

DOI: 10.17725/rensit.2023.15.327

## Оценка качества изображений, полученных дистанционным зондированием

Кокошкин А.В., Новичихин Е.П.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, <http://fireras.su/>

Фрязино 141190, Московская область, Российская Федерация

E-mail: [shvarts65@mail.ru](mailto:shvarts65@mail.ru), [epnov@mail.ru](mailto:epnov@mail.ru)

Поступила 28.03.2023, рецензирована 03.04.2023, принята 10.04.2023

Представлена действительным членом РАЕН А.А. Потаповым

**Аннотация:** Предложено тестирование восстановленных цифровых изображений методами интерполяции последовательно вычисляемого спектра Фурье, сплайн-интерполяции, методом проекций на выпуклые множества (projections onto convex sets) и методом амплитудных итераций. Задача представляет собой реконструкцию смоделированной по случайно-равномерному закону разреженности (отсутствует 90 процентов информации). Кроме известных оценок качества изображений вводятся новые – мера гистограммного подобия, среднеквадратичное отклонение разницы фазовых спектров. Показано, что предложенные критерии эффективны для оценки качества полученных дистанционным зондированием изображений.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, обработка изображений, объективная оценка эффективности методов восстановления, мера гистограммного подобия, среднеквадратичное отклонение разницы фазовых спектров

УДК 621.397

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

**Для цитирования:** Кокошкин А.В., Новичихин Е.П. Оценка качества изображений, полученных дистанционным зондированием. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2023, 15(3):327-334. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.327.

## Evaluation of images quality obtained by remote sensing

Alexander V. Kokoshkin, Evgeny P. Novichikhin

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Fryazinsky branch, <http://fireras.su/>  
Fryazino 141190, Moscow region, Russian Federation

E-mail: [shvarts65@mail.ru](mailto:shvarts65@mail.ru), [epnov@mail.ru](mailto:epnov@mail.ru)

Received March 28, 2023, peer-reviewed April 03, 2023, accepted April 10, 2023

**Abstract:** Testing of digital images restoration by methods of sequentially calculated Fourier spectrum interpolation, spline interpolation, projections onto convex sets and amplitude iterations is proposed. The task is a reconstruction of the sparseness modeled according to the randomly uniform law (90 percent of the information is missing). In addition to the well-known image quality estimates, new ones are introduced - a measure of histogram similarity, the rms deviation of the difference in phase spectra. It is shown that the proposed criteria are effective for assessing the quality of images obtained by remote sensing.

**Keywords:** remote sensing, image processing, objective evaluation of the efficiency of reconstruction methods, measure of histogram similarity, standard deviation of phase spectrum difference

## UDC 621.397

*Acknowledgments:* The work was carried out within the framework of the state task of the Kotelnikov IRE of RAS No. 075-01110-23-01.

*For citation:* Alexander V. Kokoshkin, Evgeny P. Novichikhin. Evaluation of images quality obtained by remote sensing. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technology*, 2023, 15(3):327-334e. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.327.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (328)
  2. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ К РАЗРЕЖЕННЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ (328)
  3. ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАЗРЕЖЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ (329)
  4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (333)
- ЛИТЕРАТУРА (334)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В системах дистанционного зондирования (ДЗ), в различных диапазонах электромагнитных волн, полученные данные зачастую представлены в виде цифровых изображений. При решении практических задач эти изображения обрабатываются тем или иным методом. Задачи могут быть чрезвычайно разнообразны: восстановление дефокусированного частично затененного изображения, борьба с шумами, увеличение пространственного разрешения, поиск информации об искажающей аппаратной функции, реконструкция утерянных данных (лакун) и др. [1-5]. Таким образом, объективная оценка эффективности работы методов восстановления чрезвычайно актуальна, поскольку является важной частью систем обработки изображений, получаемых при ДЗ.

В настоящей работе предлагаются новые критерии объективной оценки качества реконструированных изображений относительно исходного "идеального" (неискаженного). Применение известных и новых объективных оценок качества изображений позволяет оценить конкурентоспособность методов обработки изображений в системах дистанционного зондирования. Здесь алгоритмы реконструкции применяются к разреженным изображениям (из неравномерно расположенных выборок). Т.е. к таким изображениям, по всему полю которых имеется в наличии только некоторое количество их 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 [6,7,8,9] 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.

Дополнительно, в качестве идеологической альтернативы методам, работающим в частотной области, в нашем исследовании применяется сплайн-интерполяция [10,11]. Физический смысл этого метода заключается в том, что для произвольного набора опорных точек (узлов) решается система линейных уравнений, моделирующая поведение изогнутой упругой пластинки. В результате получается соотношение, описывающее двумерную сплайн-поверхность. Такой подход обладает определённой универсальностью и может быть применен для сравнительного анализа.

## 2. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ К РАЗРЕЖЕННЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

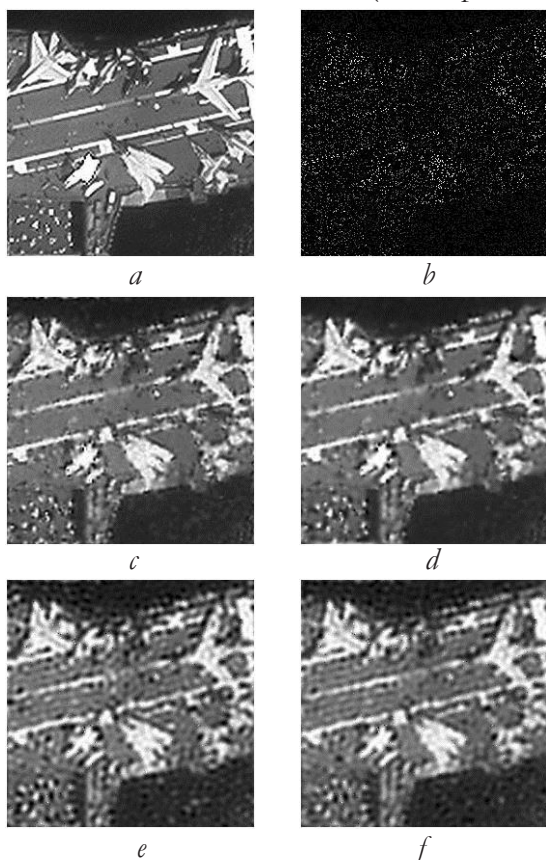
В качестве примера, для иллюстрации эффективности работы методов реконструкции разреженных изображений используем аэрокосмическое изображение прищвартованного в порту города Сан-Диего (США) авианосца "Midway", превращённого с 1998 года в корабль-музей (размер 1296 на 558 пикселей) на **Рис. 1**. Для этого используется общедоступная Яндекс-карта.

Непосредственно при моделировании разреженности и последующей обработке используется фрагмент исходного изображения **Рис. 1** – область вблизи кормы авианосца размером 256 на 256 пикселей (**Рис. 2a**). На **Рис. 2b** показано разреженное изображение, где 90



**Рис. 1.** Исходное аэрокосмическое изображение (размер 1296 на 558 пикселей).

процентов информации удалено по случайно-равномерному закону (чёрный цвет). В отличие от предыдущих работ здесь для моделирования разреженности (в программе на языке Delphi), применяется "маска". Это позволяет не производить сдвиг яркостей вверх, чтобы резервировать "нулевую" интенсивность под "места отсутствия информации", и тем самым не вносить, хоть и небольшое, но сжатие диапазона яркостей. На Рис. 2*c* показано восстановление Рис. 2*b* с помощью МИПВС (128 гармоник, 1



**Рис. 2.** Фрагмент исходного изображения рис. 1 (размер 256 на 256 пикселей) – (a); разреженное изображение (90 процентов информации Рис. 2*a* отсутствует) – (b); восстановление Рис. 2*b* с помощью МИПВС – (c); восстановление Рис. 2*b* с помощью сплайна – (d); восстановление Рис. 2*b* с помощью POCS – (e); восстановление Рис. 2*b* с помощью МАИ – (f).

итерация). Рис. 2*d* демонстрирует реконструкцию Рис. 2*b* с помощью сплайна. Восстановление Рис. 2*b* с помощью POCS (частотное окно радиусом 31 гармоника, 2500 итераций) изображено на Рис. 2*e*. И, наконец, интерполяцию разреженности Рис. 2*b* с помощью МАИ (частотное окно радиусом 31 гармоника, 2500 итераций) можно увидеть на Рис. 2*f*.

### 3. ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАЗРЕЖЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Эксперт-наблюдатель может визуально сравнить эффективность работы методов. Наиболее "похожими" на "идеальный" Рис. 2*a* являются реконструкции с помощью МИПВС (Рис. 2*c*) и с помощью сплайна (Рис. 2*d*). Восстановление разреженного изображения с помощью POCS (Рис. 2*e*) и с помощью МАИ (Рис. 2*f*) происходит заметно хуже, чем у двух первых конкурирующих методов. Частично объяснить это можно относительно малым рабочим частотным окном радиусом 31 гармоники. Дело в том, что если задать частотное окно значительно шире, то на реконструированных изображениях, помимо кажущегося повышения резкости, появляется значительно больше мешающих артефактов.

Чтобы адекватно оценить эффективность работы методов необходимо вычислить критерии качества. **Таблица 1** показывает объективные оценки качества реконструированных изображений [1,12]: МСП – мера структурного подобия, ОР – оценка резкости, СК – средний контраст, СКО1 – среднее квадратичное отклонение от своего среднего значения, СКО2 – среднее квадратичное отклонение

**Таблица 1**  
Объективные оценки качества реконструированных изображений

	Исходное	МИПВС	Сплайн	POCS	МАИ
мера структурного подобия	1	0.894	0.895	0.826	0.847
оценка резкости	16.337	8.149	6.264	8.23	7.207
средний контраст	0.144	0.114	0.093	0.154	0.13
СКО1	66.709	61.19	62.269	63.522	61.719
СКО2	0	29.553	29.519	38.44	35.52
эксцесс	-0.101	-0.102	-0.114	-0.354	-0.253
асимметрия	0.88	0.773	0.77	0.643	0.666



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 четырёх методов реконструкции разреженности МСП довольно близки. МСП МИПВС и сплайна практически одинаковы, в то время как РОСС и МАИ имеют немного меньшие показатели (худший из всех РОСС). Тем не менее РОСС показывает "лучший" результат по оценкам резкости. По этому показателю рядом находится только МИПВС. Объяснить это можно тем, что на оценку резкости сильно влияют паразитные артефакты (перепады яркостей сравните Рис. 2*c* и Рис. 2*e*). По этой же причине РОСС превосходит по "среднему контрасту" даже исходное "идеальное" изображение. Аналогично и обе оценки СКО для РОСС выше, чем у конкурирующих методов. СКО2 (отклонение попиксельной разницы между эталонным и реконструированным изображением) у МАИ заметно превышают СКО2 при МИПВС и сплайне. Это свидетельствует о наличии более существенных структурных отличий с "идеалом" изображений, восстановленных РОСС и МАИ, чем у реконструкций МИПВС и сплайн. Эксцесс 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 меньше нуля указывает на то, что все распределения плосковершинные (относительно нормального, эксцесс которого равен нулю). Что касается абсолютных значений эксцесса для исследуемых методов, то наиболее близким с исходным является МИПВС.

Асимметрия значений яркостей для цифрового изображения измеряет асимметрию распределения около среднего. Положительные значения асимметрии для всех четырёх 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).

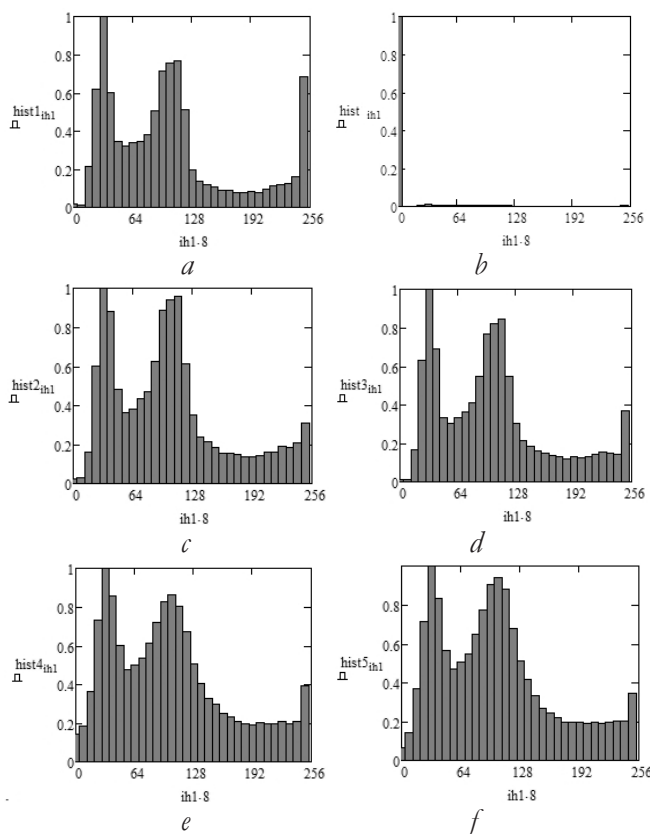
По этому показателю метод интерполяции последовательно вычисляемого спектра Фурье превосходит конкурентов в этом исследовании – он ближе к "идеальному".

Проанализировав данные Таблицы 1 можно констатировать, что по вычисленным выше объективным оценкам качества реконструированных изображений, некоторое преимущество перед конкурирующими методами имеет МИПВС. Экспертная оценка тоже склоняется на сторону метода интерполяции последовательно вычисляемого спектра Фурье. В [13] был введён ещё один объективный критерий качества. Как видно из Таблицы 1 некоторые из оценок могут выдать противоречивые результаты. Предлагается сравнивать формы распределений яркостей реконструированных изображений с аналогичным распределением для эталона. Реализовано практически это 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 [13]. **Рис. 3** иллюстрирует нормированные гистограммы яркостей обсуждаемых изображений.

Рис. 3*b* свидетельствует о чрезвычайно малом количестве значимой информации (10 процентов), присутствующем на разреженном изображении. При внимательном рассмотрении Рис. 3 можно заметить, что вид гистограмм существенно меняется для разных методов интерполяции разреженности. И если каждую из них численно сравнить с "эталоном" (Рис. 3*a*), то будет получен объективный 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)) [13].

Вычислять меру гистограммного подобия предлагается следующим образом [13]:

$$\text{HSIM} = \frac{\sum_{ihl=0}^{31} |\text{hist1}_{ihl} - \text{hist2}_{ihl}|}{32}.$$



**Рис. 3.** Гистограммы яркостей для: исходного изображения Рис. 2а – (а); разреженного изображения Рис. 2б – (б); восстановленного Рис. 2б с помощью МИПВС – (с); восстановленного Рис. 2б с помощью сплайна – (д); восстановленного Рис. 2б с помощью POCS – (е); восстановленного Рис. 2б с помощью МАИ – (ф).

В этой формуле:  $hist1_{ih1}$  – значения по столбикам эталонной нормированной гистограммы (Рис. 3а);  $hist2_{ih1}$  – значения по столбикам тестируемой нормированной гистограммы (Рис. 3с). 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 HSIМ для МИПВС. Аналогично вычисляются меры гистограммного подобия для сплайна при этом подставляя в формулу как тестируемую гистограмму значения  $hist3_{ih1}$  (Рис. 3д), для POCS, подставляя в формулу  $hist4_{ih1}$  (Рис. 3е), или  $hist5_{ih1}$  (Рис. 3ф) при вычислении HSIМ для МАИ. В Таблице 2 приводятся вычисленные по предлагаемой методике меры гистограммного подобия для исследуемых изображений. HSIМ для исходного (эталонного) изображения, в нашем случае, означает сравнение с самим собой, таким образом разница значений равна нулю [13].

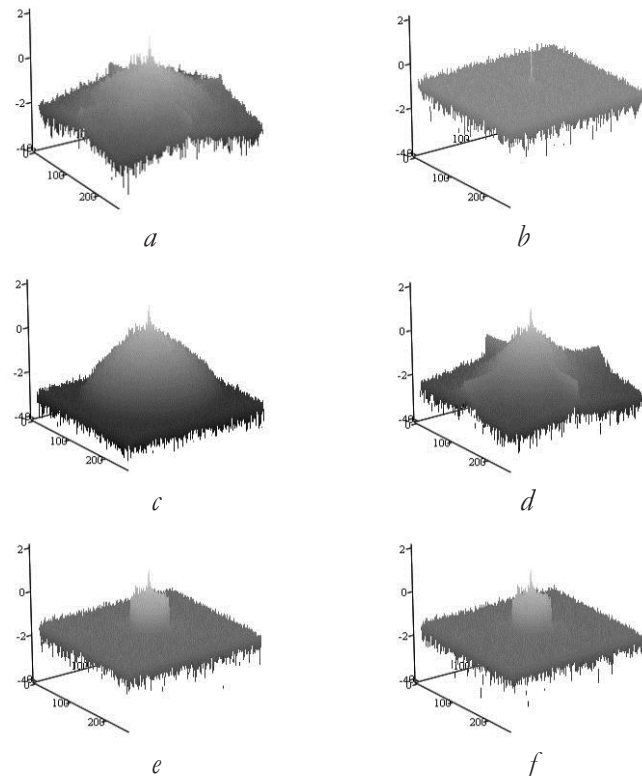
**Таблица 2**

Мера гистограммного подобия

	Исходное	МИПВС	Сплайн	POCS	МАИ
HSIМ для нормированных гистограмм	0	0.094	0.049	0.153	0.157
HSIМ для ненормированных гистограмм	0	360.625	266.875	583.689	545.875

При оценке реконструкций разреженности различными методами преимущество перед конкурентами имеет сплайн, МИПВС на втором месте. Наиболее существенно (в процентном отношении) это проявляется, если для вычислений использовать данные нормированных гистограмм.

На Рис. 4 показаны в логарифмическом масштабе амплитудные пространственные спектры: исходного ("идеального") изображения Рис. 2а – Рис. 4а; разреженного изображения Рис. 2б – Рис. 4б; реконструкция разреженности



**Рис. 4.** Амплитудные пространственные спектры в логарифмическом масштабе для: исходного изображения Рис. 2а – (а); разреженного изображения Рис. 2б – (б); восстановленного Рис. 2б с помощью МИПВС – (с); восстановленного Рис. 2б с помощью сплайна – (д); восстановленного Рис. 2б с помощью POCS – (е); восстановленного Рис. 2б с помощью МАИ – (ф).

с помощью МИПВС (Рис. 2*с*) – Рис. 4*с*; реконструкция разреженности с помощью сплайна (Рис. 2*д*) – Рис. 4*д*; реконструкция разреженности с помощью РОСС (Рис. 2*е*) – Рис. 4*е*; реконструкция разреженности с помощью МАИ (Рис. 2*ф*) – Рис. 4*ф*. По вертикали Рис. 4 отложены значения амплитуд пространственных спектров (в логарифмическом масштабе), по остальным осям – значения индексов пикселей яркостей в поле изображений.

В [1] констатируется: амплитуда двумерного дискретного преобразования Фурье есть массив, компоненты которого задают интенсивности на изображении, а соответствующие им фазы составляют массив смещений, который содержит значительную часть информации о том, где видимые объекты размещаются на изображении. Таким образом, основная информация о контурах (деталях) объектов на изображениях содержится в фазовом спектре. В этой связи возникает идея о создании некоего объективного критерия оценки качества фазового спектра восстановленных изображений. Визуально фазовый спектр изображений трудно интерпретировать каким-либо образом. Рис. 5*а* показывает фазовый спектр исходного "идеального" изображения, а Рис. 5*б* спектр разреженного изображения. По вертикали Рис. 5 отложены значения фазы пространственных спектров (в интервале  $(-\pi, \pi]$ ), по остальным осям – значения индексов пикселей яркостей в поле изображений.

Предлагаем попиксельно вычислить разницы фазовых пространственных спектров между исходным ("идеальным") и разреженным изображениями (см. Рис. 5). Массив значений результата проведённой операции находится в интервале  $(-2\pi, 2\pi]$ . Все аналогичные массивы для

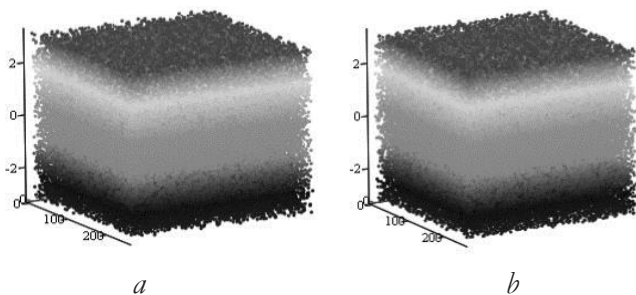


Рис. 5. Фазовые пространственные спектры значения находятся в интервале  $(-\pi, \pi]$ : исходного изображения Рис. 2*а* – (а); разреженного изображения Рис. 2*б* – (б).

разницы фазовых пространственных спектров между исходным ("идеальным") и любым из четырёх восстановленных исследуемыми здесь методами изображений должны иметь меньший разброс значений. На Рис. 6 показаны разрезы массивов значений: фазовый спектр "идеального" изображения минус фазовый спектр разреженного изображения Рис. 6*а*, и фазовый спектр "идеального" неискажённого исходного изображения минус фазовый спектр восстановления разреженности с помощью МИПВС Рис. 6*б*. По вертикали Рис. 6 отложены значения разности фаз пространственных спектров (в интервале  $(-2\pi, 2\pi]$ ), по горизонтали – значения индексов пикселей яркостей в поле изображений.

Из Рис. 6 видно, что вблизи центральной частоты спектра (соответствующей средней яркости изображения) разницы фаз относительно небольшие. Но по мере удаления в область высоких частот значения разности фаз в среднем возрастают. В первой строке

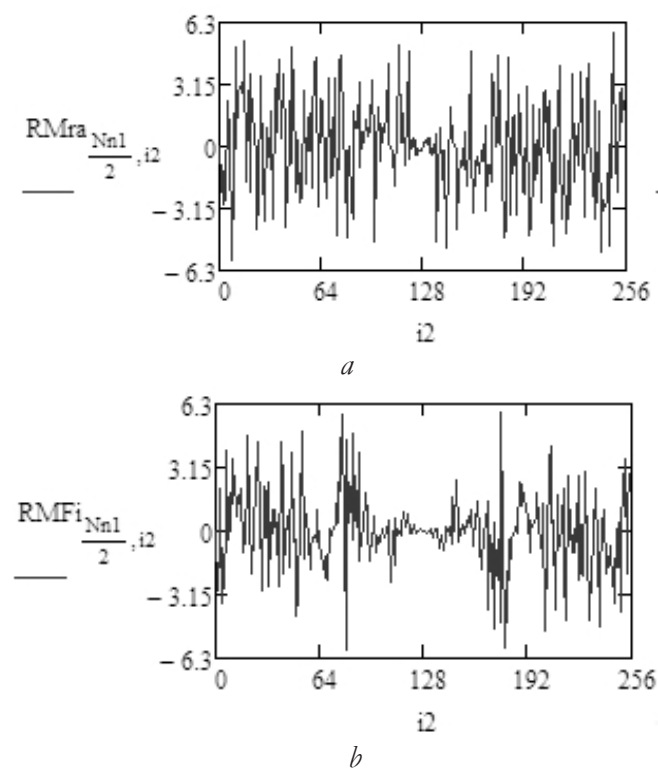


Рис. 6. Разрезы разницы полных фазовых пространственных спектров: "идеального" неискажённого исходного изображения (Рис. 2*а*) минус фазовый спектр разреженного изображения (Рис. 2*б*) – (а); "идеального" неискажённого исходного изображения (Рис. 2*а*) минус фазовый спектр восстановления разреженности с помощью МИПВС (Рис. 2*в*) – (б).

**Таблица 3**

СКО разницы фазовых спектров (в рад.) между "идеальным" и восстановленным изображениями

	Исходное	Разрек.	МИПВС	Сплайн	POCS	МАИ
СКО для полного спектра	0	2.529	2.423	2.362	2.442	2438
СКО для центральной части спектра (радиусом 31 гармоника)	0	0.893	0.63	0.641	0.714	0.701

**Таблицы 3** приведены СКО разницы фаз для полного спектра между "идеальным" и восстановленным рассматриваемыми здесь методами изображениями.

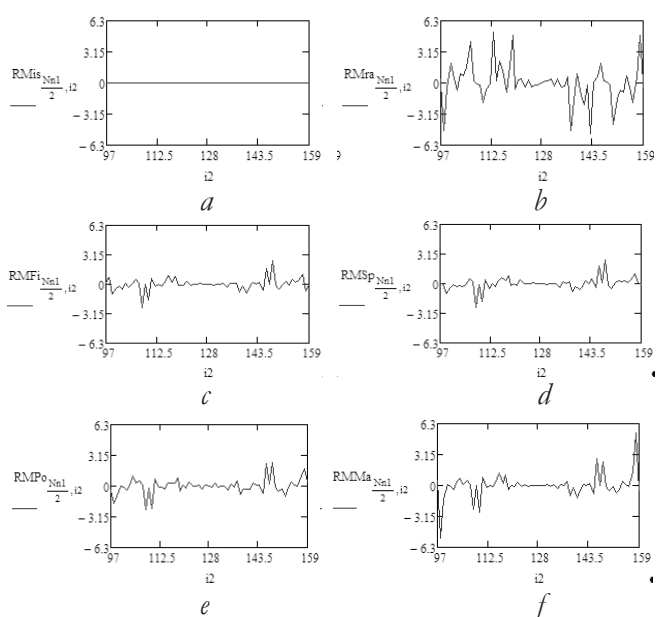
Результаты для разреженного изображения являются заведомо худшими. СКО разницы фазовых спектров (в рад.) "идеального" изображения с самим собой является массив нулей (первый столбец Таблицы 3), т.е. наилучший результат. Чтобы поставить конкурирующие методы в более равные условия, ограничим вычисление разности между фазовыми спектрами областью вблизи центральной частоты радиусом 31 гармоника. Это соответствует выбранному в этой работе размеру частотного окна для POCS и МАИ.

**Рис. 7** демонстрирует соответствующие разрезы для центральных зон (радиусом 31 гармоника) разницы фазовых пространственных спектров.

В Таблице 3, во второй строке, приведены значения СКО для центральной части спектра (радиусом 31 гармоника) разницы фазовых спектров (в рад.) между "идеальным", разреженным и восстановленными изображениями. По этому показателю первое место занимает МИПВС, второе сплайн, третье МАИ, а последнее POCS.

### 4.ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предлагаются новые объективные оценки качества изображений, получаемых при дистанционном зондировании – мера гистограммного подобия и среднеквадратичное отклонение разницы фазовых спектров. В качестве тестируемых методов используются: метод интерполяции последовательно вычисляемого спектра Фурье (МИПВС), сплайн-интерполяция, метод проекций на выпуклые множества



**Рис. 7.** Разрезы для центральных зон (радиусом 31 гармоника) разницы фазовых пространственных спектров: "идеального" неискажённого исходного изображения (Рис. 2а) минус фазовый спектр самого себя – (а); "идеального" неискажённого исходного изображения (Рис.2а) минус фазовый спектр разреженного изображения (Рис. 2b) – (b); "идеального" неискажённого исходного изображения (Рис. 2а) минус фазовый спектр восстановления разреженности с помощью МИПВС (Рис. 2с) – (с); "идеального" неискажённого исходного изображения (Рис. 2а) минус фазовый спектр восстановления разреженности с помощью сплайна (Рис. 2d) – (d); "идеального" неискажённого исходного изображения (Рис. 2а) минус фазовый спектр восстановления разреженности с помощью POCS (Рис. 2e) – (e); "идеального" неискажённого исходного изображения (Рис. 2а) минус фазовый спектр восстановления разреженности с помощью МАИ (Рис. 2f) – (f).

(projections onto convex sets, POCS) и метод амплитудных итераций (МАИ). Конкурирующие методы реконструировали смоделированную по случайно-равномерному закону разреженность (отсутствует 90 процентов информации). Наилучшие показатели почти по всем оценкам продемонстрировал МИПВС. Проведенное исследование позволяет сделать заключение о принципиальной возможности применения предложенных критериев для оценки качества изображений, получаемых при дистанционном зондировании. Это позволяет проверять эффективность методов восстановления цифровых изображений используемых для решения различных практических задач.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Gonzalez RC, Woods RE. *Digital Image Processing. Intern. Version 3rd Edition*. NJ, Prentice Hall, 2012, 1071p.
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; doi: 10.1109/APCCAS.2008.4746028.
3. Зражевский АЮ, Кокошкин АВ, Коротков ВА, Коротков КВ. Восстановление дефокусированного частично затененного изображения. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал], 2014, №10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct14/9/text.html>.
4. Кокошкин АВ. Особенности применения метода перенормировки с ограничением к изображениям со спекл-шумом. *Радиотехника и электроника*. 2022, 67(12):1167-1178. DOI: 10.31857/S0033849422120075.
5. Кокошкин АВ, Коротков ВА, Новичихин ЕП. Сравнение методов интерполяции при достижении сверхразрешения изображений на основе анализа нескольких кадров. *РЭНСИТ: Радиотехника. Наносистемы. Информационные технологии*. 2019, 11(1):85-91. DOI: 10.17725/rensit.2019.11.085.
6. Кокошкин АВ, Коротков ВА, Коротков КВ, Новичихин ЕП. Ретуширование и восстановление отсутствующих частей изображений с помощью итерационного вычисления их спектров. *Компьютерная оптика*, 2019, 43(6):1030-1040. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-1030-1040.
7. Кокошкин АВ, Коротков ВА, Новичихин ЕП. Реконструкция акустических сигналов по неполным данным. *Радиотехника и электроника*, 2020, 65(12):1181-1189. DOI: 10.31857/S0033849420120104.
8. Кокошкин АВ, Новичихин ЕП. Применение метода интерполяции последовательно вычисляемого спектра Фурье к разреженным изображениям. *РЭНСИТ: Радиотехника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2022, 14(2):165-174. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.165.
9. Кокошкин АВ. Алгоритмы метода амплитудных итераций и POCS для реконструкции разреженных двумерных сигналов. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022, №9; doi: 10.30898/1684-1719.2022.9.7.
10. Ашкеназы АВ. *Сплайн-поверхности. Основы теории и вычислительные алгоритмы*. Тверь, Изд-во Тверского гос. ун-та, 2003, 82 с.
11. Нестеренко ЕА. Возможность использования сплайнповерхности для построения поверхностей по результатам съемок. *Записки Горного института*, 2013, 204:127-133.
12. Кокошкин АВ, Коротков ВА, Коротков КВ, Новичихин ЕП. Сравнение объективных методов оценки качества цифровых изображений. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал], 2015, №6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun15/15/text.html>.
13. Кокошкин АВ. Методы интерполяции разреженных изображений, работающие в частотной области. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2023, №3; doi: 10.30898/1684-1719.2023.3.10.

**Кокошкин Александр Владимирович**

*с.н.с.*

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

**Фрязино 141190, Московская область, Россия**  
**shvarts65@mail.ru**

**Новичихин Евгений Павлович**

*к.ф.-м.н., с.н.с.*

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

**Фрязино 141190, Московская область, Россия**  
**ernov@mail.ru**