в два раза по сравнению с первоначальным снимком, являющимся кадром с камеры уличного наблюдения, появляется возможность распознать номера машины и идентифицировать личность ее владельца.

Существует несколько способов повышения качества изображений.

1. Улучшить оптическую систему— увеличить размер матрицы, добавить функции зума и вспышки. Однако, данный способ ведет к переоборудованию, в разы увеличивая цену, а так же влияет на размеры и вес устройства.

2. С помощью специальных алгоритмов (super resolution multi images, спектральный анализ, наложение фильтров и т. д.) повышать качество готового изображения. Данный способ не всегда является эффективным. К тому же выбор алгоритма очень сильно зависит от ситуации. Например, способ для улучшения фотографии со спутника навряд ли подойдет для фотографии снятой на мобильный телефон.

3. Уточнение математической модели камеры. Данный процесс производится во время калибровки непосредственно перед съемкой (Trimble V10 и др.). В этом случае один алгоритм с незначительными изменениями подойдет под разные модели камер и разные условия съемки. Этот способ является

эффективным. Например, субпиксельное уточнение на десятые доли пикселя при съемки на большом расстоянии повышает точность измерения расстояния между объектами на несколько метров. Именно по этим причинам данный способ выбран мной для реализации.

## 2. Постановка задачи

Целью данной курсовой работы является разработка метода субпиксельного уточнения внутренних параметров камеры для внедрения в будущем данного алгоритма в библиотеку `opencv` на языке C++. Данную задачу следует разбить на следующие этапы:

- анализ резкости изображений, полученных с промышленных камер
- разработка метода для получения передаточной функции пикселя
- разработка установки для тестирования и проведения опытов

### 3. Обзор

Первым этапом был произведен анализ рынка программных продуктов на наличие готовых решений, использующих метод субпиксельного уточнения математической модели камеры во время калибровки, и поиск информации об их недостатках.

Был произведен тщательный анализ публикаций по данной теме. Компьютерное зрение — очень новая область, и поэтому, к сожалению, подобных программных продуктов с открытым исходным кодом найти не удалось, не было найдено и коммерческих продуктов, которые бы широко использовались. Публичные данные позволяют предположить наличие подобных результатов у военных в виде закрытых разработок.

Были найдены статьи, в которых описаны некоторые приемы улучшения качества изображения. Они основывались на методе спектрального анализа, подборе фильтров и учете перемещения камеры во время процесса съемки. Некоторые из этих идей можно использовать и для уточнения математической модели камеры.

К сожалению, не было найдено готового алгоритма, который помог бы решить мою задачу. Это одновременно повышает и актуальность, и трудоемкость данной работы.

## 4. Процесс калибровки

Математическая модель камеры - это функция которая по точке в пространстве предсказывает ее образ, и, наоборот, по образу позволяет предсказать геометрические свойства реального объекта. Она является результатом процесса калибровки.

Ниже рассмотрена модель камеры обскуры. В ней вид сцены формируется путем проецирования трехмерных точек в плоскость изображения с использованием перспективного преобразования.

$$sm' = A[R|t]M'$$

или

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fx & 0 & cx \\ 0 & fy & cy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

где:

- $(X, Y, Z)$  - это координаты 3D точки в координатном пространстве
- $(u, v)$  - это координаты проецируемой точки в пикселях
- $A$  - это матрица камеры или матрица с внутренними параметрами
- $(cx, cy)$  - это центральная точка, которая обычно находится в центре изображения
- $fx, fy$  - это фокусное расстояние, выраженными в пиксельных единицах

Таким образом, если изображение с камеры масштабируется с коэффициентом, все эти параметры должны соответственно масштабироваться на один и тот же коэффициент. Матрица внутренних параметров не зависит от просматриваемой сцены. Однажды оцененный коэффициент, может быть повторно использован до тех пор, пока соответствующие настройки камеры не изменены.

Совместная матрица поворота и сдвига  $[R|t]$  это называется матрицей внешних параметров. Она используется для описания движения камеры вокруг статической сцены или, наоборот, жесткого движения объекта перед неподвижной камерой.  $[R|t]$  переводит координаты точки  $(X, Y, Z)$  к системе координат, зафиксированной относительно камеры. Это преобразование выше эквивалентно следующему (когда  $z \neq 0$ ):

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + t$$

$$x' = x/z$$

$$y' = y/z$$

$$u = fx * x' + cx$$

$$v = fy * y' + cy$$

У реальных линз обычно есть некоторые отличия от описанной выше модели, главным образом радиальные искажения и незначительные тангенциальные искажения.

Таким образом, вышеуказанная модель расширяется следующим образом:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + t$$

$$x' = x/z$$

$$y' = y/z$$

$$x'' = x' \frac{1+k_1 r^2+k_2 r^4+k_3 r^6}{1+k_4 r^2+k_5 r^4+k_6 r^6} + 2 p_1 x'y' + p_2 ( r^2+2x'^2 )$$

$$y'' = y' \frac{1+k_1 r^2+k_2 r^4+k_3 r^6}{1+k_4 r^2+k_5 r^4+k_6 r^6} + p_1 ( r^2+2y'^2 ) + 2 p_2 x'y', \text{ где}$$

$$r^2 = x'^2 + y'^2$$

$$u = fx * x'' + cx$$

$$v = fy * y'' + cy$$

$k1, k2, k3, k4, k5$  и  $k6$  - это коэффициенты радиальных искажений.  $p1$  и  $p2$  - это тангенциальные коэффициенты искажения. Еще есть коэффициенты высших порядков. Коэффициенты искажения не зависят от просматриваемой сцены. Таким образом, они также относятся к внутренним параметрам камеры. И они остаются неизменными независимо от разрешения снятого изображения. Если, например, камера была откалибрована на изображениях с разрешением  $320 \times 240$ , одинаковые коэффициенты искажения могут использоваться для изображений с расширением  $640 \times 480$  с одной камеры, в то время как  $fx, fy, cx, cy$  необходимо соответствующим образом масштабировать.

Использовать приведенную выше модель можно для выполнения следующих действий:

- Проецирование точки в пространстве на плоскость изображения с учетом внутренних и внешних параметров.
- Вычисление внешних параметров по внутренним параметрам и проекциям нескольких точек.
- Оценивание внутренних и внешних параметров камеры по снимкам калибровочной доски из нескольких позиций.
- Оценивание положения и ориентацию стереокамер относительно друг друга, и вычисление преобразования для избавления от дисторсии.

В рамках библиотеки `corecv3` ранее была разработана функция калибровки. Было произведено ее тестирование с промышленной камерой `Ueye` которая предполагается для использования в ходе курсовой работы.

## 5. Субпиксельный анализ

### 5.1. Процесс Байеризации

Как было сказано выше, в задачах компьютерного зрения и фотограмметрии на первом месте стоят требования точности. Важна точность выше, чем один пиксель.

Пиксель не наименьшая единица, обычно он состоит из субпикселей красного, зеленого и синего цветов (RGB).

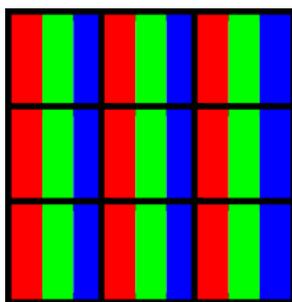


Рисунок 1: Матрица из пикселей 3\*3

Формируется цвет пикселя следующим образом. Применяется фильтр Байера — специальная архитектура системы цветных фильтров для фотосенсора. Представляет собой массив цветных (RGB) фильтров в ячейках однослойных матриц, которыми накрыты чувствительные элементы матрицы, используемые в цифровой фотографии. Обычно массив фильтра состоит из 25% красных элементов, 25% синих и 50% зелёных элементов. Каждая ячейка матрицы воспринимает только 1 из 3 цветовых каналов предметной точки и для получения остальных цветовых каналов предметной точки используются две рядом расположенные ячейки, в каждой из которых находятся по 1 недостающему цветовому каналу. Конкретный алгоритм дебайеризации и дальнейшей обработки зависит от конкретного производителя сенсоров и часто является коммерческой тайной.

### 5.2. Формирование пикселя

Теперь представим следующую ситуацию: наблюдаемый объект находится на достаточном расстоянии от камеры, перемещается и непрерывно фотографируется. Скорее всего, при некоторых перемещениях, мы не увидим разницы между фотографиями и следовательно не сможем зафиксировать данное перемещение.

Почему возникает такой эффект? Рассмотрим формирование пикселя на изображении. От какой-то точки в пространстве приходит луч. На своем пути он проходит через атмосферу, оптическую систему камеры, подвергается процессу байеризации и в результате рассеивается.

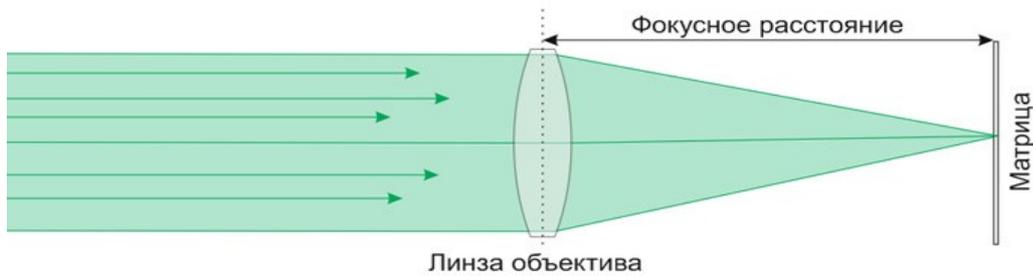


Рисунок 2: Проецирование изображения

Необходимо провести эксперимент, в ходе которого установим, действительно ли это так. Сделаем фотографии абсолютно резкого вертикального перехода от белого к черному и построим график перехода цвета в нескольких строках из пикселей.

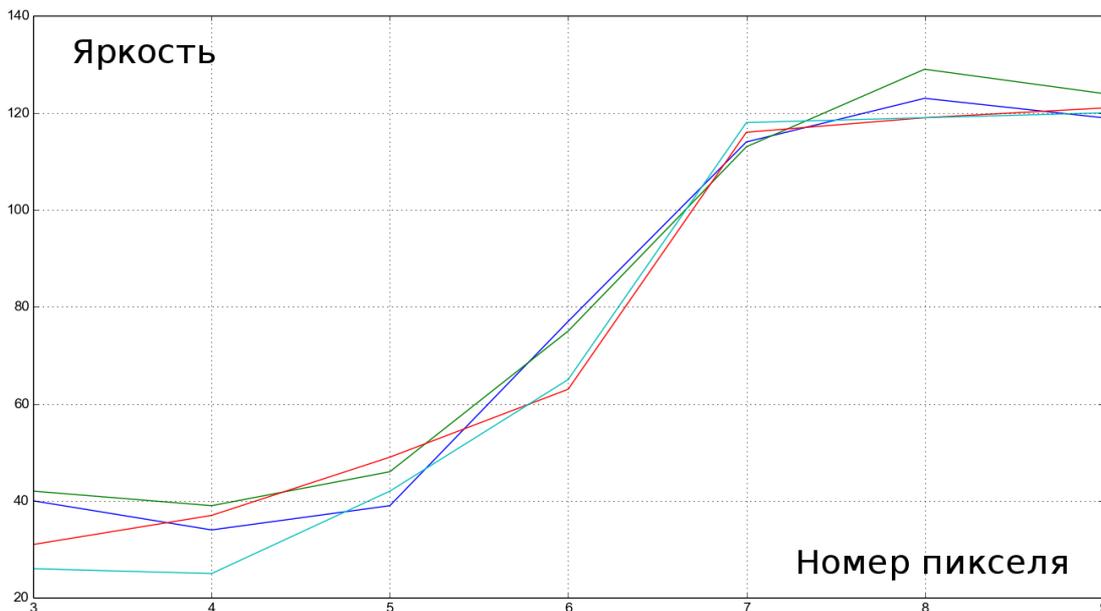


Рисунок 3: График перехода цвета

Видим то, что и предполагали. Переход на фотографии получился гораздо менее резкий .

## 6. Нахождение передаточной функции

Ниже представлена математическая модель формирования изображения.

$$u(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} h(x-t, y-\tau) f(t, \tau) dt d\tau + v(x, y)$$

где  $(x, y)$  - координаты точки (пикселя) на регистрируемом изображении

$f$  — отражение,  $h$  — функция рассеяния точки (ФРТ),  $v$  — шум.

Если мы сможем найти ФРТ, которая является передаточной функцией, то сможем избавиться от ее влияния на изображение.

### 6.1. Поиск ФРТ

Нам известно точное расположение фотографируемого шаблона, поэтому было бы хорошо воспользоваться этой информацией.

Было рассмотрено несколько способов из статей, включающие в себя анализ спектральной характеристик, была опробована функция для нахождения ФРТ (функции рассеяния точки) из библиотеки Open CV, но все они не подходили, так как никак не использовали знания о точном расположении фотографируемого шаблона.

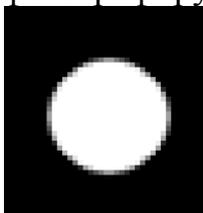


Рисунок 4: ФРТ  
- результат  
работы  
библиотеки  
OpenCV

Был разработан следующий алгоритм. Сфотографируем не просто вертикальную линию, а линию расположенную под небольшим наклоном.

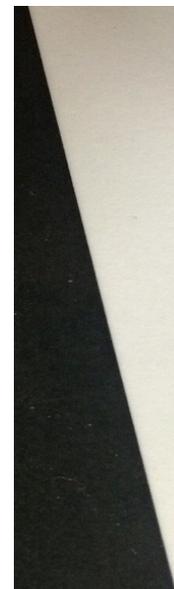


Рисунок 5:  
Фотографируе  
мая полоса

Если анализировать данное изображение построчно, то будет понятно, что в каких-то строках происходит пиксельный сдвиг. Хочется получить образ тонкой полоски на границе перехода. Важен ее субпиксельный размер, так как в действительности пиксель соответствует нескольким миллиметрам. Для этого будем последовательно вычитать матрицы, как именно это делать рассмотрено ниже.

Для анализа подходят только строки, находящиеся ближе к центру, потому что у краев изображения информация из-за «виньетирования» может быть искажена. Так же на изображении присутствует шум, но он случайный и поэтому считаем его равномерно распределенным на всем изображении. Несмотря на принятие во внимание всех вышеперечисленных условий для того, чтобы извлечь нужную информацию и минимизировать влияние шума на результат, усредним конечный результат по нескольким испытаниям.

Анализируем последовательную разность матриц размером  $2*25$ ,  $3*25$ ,  $4*25$ ,  $5*25$ ,  $6*25$ ,  $7*25$  пикселей. Это сверточная функция. Построим графики этих разностей. Посчитаем, сколько пиксельных переходов содержится на изображении, разделив высоту на разность координат черного пикселя первой и последней строки, получим число  $k$ . Наша задача выбрать график, на котором присутствует  $k$  ярко выраженных изменений функции расположенных периодически.<sup>2</sup>

Для анализа была выбрана центральная часть фотографии.

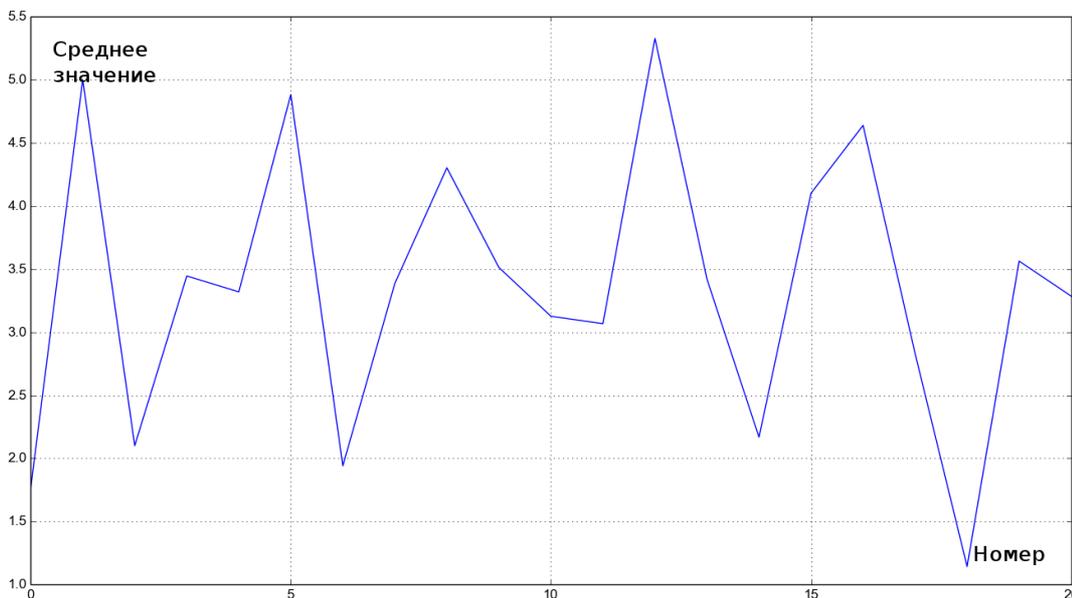


Рисунок 6: График изменения попиксельной разности яркости матриц последовательно по вертикали

Гипотеза подтвердилась: на данном графике просматривается периодичность функции. Количество резких изменений примерно равно количеству пиксельных переходов. Однако, шум не дает сразу использовать данные значения для уточнения математической модели данной камеры.

## 7. Стенд для проверки и уточнения результатов

Способ «наклоненной вертикальной полосы» отлично подходит для первоначального получения передаточной функции. Однако из-за сильного шума и выпуклости линзы имеем довольно мало данных для анализа, в таких условиях невозможно гарантировать практическую применимость результатов.

Как же решить данную проблему?

Достаточно иметь возможность сдвигать мишень с изображенной на ней вертикальной полосой на заранее рассчитанное расстояние, которое настолько мало, что ни на всех изображениях фиксируется пиксельный сдвиг. Известно расстояние до мишени и на какое расстояние она сдвигается. В таких условиях можно проверить и при необходимости уточнить передаточную функцию.

Для этого была разработана следующая система:

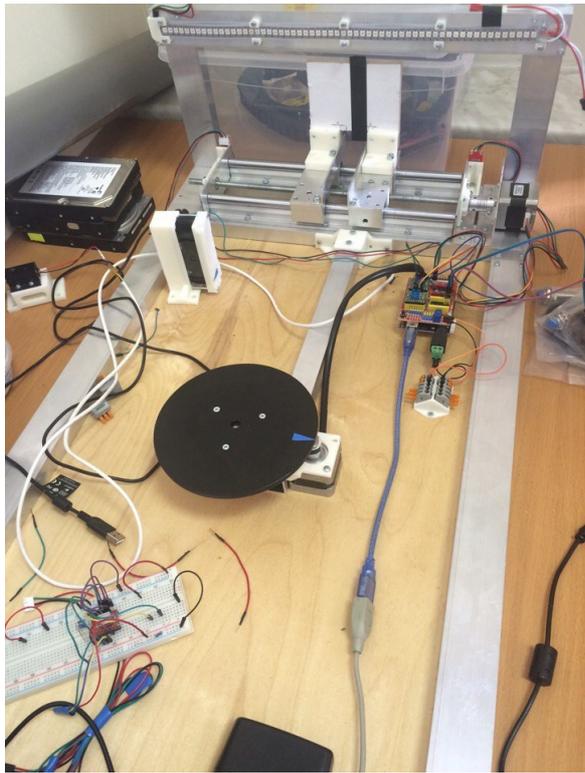
Аппаратный стенд представляет собой неподвижно закрепленную площадку для крепления камеры в поле зрения которой попадает установленная на систему линейного перемещения каретка с мишенью в виде черной полосы на белом фоне.

Стенд позволяет равномерно перемещать каретку на отрезке 200мм с расчетной точностью не хуже 0.1мм. Перемещение осуществляется посредством приводного винта М8 с основным шагом (1.25мм) приводимым во вращение шаговым двигателем с шагом 1.8 градуса. Последний работает в режиме 16 микрошагов. Каретка жестко связана с безлюфтовой "разрезной" гайкой. Люфт в гайке выбирается с помощью пружины.

Управление двигателем осуществляется с помощью интерпретатора G-Code на базе свободного решения grbl. Управляющая прошивка запущена на AtMega168 в составе платы Arduino UNO. Эта программная компонента преобразует команду на перемещение в точку в последовательность сигналов "направление" и "шаг". Ее управляющие сигналы заведены на драйвер шагового двигателя на базе чипа TI DRV8825 к которому двигатель подключен непосредственно,

Команды G-Code формируются вручную с помощью терминала bCNC между съемкой кадров. Съемка производится с таймером задержки затвора.

Были произведены тесты, в ходе которых подтвердилось, что данная установка гарантирует условия, в которых будет получен корректный результат.



*Рисунок 7: Фотография системы*

## 8. Результаты

В ходе выполнения курсовой работы были решены следующие задачи

- изучение теоретической составляющей процесса построения математической модели камеры
- реализован автоматический захват изображений для промышленной камеры Ueye на языке C++
- протестирован процесс калибровки из библиотеки `opencv`
- выдвинуты гипотезы относительно поведения передаточной функции
- разработан, реализован на языке Python и протестирован прототип метода получения передаточной функции
- получена математическая модель камеры IDS UI-3590CP-C
- выявлены недостатки прототипа и предложено усовершенствование
- разработан, собран и протестирован стенд для проведения испытаний, с целью получения верных результатов

## 9. Дальнейшие направления работ

В рамках дипломной работы планируется создание прототипа продукта для получения субпиксельно точной математической модели камеры. Реализация данного подхода планируется на языке C++ в рамках в библиотеки `corecv`.

## Список литературы:

[1] Мураховский В. И., Симонович С.В. « Большая книга цифровой фотографии», 2006, 320с.

[2] OpenCV Tutorials, URL:  
[http://docs.opencv.org/trunk/d9/df8/tutorial\\_root.html](http://docs.opencv.org/trunk/d9/df8/tutorial_root.html)

[3] Стюард И.Г. «Введение в Фурье-оптику», 1985, 182с.

[4] Heiko Hirschmuller, Stefan Gehrig «Stereo Matching in the Presence of Sub-Pixel Calibration Errors», 2009, URL:  
<http://vision.lbl.gov/Conferences/cvpr/Papers/data/papers/0796.pdf>

[5] David A.Forsyth, Jean Ponce «Computer vision. A modern approach», 2004, 928p.

[6] R. Szeliski «Computer Vision: Algorithms and Applications», 2010, 812p.

[7] Щербинина Н.В. «Разработка метода и алгоритмов восстановления изображений земной поверхности по спутниковым снимкам», 2015