DOI: https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.10.4

УДК: 621.396

Особенности реконструкции сплошных лакун на изображениях

А.В. Кокошкин

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,
Россия, Фрязино

Статья поступила в редакцию 20 октября 2026 г.

Аннотация. Эта работа является обзором опыта по решению задач ретуширования и реконструкции содержимого сплошных лакун на изображениях. Восстановление сплошных (длинных) пропусков значительно сложнее, чем аналогичная работа с разреженными данными, так как при длительной потере теряется фаза и динамика сигнала. Основная проблема заключается в том, что при значительных размерах лакун большинство алгоритмов не могут сохранить достаточную непрерывность и согласованность структуры сигнала или изображения. Показано что при ретушировании или маскировке содержимого лакуны хорошо работают методы *image inpainting* или нейронные сети. А если необходимо восстановить содержимое лакун, то предпочтительным является использование методов, работающих в частотной области (например: метод интерполяции последовательно вычисляемого спектра Фурье).

Ключевые слова: обработка изображений, реконструкция сплошных лакун, особенности методик.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Автор для переписки: Кокошкин Александр Владимирович, shvarts65@mail.ru

Введение

В условиях современной цифровизации практически все сферы человеческой жизни опираются на вычислительные технологии. Среди них особое место занимают алгоритмы обработки визуальных данных, востребованные в таких высокотехнологичных отраслях, как медицина, дистанционное зондирование Земли, охрана правопорядка и восстановление объектов культурного наследия. Проблема восстановления сигнала, искаженного различного вида лакунами (областям незаполненным данными), чрезвычайно актуальна [1-4].

Реконструкция сплошных лакун – это задача восстановления непрерывного участка данных (в сигнале или изображении), где информация была потеряна. В отличие от разреженных сигналов (где выборки отсутствуют нерегулярно), сплошные лакуны представляют собой последовательные, подряд идущие пропущенные отсчеты. Подобные дефекты могут возникать как вследствие технических сбоев, особенностей методик измерений, так и в результате преднамеренного удаления объектов.

Восстановление сплошных (длинных) пропусков значительно сложнее, чем маскирование одиночных выпадений, так как при длительной потере данных теряется фаза и динамика сигнала. Основная проблема заключается в том, что при значительных размерах лакун большинство алгоритмов не могут сохранить достаточную непрерывность и согласованность структуры сигнала или изображения.

В случаях, если надо только ретушировать лакуну, применяют классические методы интерполяции, работающие в пространственной области. Например: билинейная интерполяция, метод обратных взвешенных расстояний, метод ближайшего соседа и т.д. В этой работе, для сопоставления с альтернативными решениями, использован оригинальный алгоритм сплайн-интерполяции [5, 6]. Физическая интерпретация этого метода основана на моделировании изгиба упругой пластины, где для набора опорных точек формируется и решается система линейных уравнений. В результате

аппроксимации строится сплайн-поверхность. Метод позволяет задавать ширину границы (от одного пикселя и более) вокруг заполняемой области, что обеспечивает универсальность алгоритма при выполнении сравнительного анализа.

Когда задачей становится маскировка следов редактирования, применяются более сложные алгоритмы *image inpainting* (дорисовка изображений, восстановление изображений), включая современные архитектуры нейронных сетей [7, 8]. Суть данных методов заключается в вероятностном заполнении пустых областей таким образом, чтобы результат выглядел максимально органично для наблюдателя. Эти подходы оперируют в пространственной области, подбирая наиболее подходящие фрагменты-доноры из самого изображения или из внешних эталонных баз данных. Помимо удаления нежелательных элементов, технологии *inpainting* активно задействуются в реставрации архивных фотографий и произведений искусства, где требуется воссоздание поврежденных пиксельных структур. Реализация алгоритма использующую подходы описанные в [7, 8] использована ниже для иллюстраций заполнения лакун на тестовых изображениях. Кроме того, для сравнения результатов по заполнению лакун с помощью других методов, здесь используется программный продукт, созданный известной российской компанией Movavi, использующий для своей работы нейросеть [9].

Такие методы как интерполяция или *image inpainting*, лишь ретушируют лакуны, но не пытаются восстановить утраченную информацию. Это не является допустимым при обработке медицинских изображений или данных дистанционного зондирования. Специфика аэрокосмической съемки – аппаратные ограничения и влияние облачности. Что часто может приводить к появлению незаполненных областей (лакун) в массивах данных. Восстановление этих участков необходимо для точного картографирования рельефа и анализа атмосферных характеристик. Традиционные интерполяционные модели эффективны лишь для изображений с низкой контрастностью, где автокорреляционная функция шире размеров пропусков. В более сложных

случаях для реконструкции данных целесообразно использовать информацию из смежных баз данных. Методы, представленные в [10], предполагают синтез данных с нескольких космических аппаратов, что позволяет получать ежедневные глобальные радиотепловые карты для мониторинга процессов системы океан – атмосфера. Развитием этого подхода являются мультисенсорные алгоритмы, адаптированные под разные типы приборов и временные интервалы съемки [11]. Однако, согласно выводам [11], даже такие алгоритмы имеют ограничения: они не гарантируют высокую точность восстановления данных в каждой точке, а лишь нивелируют краевые эффекты, возникающие при сшивке полос сканирования из-за нехватки исходных данных.

Поэтому, кроме упомянутых выше способов интерполяции, работающих в пространственной области, для реконструкции лакун применяют спектральные методы. Они уже претендуют не только на ретуширование лакун или маскировку, но и (при определенных условиях) на восстановление утерянных данных. В первую очередь необходимо упомянуть различные модификации метода проекций на выпуклые множества (projections onto convex sets, POCS). Этот метод был введен в работах [12, 13] как итерационный алгоритм восстановления сигнала. Поскольку восстановление сигналов конечной энергии можно рассматривать как проблему интерполяции, то решение задачи происходит итеративно, при удовлетворении временных и частотных ограничений. В результате получается приближение к сигналу с заданными выборками. Таким образом, чтобы получить итеративное решение POCS, полагают, что интересующие сигналы не являются бесконечными во времени и ограничены по частоте. В частности, в алгоритме Гершберга – Папулиса поочередно применяется два ограничения. Во-первых: зануляются амплитуды гармоник за пределами известной полосы (это проекция на выпуклое множество сигналов с ограниченным спектром). Во-вторых: возвращаются известные значения сигнала в исходных точках (это проекция на выпуклое множество сигналов, соответствующих измеряемым данным). Поскольку оба этих ограничения формируют выпуклые множества в пространстве сигналов,

алгоритм Гершберга-Папулиса математически эквивалентен последовательному проецированию на два выпуклых множества в POCS [14].

В [15] был представлен метод интерполяции последовательно вычисляемого спектра (МИПВС) Фурье, позволяющий ретушировать и восстанавливать отсутствующие части изображения. Он отличается от POCS тем, что заполнение лакун делается итерационно, от нулевой пространственной частоты до наивысшей пространственной частоты, на основе спектра присутствующей части изображения. Его модификация включает в него внутреннюю процедуру дополнительного итерационного уточнения каждой из гармоник. Кроме того, существует алгоритм метода амплитудных итераций (МАИ), который подобно МИПВС и POCS работает в частотной области, но производит итерационные вычисления сразу по всему полю спектра и только в зависимости от значений амплитуд гармоник [16]. Сравнительный анализ POCS, МИПВС и МАИ выявил то, что некоторым преимуществом среди них обладает метод интерполяции последовательно вычисляемого спектра Фурье. Этим объясняется его выбор как основного метода для реконструкции лакун в предлагаемой работе. Именно с МИПВС сравниваются альтернативные методы: сплайн, *image inpainting* и Movavi.

Существуют еще и другие методы реконструкции лакун, в том числе с помощью фракталов, но в нашем исследовании они не обсуждаются.

1. Демонстрация работы методов в задачах интерполяции и реконструкции сплошных лакун

Рисунки в предлагаемой работе приводятся в «градациях серого» (*Grayscale*). Это шкала цветов от черного до белого, где каждый оттенок показывает уровень яркости. В стандартном 8-и битном цифровом режиме для каждого пикселя есть 256 разных вариантов серого цвета.

Начнем с тестового изображения «фрагмент текста» рис. 1а. Исходное изображение с лакуной (черный цвет) показано на рис. 2б.

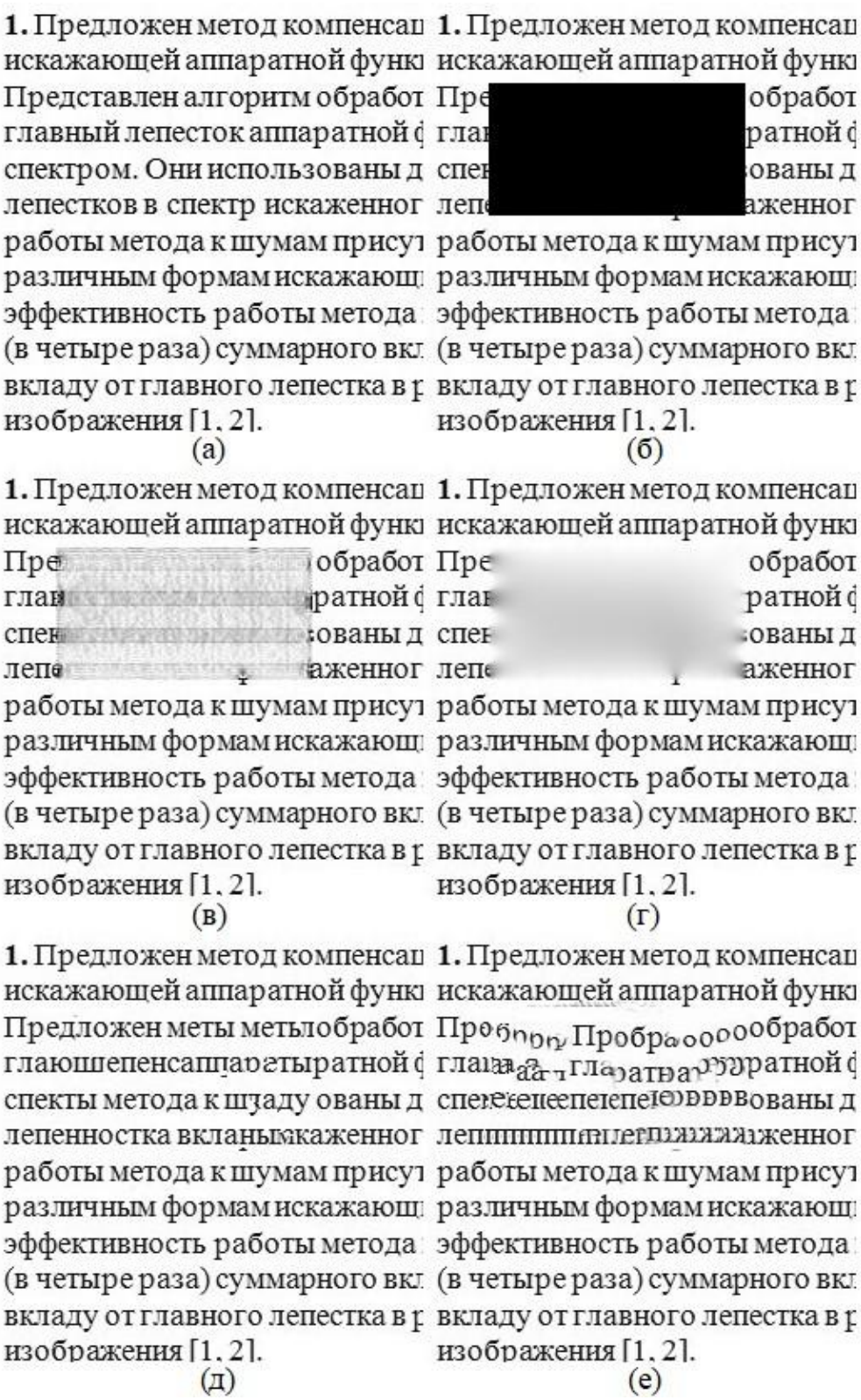


Рис. 1. Исходное изображение «фрагмент текста» – (а).
Изображение рис. 1а с лакуной – (б).
Результаты обработки рис. 1б МИПВС – (в).
Результаты обработки рис. 1б сплайн – (г).
Результаты обработки рис. 1б *image inpainting* – (д).
Результаты обработки рис. 1б Movavi – (е).

Из-за того, что сплошная лакуна занимает значительный объем МИПВС, пытаясь реконструировать данные, способен только наметить строки и на несколько пикселей внутрь лакуны отражает продолжение пограничных букв (рис. 2в). Сплайн, как ему и положено по определению, опираясь на края, заполняет пространство лакуны пикселями с плавно меняющейся яркостью, без какого-либо намека на внутреннюю структуру утерянного фрагмента (рис. 1г). Гораздо интересней ведет себя наша реализация метода *image inpainting* [7, 8]. Происходит реконструкция целого слова «Предложен» в левом верхнем углу лакуны рис. 1д. Хотя это является ошибкой. Дело в том, что на самом деле поглощено слово «Представлен» см. рис. 1а (третья строка). Это следствие того, что *image inpainting* проводил поиск по известной части изображения и нашел только один подходящий вариант. Реконструкция остальной части лакуны просто набор букв, хотя в одном месте вставлено вполне читаемое слово «метода» (оно дважды встречается в неповрежденной части изображения). Однако, если посмотреть издалека и не пытаться вчитываться в содержимое, то создается впечатление того, что изображение реконструировано. Программный продукт Movavi справляется с этой задачей хуже, чем *image inpainting.* Даже если бросить поверхностный взгляд на рис. 1е, то сразу видно, что строки «поплыли», т.е. нарушается структура текста.

Рассмотрим пример, когда поставлена задача маскировки некоего объекта на изображении. В качестве тестового изображения «Усадьба» (рис. 2а) возьмем фрагмент общедоступной фотографии из интернета:
https://ru.pinterest.com/pin/salzburg-austria--
1077346161446627/?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera

Рис. 2б это исходное изображение рис. 2а с лакуной (черный цвет), закрывающей объект «Дом». МИПВС (рис. 2в) и сплайн (рис. 2г) образуют на месте лакуны некоторую размытую область. Это, очевидно, вызовет у наблюдателя подозрения о том, что происходит попытка скрыть информацию. *Image inpainting* (рис. 2д) и Movavi (рис. 2е) так заполняют лакуну, что у наблюдателя может создаться впечатление о том что фото не подвергалось

коррекции. Т.е. задача маскировки решена успешно. По экспертной оценке, результат работы *image inpainting* (рис. 2д) выглядит наиболее убедительно.

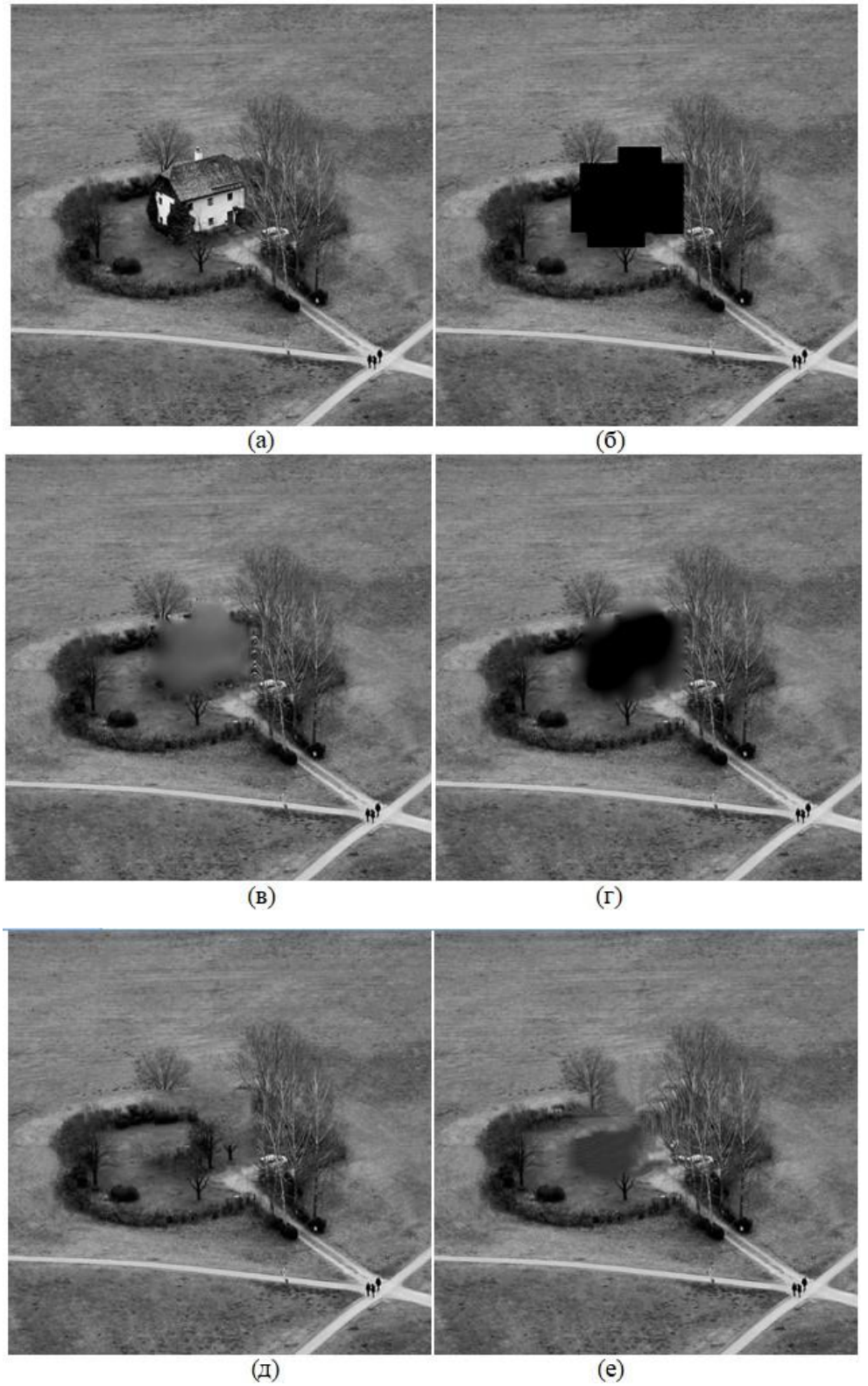


Рис. 2. Исходное изображение «Усадьба» – (а). Изображение рис. 2а с лакуной – (б). Результаты обработки рис. 2б МИПВС – (в). Результаты обработки рис. 2б сплайн – (г). Результаты обработки рис. 2б *image inpainting* – (д). Результаты обработки рис. 2б Movavi – (д).

К решению задач маскировки объектов на изображениях нужно подходить с осторожностью. Необходимо иметь ввиду то, что если лакуна своей границей захватит нежелательные области, либо в базе данных будут отсутствовать элементы необходимые для реалистичного ретуширования, то программа «дорисует» содержимое реконструируемой части на свое усмотрение. Для иллюстрации подобного случая используем фрагмент общедоступного изображения актрисы Николь Кидман (источник https://vk.ru/wall-59245439_1217550). Образец отформатирован и обрезан до размера $N \times N$ (256 на 256 пикселей).

Лакуна на рис. 3б создана таким образом, чтобы полностью закрыть глаза. Кроме того, ширина лакуны больше ширины лица актрисы. Эти обстоятельство являются следствием возникновения специфических объектов внутри ретушируемой области при использовании *image inpainting* (рис. 3д) и Movavi (рис. 3е). *Image inpainting* (рис. 5д), по причине отсутствия подходящих фрагментов типа «глаза» на неповрежденной части рис 5б, заполнил лакуну узором похожим на темные очки. Программный продукт Movavi, в соответствии с заложенным алгоритмом, несколько раз повторил нос.

Поскольку сплошная лакуна занимает значительный объем, МИПВС, пытаясь реконструировать данные, способен реконструировать только узкую кайму по периметру лакуны. Ближе к центру лакуна заполнена пикселями с плавно меняющейся яркостью (рис. 5в). Сплайн, опираясь на края лакуны, принципиально не будучи способным к реконструкции, заполняет все пространство пикселями с плавно меняющейся яркостью (рис. 5г).



Рис. 3. Исходное изображение «Николь Кидман» – (а). Изображение рис. 3а с лакуной – (б). Результаты обработки рис. 3б МИПВС – (в). Результаты обработки рис. 3б сплайн – (г). Результаты обработки рис. 3б *image inpainting* – (д). Результаты обработки рис. 3б Movavi – (е).

При реконструкции (а не интерполяции или маскировки) сплошных лакун для узкополосных одномерных сигналов и изображений с плавно меняющейся структурой удовлетворительные результаты дают методы, работающие в частотной области [15-17]. В данной работе их представляет метод интерполяции последовательно вычисляемого спектра Фурье. Это же относится к реконструкции разреженных изображений или голограмм [18], а также восстановления данных в относительно узких сплошных лакунах на изображениях.

При восстановлении произведений искусства под «сплошной лакуной» понимают масштабную потерю авторского слоя. При работе должен быть соблюден принцип обратимости и отличимости. Т.е. современная реставрация запрещает «дорисовывать» автора там, где стена или холст полностью пусты. Однако есть возможность сделать виртуальную реконструкцию. Рис. 4 [19] демонстрирует работу МИПВС по реконструкции относительно узкой лакуны на конкретном примере: восстановления утраченного фрагмента общеизвестной иконы «Господь Вседержитель» (первая половина XIII века) из Центрального музея древнерусской культуры и искусства имени Андрея Рублева (г. Москва). Рис. 3в показывает достаточно высокое качество виртуальной реконструкции лакуны, которая помечена черным цветом на рис. 3б. В то же время остальные виды интерполяции, примененные для заполнения утраченной области изображения, только ретушируют ее рис. 1(г, д, е).

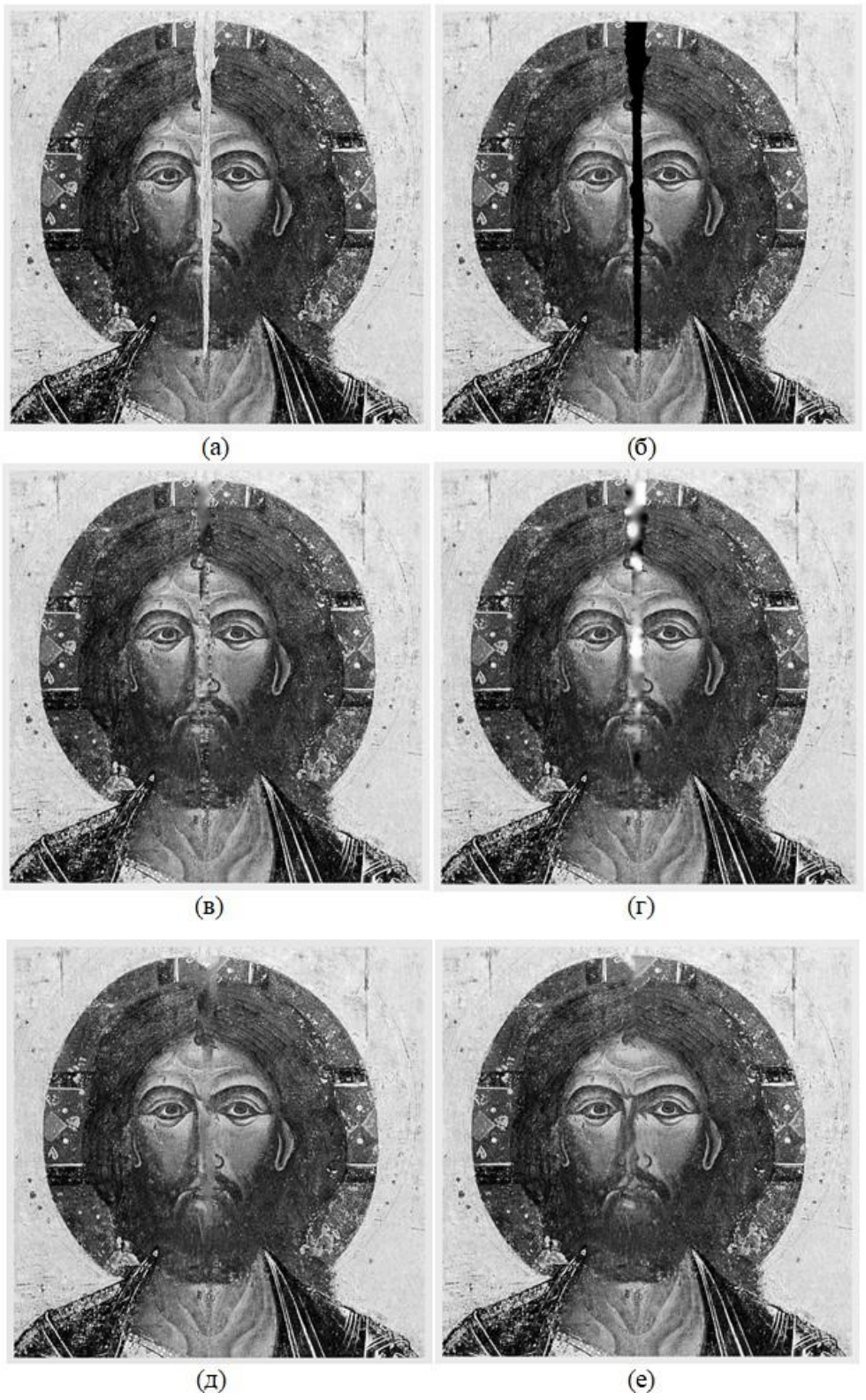


Рис. 4. Исходное изображение фрагмента иконы «Господь Вседержитель» – (а).
Изображение рис. 3а с лакуной – (б).
Результаты обработки рис. 3б МИПВС – (в).
Результаты обработки рис. 3б сплайн – (г).
Результаты обработки рис. 3б *image inpainting* – (д).
Результаты обработки рис. 3б Movavi – (д).

В дополнении ко всему вышесказанному необходимо привести пример применения метода интерполяции последовательно вычисляемого спектра Фурье в практической задаче. Он использован для предобработки карт ошибок формы поверхностей рентгенооптических элементов перед ионно-пучковой коррекцией, устраняющие локальные дифракционные артефакты, возникающие при интерферометрических измерениях. «Экспериментальная проверка на данных двухзеркального объектива рентгеновского микроскопа показала, что такая предобработка исключает ложные сигналы в картах времени экспозиции ионного пучка, что позволит повысить точность ионного травления» [20].

Заключение

В данной работе систематизирован опыт решения задач ретуширования и восстановления целостности изображений с обширными областями повреждений. Реконструкция протяженных лакун представляет собой более сложную вычислительную задачу по сравнению с заполнением точечных пропусков, что обусловлено потерей фазовой и динамической информации о сигнале. Ключевым ограничением существующих алгоритмов является неспособность обеспечить структурную связность и визуальную согласованность при заполнении крупных фрагментов изображения.

Задача интерполяции (маскировки) лакун на изображениях может быть эффективно решена с помощью технологий *image inpainting* и нейронных сетей (методов глубокого обучения). Однако при использовании подобных подходов надо соблюдать осторожность. Поскольку, при определенных условиях возможно возникновение ложных объектов. Подобные ошибки не допустимы при обработке медицинских изображений и работе с научными данными дистанционного зондирования. Аналогично нельзя без подтверждения использовать подобные результаты в целях служб безопасности.

При реконструкции (а не ретушировании) содержимого лакун предпочтительным является использование методов, работающих в частотной области (например: метод интерполяции последовательно вычисляемого спектра

Фурье). Они особенно эффективны для узкополосных одномерных сигналов и изображений с плавно меняющейся структурой. Это же относится к восстановлению данных в относительно узких сплошных лакунах на любых изображениях.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН.

Литература

1. Зверев В.А. Радиооптика. – М. «Советское радио» – 1975. – С. 304
2. Аксенов А.П. Математический анализ. Ряды Фурье. Интеграл Фурье. Суммирование расходящихся рядов. Учебное пособие. – 1999. – С. 86.
3. Страхов В.Н., Страхов А.В. Аппроксимационный подход к решению задач гравиметрии и магнитометрии // Российский журнал наук о Земле. – 1999. – Т. 1. – №. 4.
4. Щерба Е.В. Анализ применимости методов интерполяции и экстраполяции для решения задачи восстановления изображения. // Компьютерная оптика, – 2009 – том 33. – №3 – С. 336-339.
5. Ашкеназы В.О. Сплайн-поверхности. Основы теории и вычислительные алгоритмы // Тверь: Тверской гос. ун-т. – 2003. – 82 с.
6. Нестеренко Е.А. Возможность использования сплайн-поверхности для построения поверхностей по результатам съемок // Записки Горного института. – 2013. – Т. 204. – С. 127-133.
7. Qureshi M.A. et al. A critical survey of state-of-the-art image inpainting quality assessment metrics // Journal of Visual Communication and Image Representation. – 2017. – V. 49. – P. 177-191. https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2017.09.006

8. Chen Z. et al. Structure-aware image inpainting using patch scale optimization // Journal of Visual Communication and Image Representation. – 2016. – V. 40. – P. 312-323. http://dx.doi.org/10.1016/j.jvcir.2016.06.029
9. Movavi Photo Editor. Source: (https://www.movavi.com/photo-editor/).
10. Астафьева Н.М., Раев М.Д., Шарков Е.А. Глобальное радиотепловое поле системы океан-атмосфера по данным микроволновых космических комплексов // Исследование Земли из космоса. – 2006. – № 4. – С. 64-70.
11. Ермаков Д.М., Шарков Е.А., Чернушич А.П. Мультисенсорный алгоритм спутникового радиотепловидения // Исследование Земли из космоса. – 2016. – №. 3. – С. 37-37.
12. Брэгман Л.М. Нахождение общей точки выпуклых множеств методом последовательного проектирования // Доклады Академии наук. – Российская академия наук, 1965. – Т. 162. – №. 3. – С. 487-490.
13. Гурин Л.Г., Поляк Б.Т., Райк Э.В. Методы проекций для отыскания общей точки выпуклых множеств // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1967. – Т. 7. – №. 6. – С. 1211-1228.
14. Youla D.C., Webb H. Image Restoration by the Method of Convex Projections: Part 1. Theory // IEEE transactions on medical imaging. – 1982. – Т. 1. – №. 2. – С. 81-94.
15. Кокошкин А.В. и др. Ретуширование и восстановление отсутствующих частей изображений с помощью итерационного вычисления их спектров // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43. – №. 6. – С. 1030-1040. https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-6-1030-1040
16. Кокошкин А.В. Методы интерполяции разреженных изображений, работающие в частотной области // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 3. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.3.10
17. Кокошкин А.В., Коротков В.А., Новичихин Е.П. Реконструкция акустических сигналов по неполным данным // Радиотехника и электроника. – 2020. – Т. 65. – №. 12. – С. 1181-1189. https://doi.org/10.31857/S0033849420120104

18. Черепенин В.А. и др. Восстановление подповерхностных радиоголограмм как полностью, так и частично измеренных, разными методами // Радиотехника и электроника. – 2017. – Т. 62. – №. 7. – С. 672-680. https://doi.org/10.7868/S0033849417070038
19. Кокошкин А.В. и др. Применение методов цифровой обработки изображений для целей реставрации объектов изобразительного искусства // Журнал радиоэлектроники. – 2018. – №. 9. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.9.16
20. Дедкова А.А., Чернышев А.К., Кокошкин А.В. Алгоритмы предобработки карт поверхности для ионно-пучковой коррекции // Журнал технической физики. – 2026. – Т. 96. – №. 10. – С. 2059-2068. https://doi.org/10.61011/JTF.2026.10.63624.149-26

Для цитирования:

Кокошкин А.В. Особенности реконструкции сплошных лакун на изображениях // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – № 10. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.10.4