



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ «Информатика и системы управления»

КАФЕДРА «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии»

РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

К НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

НА ТЕМУ:

*Метод определения функции импульсного отклика
искажающих помех на основе априорной
информации о границах объекта*

Студент ИУ7-76Б
(Группа)

(Подпись, дата)

Гасанзаде М.А.
(И.О.Фамилия)

Руководитель

(Подпись, дата)

Филиппов М.В.
(И.О.Фамилия)

Консультант

(Подпись, дата)

(И.О.Фамилия)

2020 г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой ИУ7
(Индекс)

И.В. Рудаков
(И.О.Фамилия)

« 23 » ноября 2020 г.

ЗАДАНИЕ
на выполнение научно-исследовательской работы

по теме Метод определения функции импульсного отклика искажающих помех на основе априорной информации о границах объекта

Студент группы ИУ7-76Б

Гасанзаде Мухаммедали Алиназим оглы
(Фамилия, имя, отчество)

Направленность НИР (учебная, исследовательская, практическая, производственная, др.)

учебная

Источник тематики (кафедра, предприятие, НИР) кафедра

График выполнения НИР: 25% к ___ нед., 50% к ___ нед., 75% к ___ нед., 100% к ___ нед.

Техническое задание Разработать метод определения функции импульсного отклика искажающих помех на основе априорной информации о границах объекта

Оформление научно-исследовательской работы:

Расчетно-пояснительная записка на 10-15 листах формата А4.

Перечень графического (иллюстративного) материала (чертежи, плакаты, слайды и т.п.)

Дата выдачи задания « 23 » ноября 2020 г.

Руководитель НИР

(Подпись, дата)

Филиппов М.В.
(И.О.Фамилия)

Студент

(Подпись, дата)

Гасанзаде М.А.
(И.О.Фамилия)

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕТЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	7
1.1 Описание предметной области.....	7
1.2 Линейная модель.....	8
1.3 Восстановление градиентом – ФРТ.....	10
1.4 Слепая деконволюция.....	11
1.5 Методы восстановления изображений.....	13
1.5.1 Метод Фурье.....	13
1.5.2 Восстановление слепой деконволюцией.....	15
1.6 Функция импульсного отклика.....	15
Вывод.....	16
2 КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ.....	17
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	18

ПЕРЕЧЕТЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ФРТ – Функция рассеяния точки

БПФ – Быстрое преобразование Фурье

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность – Одна из основных трудностей при анализе изображений полученных с летательных аппаратов и роботов с других планет, это низкое качество снимков, обусловленное различными искажениями, в том числе частными (размытие при движении, тряска и т. д.) [1]. Например, на аэрофотографиях, получаемых с помощью летательных аппаратов, в зависимости от высоты и погодных условий встречаются случайные помехи, такие как – облачность, туман или дымка [2]. Также встречаются случайные помехи в отдельных изображениях с Земли и космических аппаратов, а также роботов, при условиях повышенной радиоактивности и высоких температур [3]. В таких случаях проблема передачи отдельных изображений или видеопотока с условием сохранения лучшего (распознаваемого) качества становится актуальной научно-технической проблемой.

В большинстве вышеперечисленных примеров используются серийная фотосъёмка, что подразумевает под собой передачу большого объёма данных, при условии, что все изображения передаются в максимальном разрешении, кроме космических, где присутствует сжатие, из-за ограниченности ресурсов, где дополнено могут возникать ещё и артефакты сжатия [3]. Поэтому перед работой с данными файлами используют предобработку изображений. В основном, для решения вышеперечисленных проблем, применяют стандартные фильтры низких частот или медианные фильтры [4]. Но эти фильтры имеют недостатки, которые в частных случаях недопустимы, или же негативно влияют на итоговый результат исследований, т. к. они не полностью избавляют от шумов и размывают границы объектов, что сильнее затрудняет их распознавание и уменьшает качество изображений.

Цель данной работы – Разработать метод позволяющий определить кривую искажающих помех, и повысить качество изображения полученного в сложных условиях. Цель достигается путём решения следующих задач:

- определение искажённых частей изображения;

- разработка метода и алгоритмов постобработки, для устранения искажений на изображениях;
- применение метода ко всем, или избранным, изображениям полученных при серийной съёмке, для выявления лучшего результата;

В аналитической части работы рассматривается общая структура методов по восстановлению искажённых изображений. Проведены обзор и описание существующих методов распознавания команд, область их применения.

В конструкторской части описывается предлагаемый метод восстановления изображений. Рассматриваются методы, которые возможны для использования в рамках этой тематики.

В технологическом разделе описываются инструменты и технологии, которые были использованы при разработке программы. Рассматриваются основные преимущества используемых инструментов. Проводиться разбор основных методов, используемых в программе.

В ходе работе решаются следующие задачи:

- проводится анализ предметной области, анализируются существующие методы восстановления изображения;
- проводятся сравнительные эксперименты с разными методами восстановления изображений.

Объект исследования – импульсный отклик. Предмет исследования – методы восстановления изображений, подверженных случайным помехам.

1 АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1 Описание предметной области

Существует разница между восстановлением и улучшением изображения. Улучшение изображения - это субъективный процесс, направленный на улучшение качества изображения, усиление интересующих частей и подавление частей, не представляющих интереса. Восстановление изображения - это объективный процесс, который пытается восстановить исходное содержание или качество изображения с пониженным или искажённым качеством. Техника восстановления основана на деградированной модели и для восстановления исходного изображения используется обратный ей процесс. Перед восстановлением изображения необходимо определить модель ухудшения и выполнить восстановление изображения по этой модели.

Задачу восстановления изображения можно представить в виде общей математической формы:

$$g = 0(f, n) \quad (1)$$

где f представляет неизвестный объект, g представляет измеренное изображение, 0 - представляющий систему формирования изображения, а n - шум в системе, включая шум самого измерения. Сигналы f, g и n являются действительными функциями координаты x . Решение задачи восстановления изображения означает оценку объекта f для данного изображения g , предполагая, что оператор 0 известен, и что имеется некоторая априорная информация о статистических свойствах шума n . В нашем конкретном случае, рассматриваем, что также имеется априорная информация о границах объекта f .

Несколько частных случаев уравнения (1), представляющие различные системы визуализации, рассматривались в литературе [5,6]. Но в последнее время растёт интерес к нелинейным моделям, в том числе в рамках данного исследования. Наиболее важный и простейший частным случаем остаётся — 0 яв-

ляется линейным и инвариантным относительно сдвига, а n является аддитивным и независимым от сигнала. В данном случае уравнение (1) сводится к:

$$g = h \odot f + n \quad (2)$$

где h - функция, представляющая импульсный отклик системы (функция рассеяния точки), а \odot операция свёртки. Тогда задача восстановления изображения сводится к проблеме обращения интеграла Фредгольма первого рода [6,7].

Вариации модели, описываемой формулой уравнением (2), в котором шум зависит от сигнала, также можно раскрыть для описания шума зернистости фотографической плёнки и шума квантового дробления [7]. В этих случаях статистические свойства n зависят от размытого объекта $h \odot f$. Мы укажем эту зависимость, заменив в уравнении (2):

$$g = h \odot f + n\{h \odot f\}, \quad (3)$$

где $n\{s\}$, обозначает случайный процесс $n(x)$, статистические свойства которого зависят от аргумента $s(x)$. Но, одном частном случае, который стоит выделить:

$$n\{s\} = spn_1 + n_2 \quad (4)$$

где n_1 и n_2 являются статистически независимыми случайными функциями, и также не зависят от аргумента s , p является параметром.

1.2 Линейная модель

В данном разделе мы обратимся к проблеме восстановления изображения, описываемой линейной моделью:

$$g = h\{n_1\} \odot f + n_2 \quad (5)$$

в которой n_1 и n_2 являются статистически независимыми источниками шума. Это означает, что импульсная характеристика системы h сама по себе является случайной. Без ограничения общности, мы можем записать $h\{n_1\}$ как сумму детерминированной части и стохастической (случайной) части h_0 среднего:

$$h\{n_1\} = h_0 + n_1, \quad (6)$$

приводя к уравнениям изображения:

$$g = h_0 \odot f + n, \quad (7)$$

где:

$$n = n_1 \odot f + n_2. \quad (8)$$

Важно отметить, что система, описываемая уравнениями (7,8) не является частным случаем системы, описываемой уравнением (3), т. к. в первом случае шум зависел от входного сигнала f , а не на размытии (бесшумном) сигнале $f \odot h$.

Методы по восстановлению, также включают, основанное на усреднённой по времени, функции рассеяния точки системы, игнорируя особую природу вовлечённого шума [9,10]. Они также включают измерения усреднённой по времени пространственной автокорреляции принятого изображения. Это метод основанный на спекл-интерферометрии (speckle interferometry) [10,12]. Результат приводит к оценке абсолютного значения, преобразованиями Фурье [15]. Но здесь возникает фазовая проблема, т. к. также не рассматривается конкретная природа вовлечённого шума и акцент в основном делается на восстановлении потерянной фазы.

Линейным методом, возможно разработать оценку, при помощи наименьших квадратов, при условии обнаружения общего шума, а также шума импульсной характеристики, как показано в уравнениях (7-8). Хотя и рассматриваются результаты основе методологии Винера, здесь цель состоит в том, чтобы найти оценки не ограниченные линейным классом, а также не рассматривают объект как случайный сигнал, статистика которого известна (как это делает метод Винера).

Система уравнений (7), проанализированная выше, описывает важный класс систем визуализации – те, в которых функция импульсного отклика (искажающая кривая) является случайной. Такие флуктуации могут быть результатом случайных амплитудных и фазовых флуктуаций функции зрачка оптической системы, которые могут возникать из-за внешних эффектов, таких как оптическое распространение через турбулентность или от частиц пыли на оптиче-

ской поверхности [8]. Это также может быть результатом случайных вибраций системы визуализации относительно объекта.

Можно описать формулу (2) с помощью целых чисел, тогда примем искажённое изображение $g(x, y)$ без учёта шума, и опишем с помощью двумерной свёртки исходного изображения $f(x, y)$ с линейной, инвариантной к сдвигу, функцией импульсного отклика:

$$g(x, y) = f(x, y) \odot h(x, y) = \sum_{(n, m)} f(n, m) h(x - n, y - m) \quad (9)$$

где \odot – двумерная линейная свёртки. Для восстановления исходного изображения $f(x, y)$ необходимо применение операции деконволюции к функции импульсного отклика $h(x, y)$ искажённого изображения $g(x, y)$. В случае, когда функция импульсного отклика $h(x, y)$ известна, то как и было описано выше, применяются классические линейные методы восстановления. В случае же только аддитивного шума мы можем выбрать подходящий пространственный фильтр (например фильтр среднего значения) или частотный фильтр (например нижних/верхних частот).

1.3 Восстановление градиентом – ФРТ

Рассмотрим метод восстановления на примере: дано изображение с определёнными искажёнными участками. У нас имеется априори известные чёткие границы физических объектов, коими могут быть любые объекты – от машин и зданий, до контуров материков и планет. Нужно определить уровень и/или характер искажённых переходов основываясь на резких (чётких) участках, и восстановить их форму функцией рассеяния точки. Можно вывести градиенты изображения, и тогда, экстремумы, будут соотноситься с границами чётких, заранее выделенных физических объектов (достаточно резкие и без размытия) [13]. Для решение задачи предлагается данный алгоритм решения:

- выделяем статично-размазанный участок изображения (в этой области градиент приблизительно одинаковый);

- продифференцируем полученное изображение, на основании его получаем гистограмму распределения значений оцениваемых градиентов;
- разделим гистограмму на две части, левая – описывает распределение экстремумов градиентов, а правая - все остальные, не градиентные перепады яркостей. Здесь определяем смешивающее распределение;
- далее, идентифицировав смесь, построим правило для проверки двух возможных вариантов: H_0 градиент и H_1 не градиент, которое на основании этого выявит на изображении все участки с наличием размытых границ объектов;
- выявляем лишь те участки, и фиксируем степень их размытости, получая характеристику для восстановления симметричной функции рассеяния точки;
- после её получения, восстановление изображения производится любым доступным из стандартных методов.

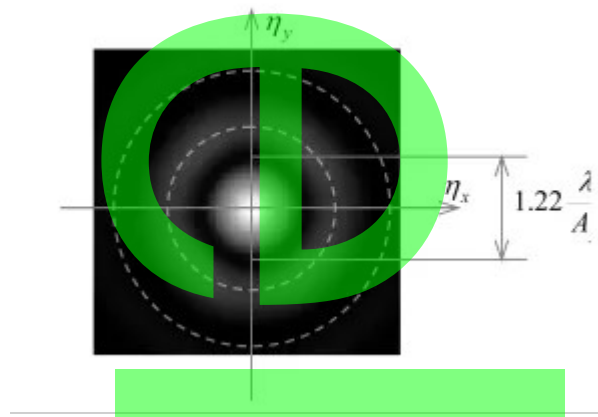


Рисунок 1. ФРГ

1.4 Слепая деконволюция

Рассмотрим пример, когда функция смаза неизвестна, а на изображении лишь несколько чётких объектов (их границ). В данном случае, действительное изображение $f(x, y)$ может быть восстановлено только из $g(x, y)$ с использованием минимальной информации о процессе смаза и реальном изображении. Такие оценочные подходы, в которых модель искажения предполагается линей-

ной, называются слепой деконволюцией. При данном методе восстановления изображений, по характеристикам искажённого, должно быть найдены реальное изображение и её функция импульсного отклика.

Выделим главные возможности методов слепой деконволюции при восстановлении. Так как мы рассматриваем случаи, когда информация об окружающей среде, в которой сделан снимок, невозможно или сильно затратно для получения, смаз чаще всего не может быть точно смоделирован случайным процессом, ибо колебания функции импульсного отклика трудно описать. В задачах же обработки в реальном времени, невозможно заранее определить параметры функции импульсного отклика и даже если попытаться предсказать, такая операция, будет работать с грубой погрешностью, что невыгодно в условиях затрат больших мощностей.

Также, для получения максимально близкого изображения, нужно учитывать несколько моментов:

- Фильтр должен быть короче сигнала
- Фильтр должен быть намного больше нуля (на Рис. 2. $> 0,013$)
- Деконволюция имеет $n = \text{len}(\text{signal}) - \text{len}(\text{gauss}) + 1$. Поэтому, чтобы позволить ему также находиться на той же исходной форме массива, нам нужно развернуть его с помощью $s = (\text{len}(\text{signal}) - n) / 2$ с обеих сторон.

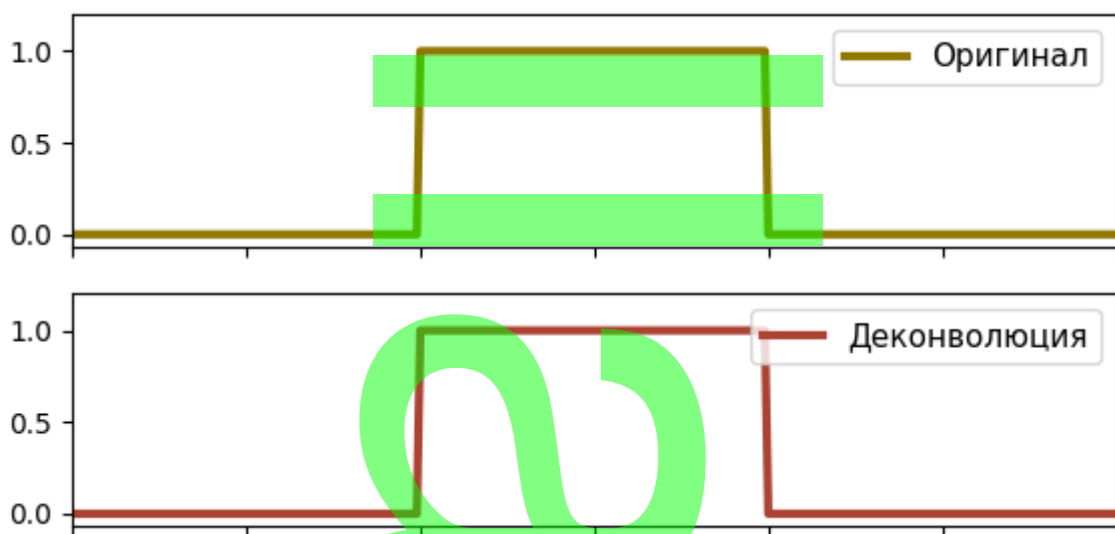


Рисунок 2. Восстановление сигнала, при идеальных условиях.

1.5 Методы восстановления изображений

Существующие подходы решения задач восстановления изображений условно можно разбить на три группы [16]:

- подходы, основанные на использовании априорной и апостериорной информации;
- подходы, основанные на использовании методов обработки сигналов;
- подходы, основанные на методах теории некорректно поставленных задач.

Априорная включает в себя ряд параметров, которые учитываются при восстановлении изображений. Апостериорные данные могут быть использованы при определении искажений, которому подверглось изображение при регистрации. Апостериорное знание использует наблюдаемое изображение $g(x, y)$ для определения некоторого параметра, описывающих искажение. Например, возможно определение функции рассеяния точки (ФРТ) по резким краевым участкам протяжённых объектов изображений или по точечным объектам, о которых точно известно, что они существуют.

Большинство методов, разработанных в первое время исследования проблемы обработки изображений, можно отнести к второй группе – методам обработки сигналов [14]. Подход, применяемый в задачах обработки сигналов, использует модель с однородным оператором и функцией рассеяния точки в (9), описываемую выражением:

$$g(x, y) = \int \int h(x-n, y-m) f(n, m) dn dm + n(x, y) \quad (10)$$

где $g(x, y)$ – зафиксированное изображение, $h(x-n, y-m)$ – ФРТ, $n(x, y)$ – шум и $f(n, m)$ – действительное изображение.

1.5.1 Метод Фурье

Представим уравнение (10) в эквивалентном ему виде Фурье:

$$G(f_x, f_y) = F(f_x, f_y) H(f_x, f_y) + N(f_x, f_y) \quad (11)$$

Известно, что общее линейное решение уравнения (10) может быть записано как:

$$f(n, m) = \int \int K(n-s, m-t) g(s, t) ds dt \quad (12)$$

где ядро инверсии имеет форму:

$$\begin{aligned} K(s, t) &= \frac{1}{4\pi^2} \int \int R(f_x, f_y) e^{i(sf_x + tf_y)} df_x df_y = \\ &= \frac{1}{4\pi^2} \int \int H^*(f_x, f_y) \frac{e^{i(sf_x + tf_y)}}{|H(f_x, f_y)|^2 + \psi(f_x, f_y)} df_x df_y, \end{aligned} \quad (13)$$

где $\psi(f_x, f_y)$ - заданная функция.

Таким образом, при отсутствии шума, очевидный восстанавливающий фильтр – это инверсный фильтр:

$$R(f_x, f_y) = H^{-1}(f_x, f_y) \quad (14)$$

Тогда, $f(n, m)$ может быть найдена путём обратного преобразования Фурье выражения:

$$F(f_x, f_y) = R(f_x, f_y) G(f_x, f_y) \quad (15)$$

Важно уточнить, что обратный фильтр может и не существовать, если имеются экстремумы, либо если $H(f_x, f_y)$. При наличии шума, как указано выше, в 1.2, оптимальным будет использование метода Винера или наименьших квадратов:

$$R(f_x, f_y) = \frac{H^*(f_x, f_y)}{|H(f_x, f_y)|^2 + \frac{S_{nn}(f_x, f_y)}{S_{zz}(f_x, f_y)}}, \quad (16)$$

где $S_{nn}(f_x, f_y)$ и $S_{zz}(f_x, f_y)$ спектры мощностей шума и исходного изображения уже известны. Фильтр наименьших квадратов:

$$F = \left[\frac{1}{H(x, y)} - \frac{|H(x, y)|^2}{|H(x, y)|^2 + \gamma |P(x, y)|^2} \right] G(x, y) \quad (17)$$

где γ - параметр, а $P(x, y)$ - преобразование Фурье матрицы $p(x, y)$. В сравнении с методом Винера, данный алгоритм показал лучшую работу.

Метод Фурье до сих пор является наиболее широко используемым в проблемах восстановления испорченных изображений. Известны как минимум, два недостатка этого метода:

- метод применим только для решения уравнений типа свертки
- он может использоваться только в линейных алгоритмах восстановления.

Использование БПФ в рамках решения этой проблемы является самым быстрым и дешёвым, в соотношении к вычислительным мощностям, инструментом при восстановлении. Линейные алгоритмы обладают важным преимуществом, они имеют общую схему основных операций, между собой, что даёт нам возможность создать гибкую модель, восстановления изображений.

1.5.2 Восстановление слепой деконволюцией

Существует два основных подхода при решении задачи слепой деконволюции[17]:

1. Функция импульсного отклика определяется независимо от испорченного изображения и используется позже, относительно любого из известных классических методов восстановления. Оценка функции импульсного отклика и восстановление изображения являются раздельными процедурами в данном подходе. Алгоритмы являются довольно простыми и не требуют затрат в вычислениях.

2. Одновременная оценка функции импульсного отклика и восстанавливаемого изображения. Данный метод включает идентификационную процедуру функции импульсного отклика в восстанавливающий алгоритм и является ресурсозатратным.

Большинство методов слепой деконволюции работают итеративно, последовательно оптимизируя ядро смаза и искомого изображения. В процессе обработки ядро смаза вычисляется по найденному варианту искомого изображения и исходному смазанному изображению.

1.6 Функция импульсного отклика

Большие значения интенсивности в близости от самой точки будем считать «приемлемыми», ведь это и есть обычное размытие изображения. По отда-

лению от точки, большие значения интенсивности означают случайную флуктуацию, не чаще всего не являясь размытием или обычными колебаниями.

Рассмотрим пример: допустим у нас есть исходное и результирующее изображение. Преобразуем оба изображения в частотное пространство с помощью БПФ и разделим БПФ результирующего изображения на исходное изображение. Затем примените обратную функцию БПФ, чтобы получить аппроксимацию ядра свёртки. При обычной деконволюции можно было бы разделить БПФ свёрнутого изображения на ядро, чтобы восстановить действительное изображение. Однако, поскольку свёртка (аналогично умножению) является коммутативной операцией, роли ядра и источника могут произвольно меняться: свёртка источника по ядру точно такая же, как и свёртка ядра по источнику.

Конечно же она не даст, полного восстановления ядра, по тем же причинам, что и обычная деконволюция (является очень нестабильным процессом из-за шума, краевых эффектов, ошибок округления). Она не сможет восстановить исходное изображение и свёртка может полностью стереть некоторые частоты (умножив их на ноль), и в этом случае эти частоты не смогут быть восстановлены (утеря).

Вывод

В данном разделе были рассмотрены методы и алгоритмы фильтрации и восстановления искажённых изображений, приведены их плюсы и минусы. Рассмотрена возможность их отдельной реализации, применимо к определённым условиям, либо их комбинированное использование.

2 КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Искажения в объективе [Электронный ресурс] // URL: <https://cameralabs.org/3033-iskazheniya-v-obektive-vse-chto-dolzhen-znat-kazhdiy-fotograf> (дата обращения: 22.12.2020).
2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. Москва, Техносфера, 2005, 1072 с.
3. Красильников Н.Н. Цифровая обработка 2D и 3D-изображений. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2011, 608 с.
4. Ортокоррекция космических снимков с использованием RPC [Электронный ресурс] // URL: <http://gis-lab.info/qa/ortho-rpc.html> (дата обращения: 23.12.2020).
5. W. K. Pratt, Digital Image Processing (Wiley, New York, 1978).
6. B. R. Frieden, in Picture Processing and Digital Filtering, T. S. Huang, ed. (Springer, New York, 1975).
7. Справочник по интегральным уравнениям: Методы решения. Манжиров А.В., Полянин А.Д, Москва, «Факториал Пресс», 2000, 384 с.
8. Квантовая обработка изображений [Электронный ресурс] // URL: <https://bigenc.ru/physics/text/2056185> (дата обращения: 22.12.2020)
9. B. L. McGlamery, "Restoration of turbulence-degraded images," J. Opt. Soc. Am. 57, 293–297 (1967) [Электронный ресурс] // URL: <http://dx.doi.org/10.1364/JOSA.57.000293> (дата обращения: 22.12.2020)
10. J. C. Dainty, "Stellar speckle interferometry," in Laser Speckle and Related Phenomena, Vol. 9 of Topics in Applied Physics, J. C. Dainty, ed. (Springer-Verlag, New York, 1975), pp. 255–280 [Электронный ресурс] // URL: <https://bigenc.ru/physics/text/2056185> (дата обращения: 22.12.2020)
11. K. T. Knox and B. J. Thompson, "Recovery of images from atmospherically degraded short-exposure photographs," Astrophys. J. Lett. , 193, 145–148

- (1974) [Электронный ресурс] // URL: <https://bigenc.ru/physics/text/2056185> (дата обращения: 22.12.2020)
12. J. R. Fienup, “Reconstruction of an object from the modulus of its Fourier transform,” Opt. Lett. 3, 27–29 (1978) [Электронный ресурс] // URL: <https://bigenc.ru/physics/text/2056185> (дата обращения: 22.12.2020)
13. Адаптивное восстановление космических снимков подстилающей поверхности земли с использованием априорной информации [Электронный ресурс] // URL: <http://www.ict.nsc.ru/ws/elpub2001/1911/> (дата обращения: 25.12.2020)
14. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. - М.: Мир, 1982, 480 с.
15. Преобразование Фурье: самый подробный разбор [Электронный ресурс] // URL: <https://proglib.io/p/fourier-transform> (дата обращения: 22.12.2020)
16. Обработка изображений. Многофункциональная цифровая модель системы искажения и восстановления изображений [электронный ресурс] // url: <http://www.computeroptics.smr.ru/ko/pdf/ko20/ko20326.pdf> (дата обращения: 21.12.2020)
17. Метод ускоренного восстановления изображений, смазанных при движении [Электронный ресурс] // URL: <http://technomag.edu.ru/doc/340562.html> (дата обращения: 21.12.2020)
18. Обратная свёртка [Электронный ресурс] // URL: <https://nsu.ru/rs/mw/link/Media:/66130/Unfolding.pdf> (дата обращения: 24.12.2020)