

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.3.10>

УДК: 621.397

МЕТОДЫ ИНТЕРПОЛЯЦИИ РАЗРЕЖЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, РАБОТАЮЩИЕ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

А.В. Кокошкин

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал
141190, Фрязино, пл. Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 27 февраля 2023 г.

Аннотация. В работе производится сравнение работы методов интерполяции разреженных изображений таких как: метод интерполяции последовательно вычисляемого спектра Фурье (МИПВС), метод проекций на выпуклые множества (projections onto convex sets, POCS), и метод амплитудных итераций (МАИ). Все вычисления необходимые для реконструкции разреженных изображений производятся только над пространственными спектрами. В качестве примера используется аэрокосмическое цифровое изображение характерное для задач дистанционного зондирования земной поверхности. Моделируется высокая степень разреженности (отсутствует 90 процентов информации). Эффективность работы исследуемых методов проведена по нескольким объективным критериям.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, разреженные цифровые изображения, обработка изображений, метод интерполяции последовательно вычисляемого спектра Фурье, метод проекций на выпуклые множества, метод амплитудных итераций, мера гистограммного подобия.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН № 075-01110-23-01.

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

Введение

При дистанционном зондировании Земли с помощью аэрокосмических аппаратов чрезвычайно актуальной являются задачи реконструкции областей цифровых изображений незаполненных данными [1-5]. Такие области могут возникать из-за методик измерений, сбоя регистрирующей аппаратуры и по другим причинам. Кроме того, когда необходимо снизить общий объём памяти для записи измерений (особенно при наблюдениях в реальном времени), специально прибегают к различным алгоритмам сжатия или прореживания входных данных.

В предлагаемом исследовании методики реконструкции применяются к разреженным изображениям (из неравномерно расположенных выборок). Т. е. к таким изображениям, по всему полю которых имеется в наличии только некоторое количество элементов, в то время как большинство элементов отсутствует. Моделируется высокая степень разреженности (отсутствует 90 процентов информации). Для восстановления цифровых изображений используются методы, разработанные в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. В работах [6-9] были подробно описаны алгоритмы для метода интерполяции последовательно вычисляемого спектра Фурье (МИПВС), метода проекций на выпуклые множества (projections onto convex sets, POCS) и метода амплитудных итераций (МАИ), адаптированные для реконструкции разреженных двумерных сигналов. Предлагаемая работа отличается от предыдущих тем, что эффективность каждого из используемых здесь методов оценивается по представительному ряду достаточно объективных критериев качества в сравнении с эталоном (неискажённым изображением). Кроме того, между собой сравниваются методы работающие исключительно в частотной области, т. е. все вычисления необходимые для реконструкции разреженных изображений производятся только над пространственными спектрами.

1. Сравнительный анализ методов реконструкции разреженных изображений в частотной области

В качестве исходного (идеального, неискажённого) использовано изображение, полученное со спутника – фрагмент города Сан-Диего в США [8,9], размером 512 на 512 пикселей – рис. 1а. Яркости распределяются от 1 – условно чёрный цвет, до 255 – белый цвет. На этом аэрокосмическом изображении хорошо виден пришвартованный в порту Авианосец USS "Midway" (расположен посередине левой стороны рисунка), с 1998 года корабль-музей. Это изображение в качестве исходного выбрано из-за того что оно является характерным (типичным) в задачах дистанционного зондирования земной поверхности. Оно является высококонтрастным, с наличием большого числа разномасштабных элементов. На рис. 1б. показана автокорреляционная функция (АКФ) для исходного изображения рис. 1а. По вертикали рис. 1б отложены значения нормированной АКФ, по остальным осям – значения индексов пикселей яркостей в поле изображения.

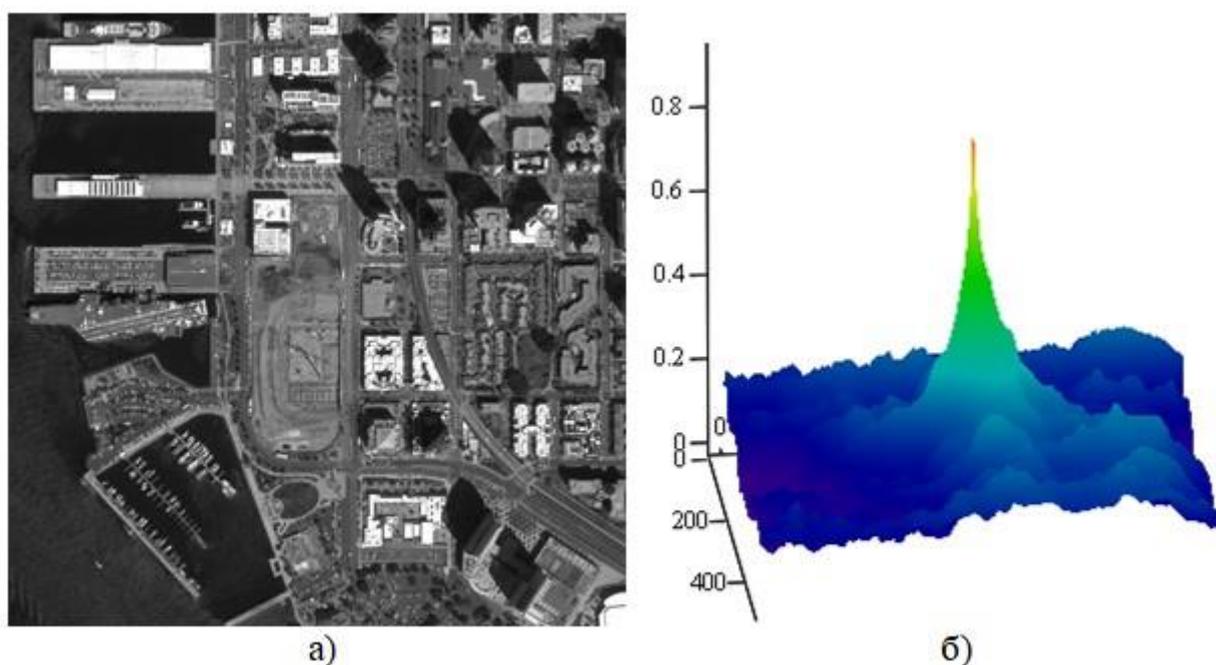


Рис. 1. Исходное цифровое изображение "Сан-Диего" размером 512 на 512 пикселей – а); Автокорреляционная функция для исходного изображения – б)

В общем виде радиус корреляции АКФ указывает на каком расстоянии отсчеты (пиксели изображения) можно считать статистически независимыми. Чем более однородной является область изображения, тем больше для нее радиус

корреляции. Участки с небольшой вариацией яркостей на поле изображения, с точки зрения корреляционного анализа, являются малоинформативными. Для аэрокосмических изображений это могут быть моря, поля и т.п. В нашем примере городская застройка и очертания порта с пришвартованными судами создают на изображении частые перепады яркостей.

В таблице 1 показаны условные радиусы корреляции исходного неискажённого изображения для различных уровней АКФ.

Таблица 1. Условный радиус корреляции изображений

Уменьшение от максимума нормированной АКФ	0.8	0.7	0.5
"Сан-Диего" Расстояние в пикселях от максимума АКФ	3	6	25

На основании анализа АФ можно утверждать, что создавать разреженность на изображении для экономии объёма памяти надо с большой осторожностью. Иначе, если достаточное для реконструкции мелких деталей изображения количество пикселей разреженного изображения не укладывается в радиус АКФ, то и восстановления не произойдёт. «Если в примере с аэрокосмическим изображением "Сан-Диего" наиболее информативными участками считать городскую часть, дороги, очертания порта с пришвартованными крупными судами, тогда возможно разредить исходный снимок на 90 процентов. Однако, если целью являются отдельные автомобили и небольшие катера, то необходимо добавить в разреженное изображение значимой информации» [8].

Используя рис. 1а смоделируем разреженное изображение. Т. е., как и в [8,9], по случайно-равномерному закону удалим девяносто процентов информации из рис. 1а., таким образом получим рис. 2б. Чёрное поле (градация яркости = 0) на рис. 2б соответствует отсутствующим данным, а оставшиеся десять процентов информативных элементов изображения имеют свои изначальные значения как на рис. 1а (от 1 до 255).

На рис. 2б показана реконструкция разреженного изображения рис. 2а с помощью метода интерполяции последовательно вычисляемого спектра Фурье. Разреженность 90 процентов, как было показано в [8], позволяет использовать только одну итерацию при 128 восстановленных гармониках для реконструкции относительно крупномасштабных деталей изображения. Методы проекций на выпуклые множества (рис. 2в) и амплитудных итераций (рис. 2г), по «экспертной оценке» чуть менее успешно справляются с поставленной задачей.

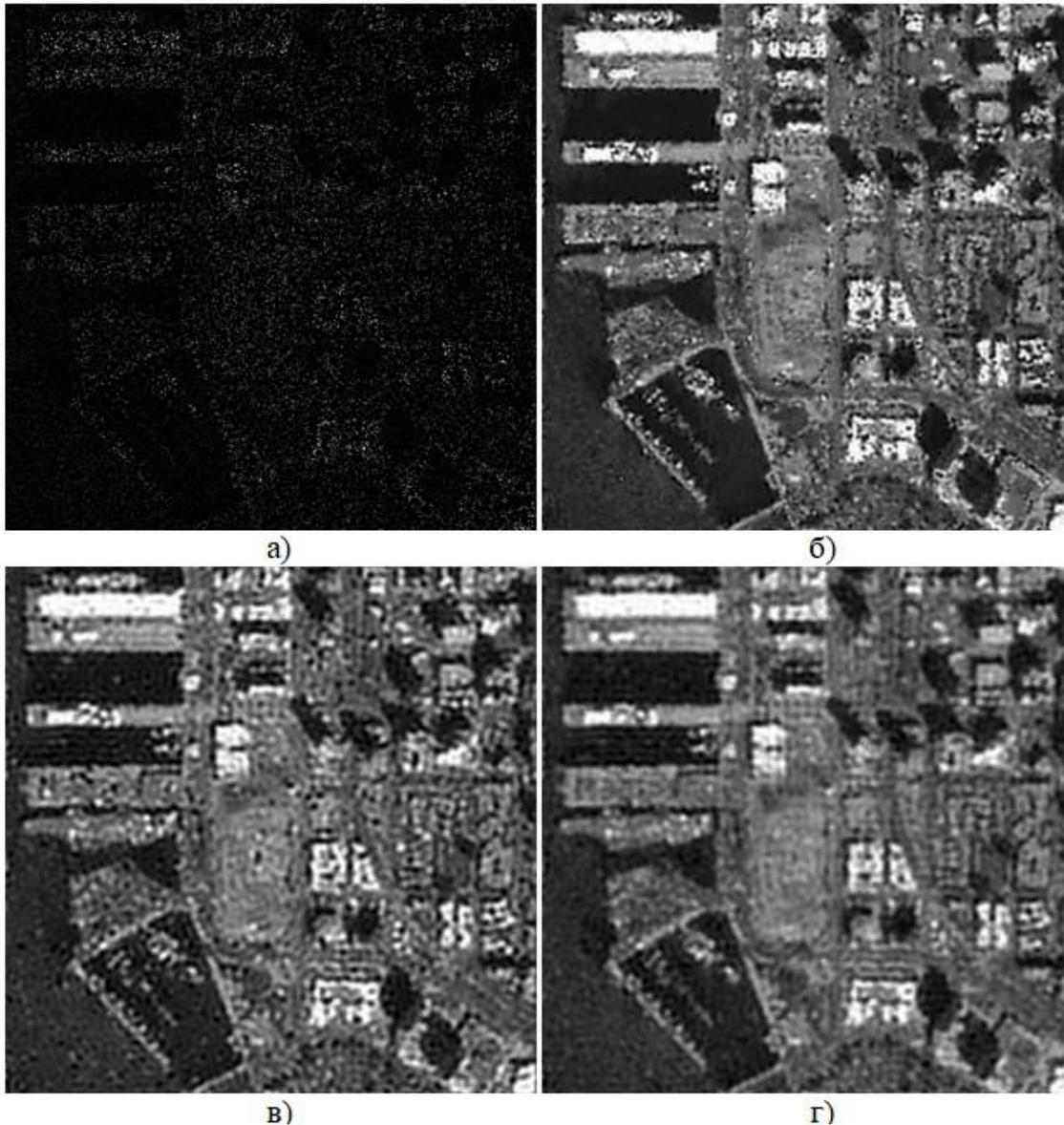


Рис. 2.

Разреженное изображение (известно 10 процентов от общего объёма данных рис. 1а) – а); Восстановление МИПВС рис. 2а (количество итераций 1, количество гармоник 128) – б); Восстановление РОСS рис. 2а (частотное окно 63, 2500 итераций) – в); Восстановление МАИ рис. 2а (частотное окно 63, 2500 итераций) – г)

На изображении, интерполированном с помощью POCS, присутствует достаточно большое количество мешающих артефактов – рис. 2в. Изображение с восстановлением утерянной информации МАИ, эксперт – наблюдатель может охарактеризовать как немного «размытое». Для всех трёх тестируемых методов, не смотря на некоторые артефакты и искажения, все значимые объекты (городские постройки, очертание порта, авианосец) имеют вполне узнаваемый вид. При этом малые относительно радиуса корреляции АФ элементы изображения (автомобили, самолёты на борту авианосца и т. п.) не восстанавливаются. Как и в работе [8], для дополнительного контроля сохранения информативности реконструированного изображения используем Content-based image retrieval (CBIR) – раздел компьютерного зрения, решающий задачу поиска изображений, которые имеют требуемое содержание, в большом наборе цифровых изображений. Интеллектуальная система Яндекс по поиску изображения в интернете на основании рис. 2б, рис. 2в и рис. 2г классифицирует их как аэрокосмическое изображение и предлагает "похожие". Таким образом, для всех трёх исследуемых методов, допустимую разреженность необходимо выбирать для каждой конкретной технической задачи, и под определённый тип изображений.

На рис. 3 показаны в логарифмическом масштабе амплитудные пространственные спектры: исходного («идеального») изображения (рис. 1а) – рис. 3а; реконструкция разреженности с помощью МИПВС (рис. 2б) – рис. 3б; реконструкция разреженности с помощью POCS (рис. 2в) – рис. 3в; реконструкция разреженности с помощью МАИ (рис. 2г) – рис. 3г. По вертикали рис. 3 отложены значения амплитуд пространственных спектров (в логарифмическом масштабе), по остальным осям – значения индексов пикселей яркостей в поле изображений. Поскольку уже было сказано во введении – алгоритмы для всех используемых здесь методов были подробно описаны в работах [6-9], то здесь ограничимся лишь замечанием, что амплитудные спектры реконструкций разреженности высокой степени (отсутствует 90 процентов информации) имеют существенные отличия от спектра исходного «эталона».

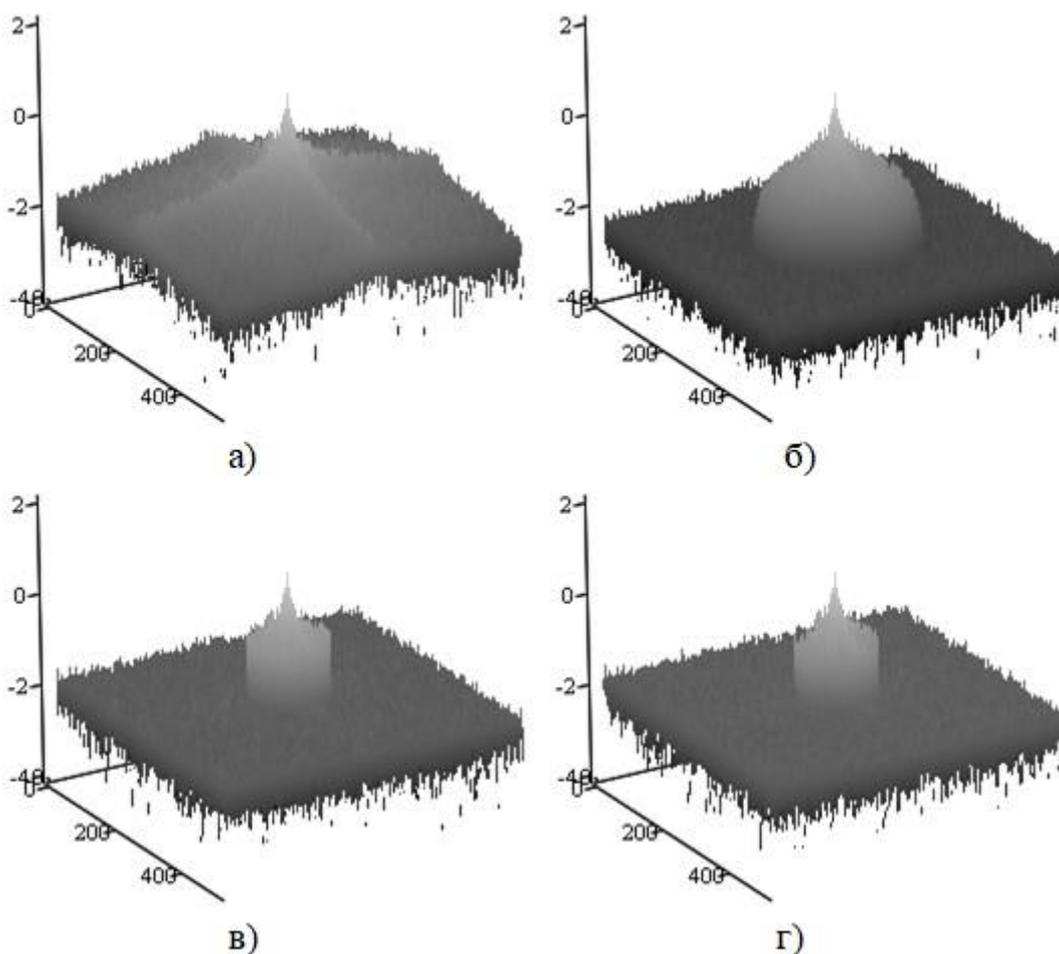


Рис. 3. Амплитудные пространственные спектры (в логарифмическом масштабе): исходного («идеального») изображения (рис. 1а) – а); реконструкция разреженности с помощью МИПВС (рис. 2б) – б); реконструкция разреженности с помощью POCS (рис. 2в) – в); реконструкция разреженности с помощью МАИ (рис. 2г) – г)

Теперь перейдём к объективным оценкам качества реконструированных изображений. В таблице 2 приведены вычисленные по [10,11]: МСП – мера структурного подобия, ОР – оценка резкости, СК – средний контраст, СКО1 – среднеквадратичное отклонение от своего среднего значения, СКО2 – среднеквадратичное отклонение попиксельной разницы между эталонным и реконструированным изображением, эксцесс, асимметрия.

Мера структурного подобия максимальна при сравнении исходного «идеального» изображения с самим собой – равна 1. Для всех трёх методов реконструкции разреженности МСП практически одинаковы (отличаются друг от друга только в единицах процентов).

Таблица 2. Объективные оценки качества реконструированных изображений

	Исходное	МИПВС	POCS	МАИ
мера структурного подобия	1	0.847	0.822	0.855
оценка резкости	16.441	5.808	5.069	3.826
средний контраст	0.176	0.135	0.148	0.108
СКО1	53.874	52.493	52.55	49.021
СКО2	0	29.462	31.743	27.718
экссесс	1.225	0.828	0.688	1.019
асимметрия	1.128	0.972	0.892	0.918

Оценка резкости исходного изображения существенно (более чем в три раза) превышает ОР тестируемых методов. Необходимо заметить, что МИПВС ближе других методов по оценке резкости к эталонному.

Средний контраст у восстановленных изображений существенно ниже, чем у исходного образца. Превышение СК для POCS над СК для МИПВС можно объяснить наличием паразитных артефактов у интерполяции с помощью POCS (рис. 2в).

СКО1 для МИПВС и для POCS ближе к значению «идеала» чем СКО1 для МАИ. Это вполне объяснимо тем, что, по экспертной оценке, рис 2г выглядит более «размытым» чем рисунки для конкурирующих методов (рис. 2б и рис. 2в).

СКО2 (среднеквадратичное отклонение попиксельной разницы между эталонным и реконструированным изображением) показывает наилучший результат для МАИ. Это может свидетельствовать о том, что, в среднем, метод амплитудных итераций вполне адекватно реконструирует отсутствующие данные несмотря на некоторую общую размытость рис. 2г. МИПВС тоже имеет значение СКО2 меньше 30. Худший результат по осуждаемому показателю имеет POCS очевидно из-за относительно большого, по сравнению с конкурирующими методами, количества артефактов.

Экссесс значений яркостей для цифрового изображения указывает, насколько плоско- или островершинным является распределение при сравнении

с нормальным распределением. То, что вычисленные значения эксцесса для всех изображений больше нуля, указывает на то, что все распределения островершинные (относительно нормального, эксцесс которого равен нулю). Что касается абсолютных значений эксцесса для исследуемых методов, то вряд ли можно однозначно говорить о том хороши или плохи эти показатели в свете сравнения реконструированных изображений с исходным.

Асимметрия значений яркостей для цифрового изображения измеряет асимметрию распределения около среднего. Положительные значения асимметрии для всех трёх методов указывают на то, что "хвост" распределения вытянут в направлении положительных значений. Если бы асимметрия значений яркостей изображения была равна нулю, то распределение было бы симметрично около своего среднего (как в случае нормального). По этому показателю метод интерполяции последовательно вычисляемого спектра Фурье, хотя и не на много, но превосходит конкурентов в этом исследовании – он ближе к «идеальному».

Проанализировав данные таблицы 2 можно констатировать, что по вычисленным выше объективным оценкам качества реконструированных изображений, некоторое (весьма незначительное) преимущество перед конкурирующими методами имеет МИПВС. Экспертная оценка тоже склоняется на сторону метода интерполяции последовательно вычисляемого спектра Фурье. В дополнении к проведённому сравнительному анализу, для большей убедительности, имеет смысл добавить ещё один объективный критерий качества. Ведь некоторые из оценок могут выдать противоречивые результаты. Например, зачем вычислять эксцессы если островершинность распределений яркостей восстановленных изображений при этом сравнивая их не с распределением яркостей эталонного (исходного) неискажённого изображения, а с нормальным распределением!? Таким образом, естественно возникает мысль, что лучше сравнивать формы распределений яркостей реконструированных изображений с аналогичным распределением для эталона. Реализовать практически это можно на гистограммах. Причём гистограммы необходимо

немного «огрубить», т. е. не брать их по всем градациям яркостей (256), а вычислять усреднено, например по 8 (получим 32 столбика в каждой гистограмме). Это связано с тем, что пиксели некоторых из градаций яркостей могут чисто физически отсутствовать на тех или иных изображениях. Рис. 4 иллюстрирует нормированные гистограммы яркостей обсуждаемых изображений.

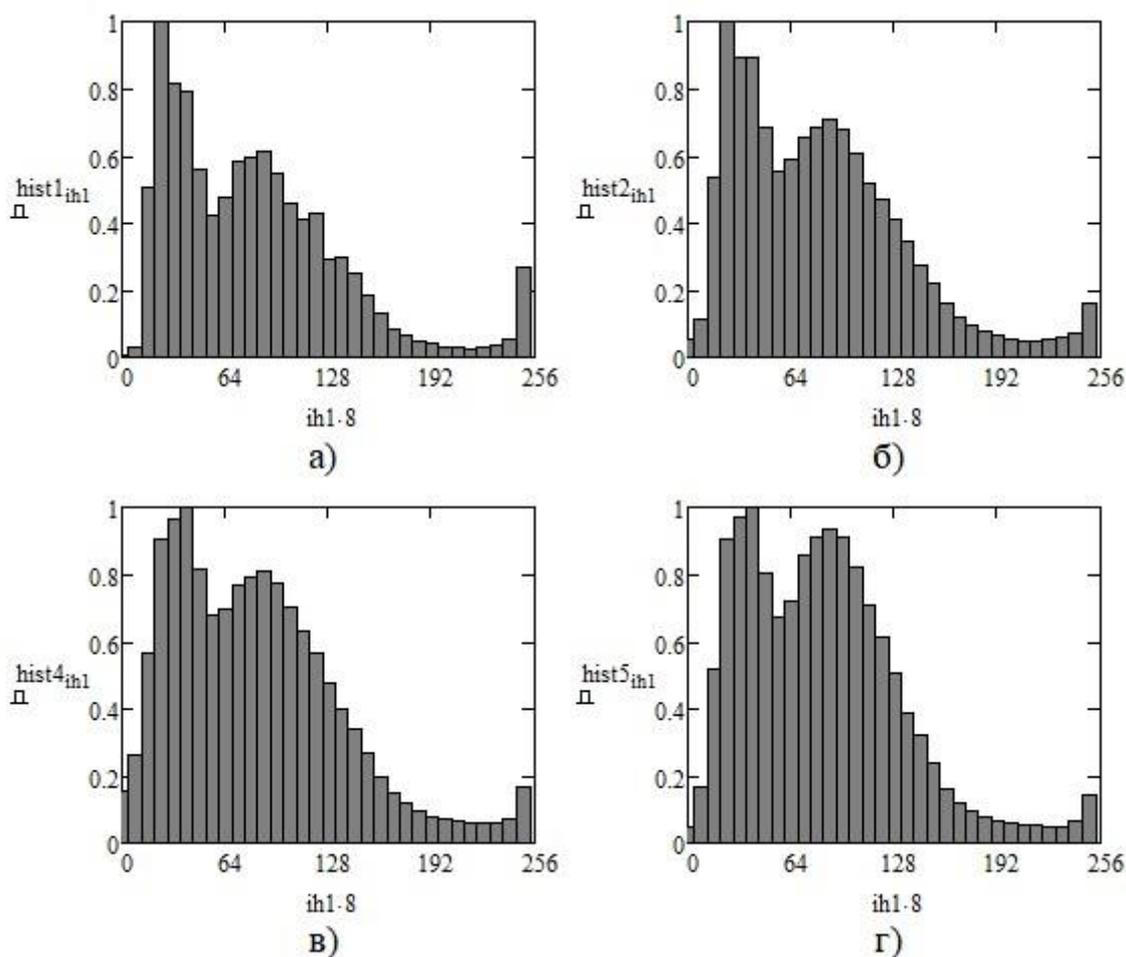


Рис. 4. Нормированные гистограммы яркостей изображений. Исходного неразрезанного (эталон) (рис. 1а) – (а); Восстановленного МИПС (рис. 2б) – (б); Восстановленного РОСС (рис. 2в) – (в); Восстановленного МАИ (рис. 2г)

При внимательном рассмотрении рис. 4 можно заметить, что вид гистограмм существенно меняется для разных методов интерполяции разреженности. И если каждую из них численно сравнить с «эталон» (рис. 4а), то будет получен ещё один критерий оценки качества изображений. По аналогии с уже известной мерой структурного подобия (structural similarity index

measure (SSIM)), назовём его «мера гистограммного подобия» (histogram similarity index measure (HSIM)).

Вычислять меру гистограммного подобия предлагается следующим образом:

$$HSIM = \frac{\sum_{ih1=0}^{31} |hist1_{ih1} - hist2_{ih1}|}{32}$$

В этой формуле: **hist1_{ih1}** – значения по столбикам эталонной нормированной гистограммы (рис. 4а); **hist2_{ih1}** – значения по столбикам тестируемой нормированной гистограммы (рис. 4б). Вычисляется усреднённый модуль разности по каждой паре столбиков гистограмм. В предлагаемом примере 32 равно количеству столбиков в гистограммах (256 делить на 8). Таким образом, приведённая выше формула вычисляет HSIM для МИПВС. Аналогично вычисляются меры гистограммного подобия для POCS, при этом подставляя в формулу как тестируемую гистограмму значения **hist4_{ih1}** (рис. 4в), или **hist5_{ih1}** (рис. 4г) при вычислении HSIM для МАИ. В таблице 3 приводятся вычисленные по предлагаемой методике меры гистограммного подобия для исследуемых изображений.

Таблица 3. Мера гистограммного подобия

	Исходное	МИПВС	POCS	МАИ
HSIM для нормированных гистограмм	0	0.063	0.126	0.135
HSIM для ненормированных гистограмм	0	866	1320	1462

HSIM для исходного (эталонного) изображения, в нашем случае, означает сравнение с самим собой, таким образом разница значений равна нулю. В случаях оценок реконструкций разреженности различными методами, значительное преимущество перед конкурентами имеет МИПВС. Причём наиболее существенно это проявляется, если для вычислений использовать данные нормированных гистограмм.

Заключение

В работе проведён сравнительный анализ работы методов интерполяции (реконструкции) разреженных изображений таких как: метод интерполяции последовательно вычисляемого спектра Фурье (МИПВС), метод проекций на выпуклые множества (projections onto convex sets, POCS), и метод амплитудных итераций (МАИ). Все вычисления необходимые для реконструкции разреженных изображений производятся только над пространственными спектрами. В качестве примера используется аэрокосмическое цифровое изображение характерное для задач дистанционного зондирования земной поверхности. Моделируется высокая степень разреженности (отсутствует 90 процентов информации). Для объективного контроля эффективности работы реализованных алгоритмов, для каждого из методов, приведены результаты оценок качества восстановленных цифровых изображений – мера структурного подобия, оценка резкости, средний контраст, среднее квадратичное отклонение, эксцесс и асимметрия распределения яркостей. Предложена новая оценка качества реконструкции цифровых изображений – «мера гистограммного подобия» (histogram similarity index measure (HSIM)).

По совокупности объективных показателей (оценок качества) можно сделать вывод о принципиальной возможности использования МИПВС, POCS и МАИ для восстановления информации разреженных изображений. При этом наиболее эффективным следует признать метод интерполяции последовательно вычисляемого спектра Фурье. Перспективной считается дальнейшая работа по усовершенствованию предложенных методик, в том числе в сочетании, как между собой, так и с привлечением других методов интерполяции (реконструкции), причём не только в частотной, но и в пространственной области.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН № 075-01110-23-01.

Литература

1. Park J., Park D-C, Marks R.J. II, El-Sharkawi M.A. Block loss recovery in DCT image encoding using POCS. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. 2002. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2002.1010686>
2. Huang H., Makur A. A new iterative reconstruction scheme for signal reconstruction. *Proceedings of the IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS '08)*. 2008. <https://doi.org/10.1109/APCCAS.2008.4746028>
3. Feichtinger H.G., Kozek W., Strohmer T. Reconstruction of signals from irregular samples of its short-time Fourier transform. *Wavelet Applications in Signal and Image Processing III*. 1995. V.2569. P.140-150. <https://doi.org/10.1117/12.217570>
4. Guven H.E., Ozaktas H.M., Cetin A.E., Barshan B. Signal recovery from partial fractional Fourier domain information and its applications. *IET Signal Processing*. 2008. V.2. №1. P.15-25. <http://doi.org/10.1049/iet-spr:20070017>
5. Serbes A., Durak L. Optimum signal and image recovery by the method of alternating projections in fractional Fourier domains. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2010. V.15. №3. P.675-689. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2009.05.013>
6. Кокошкин А.В., Коротков В.А., Коротков К.В., Новичихин Е.П. 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>
7. 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>
8. Кокошкин А.В., Новичихин Е.П. Применение метода интерполяции последовательно вычисляемого спектра Фурье к разреженным изображениям. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*. 2022. Т.14. №2. С.165-174. <https://doi.org/10.17725/rensit.2022.14.165>

9. Кокошкин А.В. Алгоритмы метода амплитудных итераций и POCS для реконструкции разреженных двумерных сигналов *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.9.7>
10. Кокошкин А.В., Коротков В.А., Коротков К.В., Новичихин Е.П. Сравнение объективных методов оценки качества цифровых изображений. *Журнал Радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2015. №6. <http://jre.cplire.ru/jre/jun15/15/text.html>
11. Gonzalez R.C., Woods R.E., *Digital Image Processing*. NJ. Prentice Hall, International Version 3rd Edition. 2012. 1071p.

Для цитирования:

Кокошкин А.В. Методы интерполяции разреженных изображений, работающие в частотной области. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2023. №3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.3.10>
