

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.13>

УДК: 621.397

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ ИЗ ГОЛОГРАММ, ИЗМЕРЕННЫХ РАЗНЫМИ МЕТОДАМИ

А.В. Кокошкин

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

Статья поступила в редакцию 19 сентября 2023 г.

**Аннотация.** В этой работе, по объективным критериям, производится сравнение качества изображений, восстановленных из радиоголограмм, измеренных разными методами. На основе сравнительного анализа, проверяется эффективность способа измерения радиоголограмм, основанного на использовании неподвижных линейки приемников и линейки передатчиков, по сравнению с классическим способом сплошных матриц, состоящих из приемопередатчиков. Кроме этого, тестируется эффективность новых методов оценки качества изображений применительно к задачам подповерхностной радиолокации. Проведенное исследование позволяет сделать заключение о принципиальной возможности применения как методики измерения голограмм «2 линейки», так и предложенных критериев для оценки качества изображений, получаемых при дистанционном зондировании.

**Ключевые слова:** радиоголограмма, метод измерения, неподвижные линейки приемников и линейки передатчиков, обработка изображений, объективная оценка эффективности методов восстановления.

**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](mailto:shvarts65@mail.ru)

## Введение

Вместе с развитием науки и техники увеличивается число и разнообразие аппаратных средств, с помощью которых можно регистрировать изображения в различных диапазонах электромагнитного спектра. Именно цифровые изображения зачастую являются конечным продуктом в системах прикладного характера. Оценка качества является неотъемлемым этапом обработки и анализа цифровых изображений. Она нужна для корректной интерпретации полученных данных, или для оценки эффективности работы того или иного метода восстановления.

Для исследований оптически непрозрачных сред чрезвычайно актуальными являются методы подповерхностной радиолокации. Они эффективно применяются в самых разнообразных областях человеческой деятельности. Например: геология [1,2], неразрушающий контроль качества конструкций и материалов [3,4], обнаружение и исследование объектов культурного наследия [5,6], системы безопасности и обнаружение мин [7,8]. Использование радиоголограмм позволяет получать объемные изображения объектов. Это производится за счет разных способов фокусировки при обработке измеренных голограмм [9-14]. Предложенный в [15] способ «2 линеек» позволяет получать голограммы с меньшими, чем у классических методов, аппаратными затратами.

Предлагаемая работа посвящена количественным оценкам качества изображений, восстановленных из голограмм, измеренных разными способами. То есть в первом случае измерения проводились с помощью сплошной матрицы приемопередатчиков и, в качестве альтернативы, способом «2 линеек». Кроме того, по объективным критериям, сравним оба результата, реконструированных из голограмм с «идеалом», то есть с изображением прототипа оптического качества. Это покажет, насколько «ухудшилось» качество изображения из-за перехода от видимого диапазона к диапазону сантиметровых радиоволн (длина волны 1,3 см). Используемые в этой работе оценки качества соответствуют критериям для успешного практического применения: выдают количественные

оценки, согласуются с субъективной экспертной оценкой, не являются слишком сложными и быстро вычисляются.

### Оценка качества изображений, восстановленных их голограмм

Сигнал  $E(x, y)$ , зарегистрированный приемником антенны в каждой точке плоскости сканирования, можно выразить как сумму произведений сигналов, отраженных от каждой точки объекта и множителя, описывающего задержку отраженной волны по сравнению с опорной [11, 15]:

$$E(\vec{r}, \vec{r}_i) = \iint dx' dy' R(x', y') \exp(ik(r_1 + r_2)), \quad (1)$$

где  $R(x', y')$  – коэффициент отражения (рассеяния) элемента  $dx' dy'$  падающей на него волны,

$$r_1 = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + z^2}, \quad r_2 = \sqrt{(x' - x_i)^2 + (y' - y_i)^2 + z^2}, \quad (2)$$

$r_1$  – расстояние от рассеивающего элемента  $(x', y')$  объекта до приемника  $(x, y)$  и

$r_2$  – расстояние от передатчика  $(x_i, y_i)$  до рассеивающего элемента  $(x', y')$  объекта.

В формуле (1) предполагается, что влияние поглощения в среде, влияние диаграмм направленности антенн и элементов ослабления вида  $1/r_1$  или  $1/r_2$  мало.

В работе [15] было показано, что для измерения голограммы можно иметь матрицу  $N \times N$  приемников и единственный передатчик:

$$E(x, y_i; 0, 0) = E(x, 0; 0, y_i). \quad (3)$$

Выражение (3) соответствует голограмме при единственном передатчике с координатами  $(0, 0)$  и приемниках с координатами, соответствующими  $(x, y_i)$ .

Одновременно с этим в [15] утверждается, что для измерения голограмм достаточно иметь 2 линейки  $1 \times N$  приемников и передатчиков – рис. 1б.

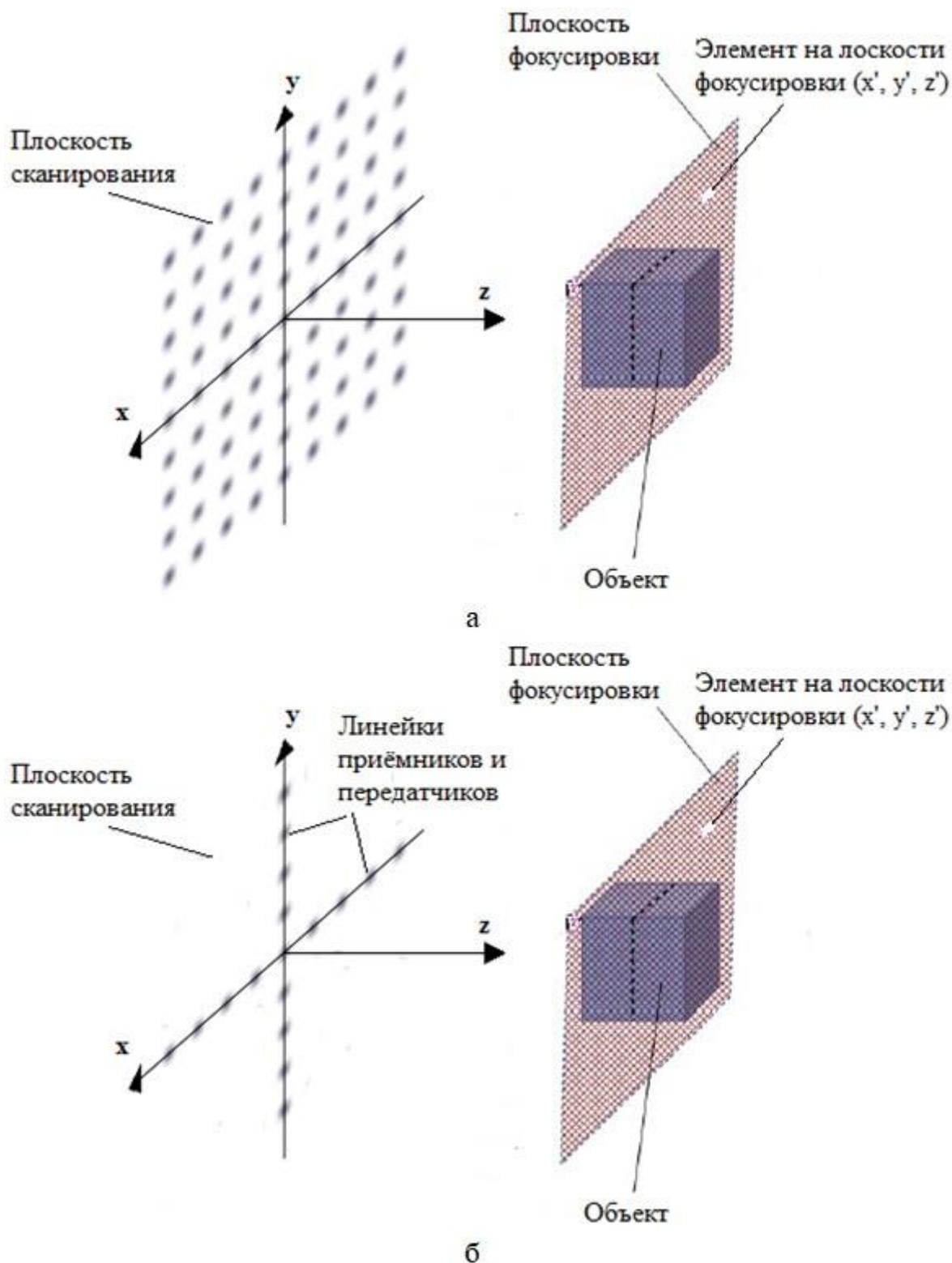


Рис. 1. Геометрия голографической системы [15]. Схема измерения радио голограммы с помощью матрицы приемников и передатчиков, находящихся в плоскости сканирования – а). Схема измерения радиоголограммы с помощью взаимно перпендикулярных линеек приемников и передатчиков – б).

Несмотря на то, что (3) для расчета голограммы справедлива для случая Френеля, в [15] способ «2 линеек» применяется для расчета голограмм с помощью сферических волн (1), но с учетом (3). Изображения

восстанавливаются из этих голограмм с помощью метода обратных проекций (МОП) [9,10]. В заключении [15] констатировалось: «вносимые таким способом искажения в измеренные голограммы достаточно небольшие».

Повторим модельные вычисления, сделанные в [15]. В соответствии с методом «2 линеек» расположим линейку передатчиков и линейку приемников взаимно перпендикулярно друг другу – рис. 1б. Последовательно включая передатчики, фиксируем значения поля на приемниках с учетом положения передатчика. То есть так, что положение линейки приемников по координате на оси, перпендикулярной линейке приемников, определяется положением передатчика (выражение (3)). Расчеты голограмм проведены при следующих параметрах:  $z' = 0.2m$ ,  $\lambda = 0.013m$ ,  $k = 483.3m^{-1}$ ,  $dx=0.003m$  – шаг по объекту/голограмме,  $N=64$  пикселя – размер объекта,  $N_g=128$  – количество пикселей голограммы. На рис. 2 представлены изображения действительной и мнимой частей голограмм, рассчитанных с помощью (1) – классическая матрица приемопередатчиков и (1) с учетом (3) – способ «2 линеек».

Поскольку размер объекта («ИРЭ») был изначально 64 на 64 пикселя (рис. 4а), а при вычислениях (моделировании измерения), голограммы увеличивались до 128 на 128 пикселей, то для расчетов оценок качества обрежем восстановленные изображения рис. 3 до размера 64 на 64 пикселя – рис. 4б и рис. 4в.

В таблице 1 приводится ряд объективных оценок качества исходного эталонного изображения «ИРЭ» (рис. 4а) и восстановленных из голограмм, измеренных разными методами (стандартная схема (рис. 4б), упрощенная схема (рис. 4в)).

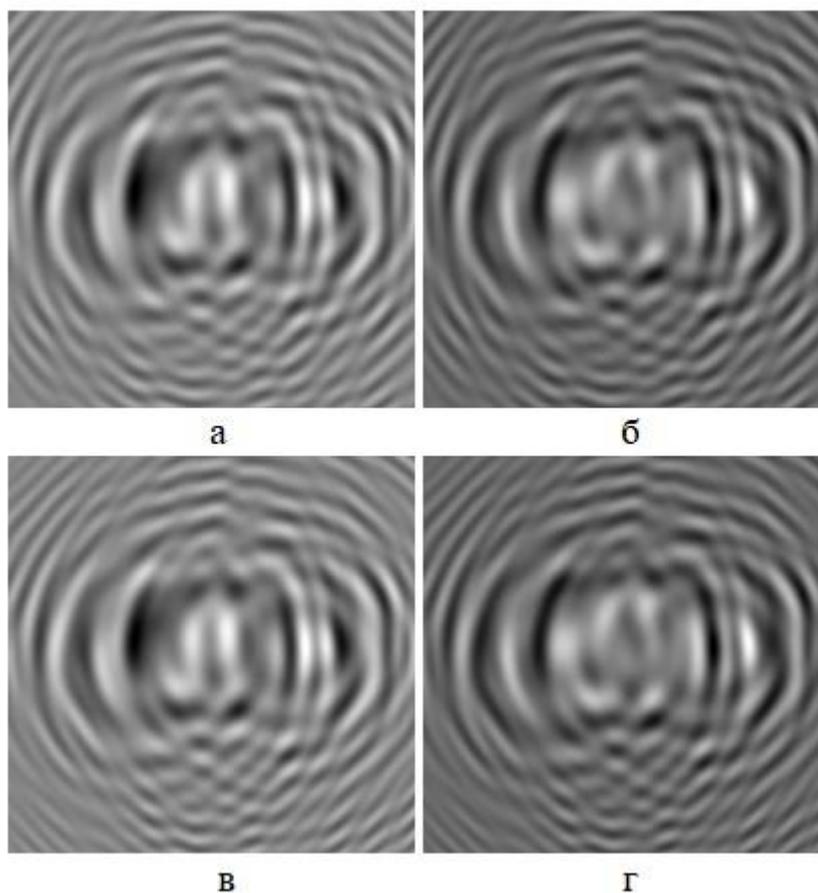


Рис. 2. Изображения действительных (а, в) и мнимых (б, г) частей голограмм.  
 Рис. 2а, рис. 2б рассчитаны по формуле (1). Рис. 2в, рис. 2г рассчитаны по формуле (1) с учетом формулы (3).

На рис. 3 представлены изображения, полученные из этих голограмм, с помощью метода обратных проекций (МОП) [9, 10].

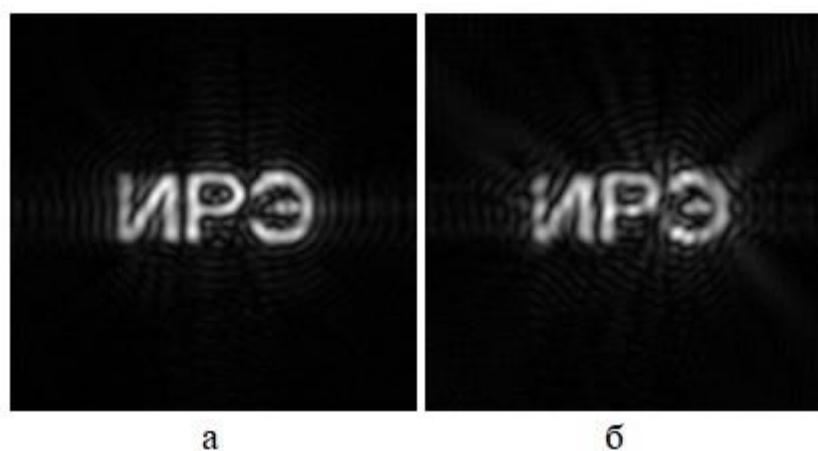


Рис. 3. Восстановленные из голограмм рис. 2 изображения. Рис. 2а и рис. 2б соответствует рис. 3а, а рис. 2в и рис. 2г соответствует рис. 3б.

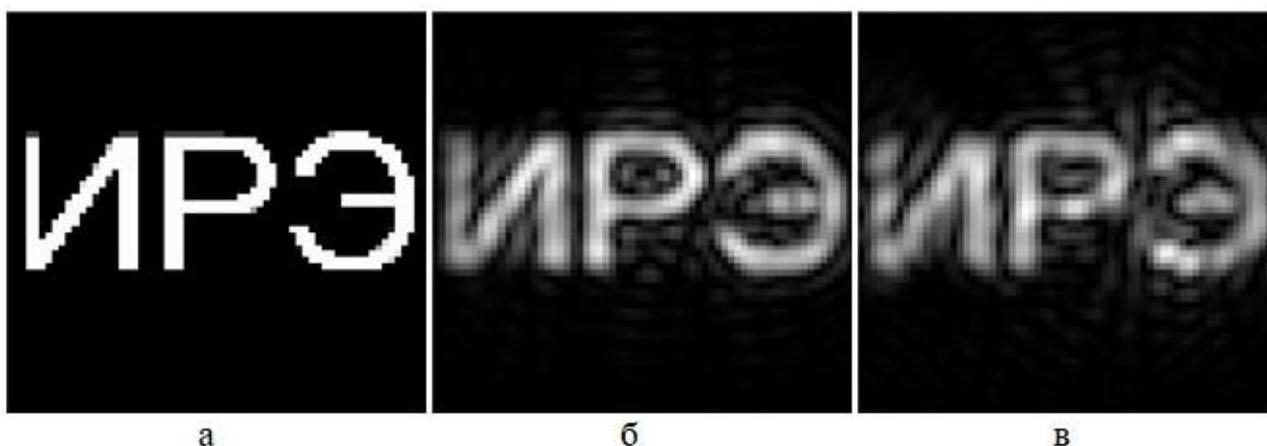


Рис. 4. Объект «ИРЭ» (64 на 64 пикселя) – а). Восстановленные из голограмм рис. 2 и обрезанные до размера исходного объекта изображения рис. 3а – б), рис. 3б – в).

Таблица 1. Объективные оценки качества изображения «ИРЭ», реконструированного из радиоголограмм.

	Исходное	Стандартная схема	Упрощенная схема
мера структурного подобия	1	0.773	0.706
оценка резкости	56.93	11.93	9.38
средний контраст	0.102	0.406	0.408
средняя яркость	32.451	41.201	42.035
СКО1	76.986	55.99	51.631
СКО2	0	43.043	48.142
эксцесс	4.135	2.081	1.767
асимметрия	2.472	1.779	1.656
мера спектрального подобия	1	0.498	0.458
СКО разности фазы	0	1.564	2.161
мера гистограммного подобия	1	0.922	0.899

Расчеты проводились в соответствии с работами [16-19]. Вычислялись: мера структурного подобия (МСП), оценка резкости, средний контраст, средняя яркость, СКО1 (среднеквадратичное отклонение от своего среднего значения), СКО2 (среднеквадратичное отклонение попиксельной разницы между эталонным и реконструированным изображением), эксцесс, асимметрия, мера спектрального подобия, СКО разности фазы (с эталонным спектром), мера гистограммного подобия. По определению мера структурного подобия (МСП)

максимальна при сравнении исходного «идеального» изображения с самим собой, и равна 1. У реконструированных из голограмм изображений, МСП сохранилась более чем на 70 процентов (строка 1 в таблице 1). Это должно позволить, с достаточной надежностью, обнаружить и идентифицировать исследуемые объекты.

Мера спектрального подобия [17] определяется как попиксельное попадание каждой гармоники амплитудного спектра восстановленного изображения  $F_m$  в заданную окрестность относительно соответствующей ей гармоники спектра этого же изображения, но не искаженного («идеального»)  $F_u$ . В качестве окрестности в этой работе примем:  $F_u/4 \leq F_m \leq 4F_u$ . Для такой оценки необходимо знание «идеального» неискаженного изображения, спектр которого  $F_u$  будет опорным при вычислении меры спектрального подобия. В нашем случае это спектр изображения рис. 4а. Рис. 5а демонстрирует амплитудный пространственный спектр в логарифмическом масштабе изображения рисунка 4(а) (черный цвет) и границы отклонения этого спектра согласно допуску в четыре раза, где верхняя граница показана полупрозрачным голубым цветом, а нижняя граница показана красным цветом. Рис. 5б и Рис. 5в показывают, сколько гармоник спектров изображений, восстановленных из голограмм (соответственно рис. 4б и рис. 4в) попадают в допустимые пределы.

В [19] 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 [19] вводится объективный критерий оценки качества фазового спектра восстановленных изображений. Сам по себе фазовый спектр изображений трудно каким-либо образом интерпретировать. Рис. 6 показывает фазовый спектр исходного «идеального» изображения. По вертикали рис. 6 отложены

значения фазы пространственных спектров (в интервале  $(-\pi, \pi]$ ), по остальным осям – значения индексов пикселей яркостей в поле изображений.

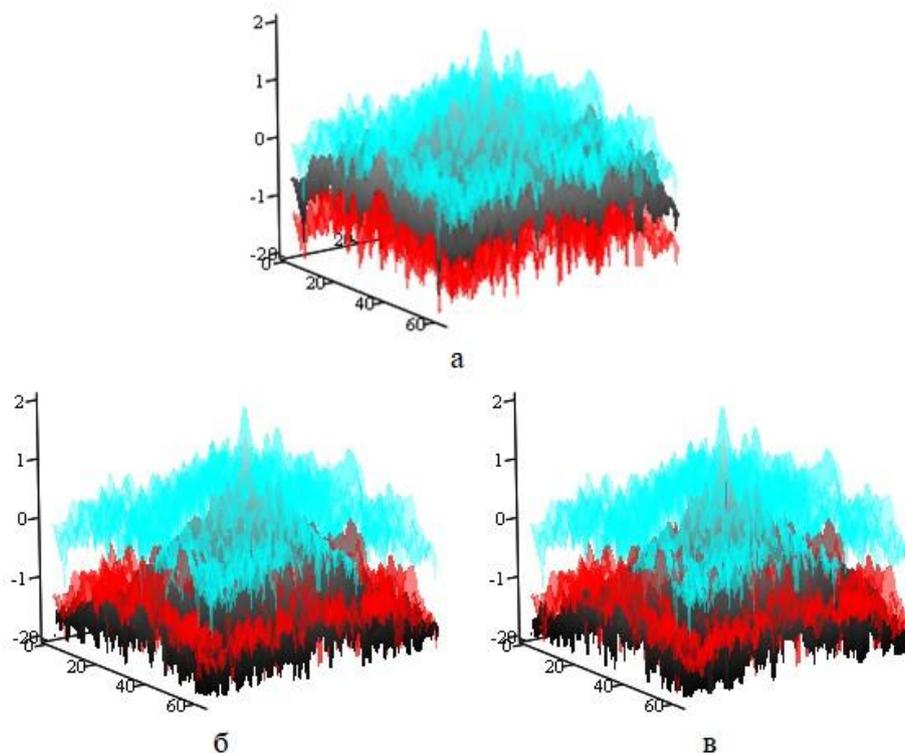


Рис. 5. Амплитудные пространственные спектры, в логарифмическом масштабе, соответствующие: исходному «идеальному» изображению рис. 4а – а); изображению рис. 4б – б); изображению рис. 4в – в). Собственно спектры названных изображений (черный цвет). Границы отклонения спектра согласно допуску (верхняя граница – полупрозрачный голубой цвет, нижняя граница – красный).

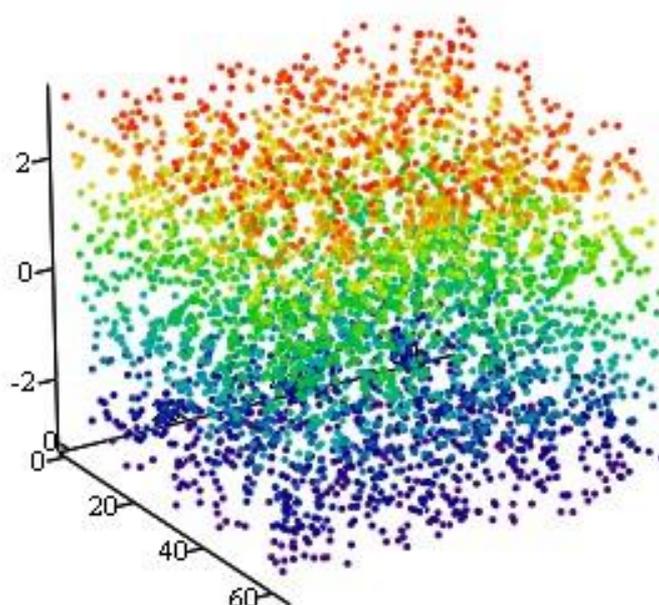


Рис. 6. Фазовый пространственный спектр исходного «идеального» изображения, значения находятся в интервале  $(-\pi, \pi]$ .

В [19] попиксельно вычисляются разницы фазовых пространственных спектров между исходным («идеальным») и восстановленными изображениями. На рис. 7 показаны (как трехмерные изображения) массивы значений результата проведенной операции, который находится в интервале  $(-2\pi, 2\pi]$ . Рис. 7а – фазовый спектр «идеального» изображения минус фазовый спектр изображения, восстановленного из голограммы по стандартной схеме. Рис. 7б – фазовый спектр «идеального» изображения минус фазовый спектр изображения, восстановленного из голограммы по схеме «2 линейки».

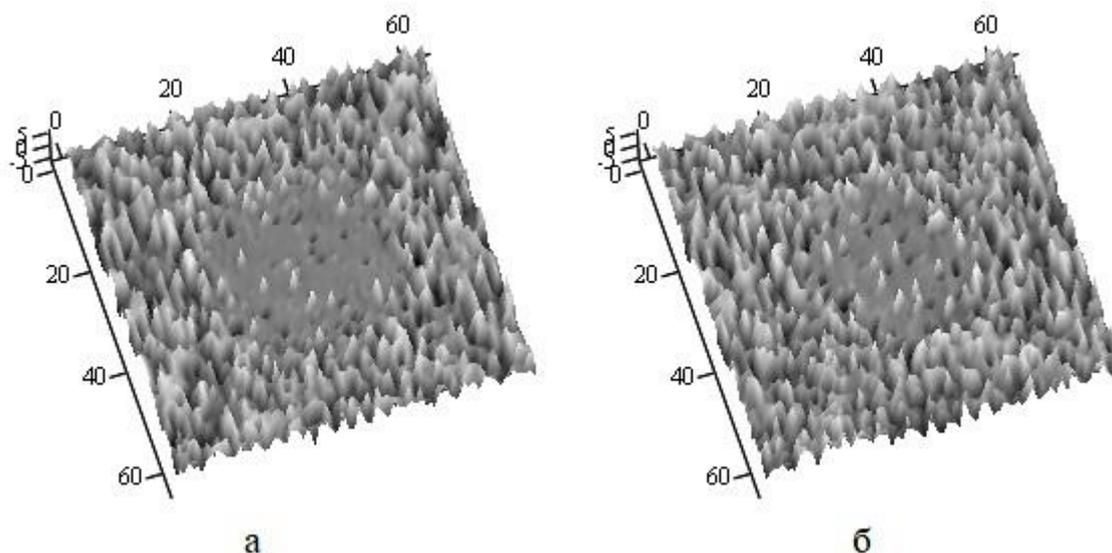


Рис. 7. Разницы полных фазовых пространственных спектров: «идеального» неискаженного исходного изображения (рис. 4а) минус фазовый спектр изображения, восстановленного из голограммы по стандартной схеме (рис. 4б) – а); «идеального» неискаженного исходного изображения (рис. 4а) минус фазовый спектр изображения, восстановленного из голограммы по схеме «2 линейки» (рис. 4в) – б).

При внимательном изучении рисунка 7 можно заметить, что вблизи центральной частоты спектра (соответствующей средней яркости изображения) разницы фаз относительно небольшие (гладкие «серые» области вблизи центра рисунков). Но по мере удаления в область высоких частот значения разности фаз (амплитуда и количество случайных биений) в среднем возрастают.

На рис. 8 показаны разрезы для центральных зон (радиусом 16 гармоник) разницы фазовых пространственных спектров массивов значений, соответствующие рисунку 7. Рис. 8а соответствует рис. 7а, а рис. 8б соответствует рис. 7б.

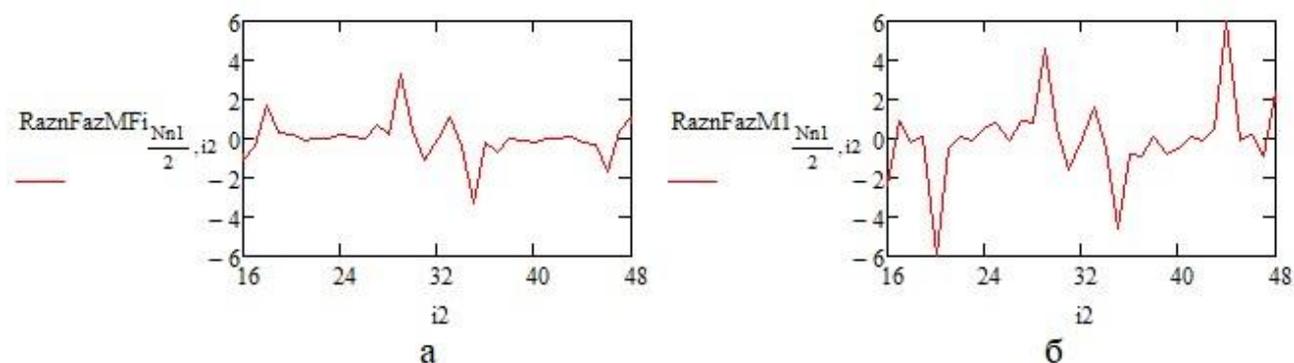


Рис. 8. Разрезы центральных зон (радиусом 16 гармоник) разницы фазовых пространственных спектров. Для рис. 7а – а). Для рис. 7б – б).

В таблице 1, в строке «СКО разности фазы», приведены СКО разности фаз для центральных зон спектра (радиусом 16 гармоник) между «идеальным» и восстановленными рассматриваемыми здесь методами изображения. Заметим, что СКО разности фаз не для центральных зон, а для полных спектров мало отличаются между собой. Они составляют для стандартной схемы 2.481 и 2.545 для «2 линейки».

Во введении было упомянуто: голографические подповерхностные радиолокаторы используются для обследования объектов культурного наследия. В этой связи, в качестве примера построения радиоголограммы реального объекта, воспользуемся материалами Института археологии РАН [20]. Там в статье «Скворцов К. Н. Грунтовый могильник Калиново (Калининградская область, Нестеровский район)» утверждается: «...уникальной находкой с могильника является фрагментированная гривна, которая по внешнему облику и конструктивным особенностям относится к т. н. гривнам с конусовидными окончаниями, или, иначе, к гривнам типа «Хавор»...» [20]. На рис. 9а показано место раскопок «шурф №1», и на рис. 9б фрагменты шейной гривны (подъемный материал) [20]. Описание находки заключается в следующем: «Фрагменты гривны были представлены двумя трубчатыми бронзовыми окончаниями, украшенными декором из прокатанных и перекрученных серебряных проволок, пуансонным геометрическим орнаментом. В месте максимального расширения застежки ребро украшено полосой орнамента из насечек, заполненных эмалью красного цвета. Одна из трубчатых частей завершается Т-образным ключом-

застежкой, а вторая имеет замочную скважину Т-образной формы для закрывания. С обратной стороны трубчатых частей сохранились фрагменты многочисленных тордированных бронзовых дров, которые составляли основу кольца гривны» [20].



а



б

Рис. 9. Место раскопок «шурф №1» [20] – а); фрагменты шейной гривны (подъемный материал) [20] – б).

На рис. 10а показана компьютерная, а на рис. 10б «натурная» реконструкция гривны типа «Хавор» [20].

Воспользуемся рис. 10а и на его основе проведем моделирование объекта «гривна» 64 на 64 пикселя оптического качества – рис. 11а. Далее проведем вычисления, аналогичные примеру с тестовым изображением «ИРЭ» (с теми же

исходными данными). Результаты восстановления изображений из радиоголограмм по стандартной схеме показаны на рис. 11б, а по схеме «2 линейки» на рис. 11в.



Рис. 10. Компьютерная реконструкция гривны типа Хавор [20] – а); Натурная реконструкция гривны типа Хавор [20] – б).

В таблице 2 приводится ряд объективных оценок качества исходного эталонного изображения «гривна» (рис. 11а) и восстановленных из голограмм, измеренных разными методами: стандартная схема (рис. 11б), упрощенная схема (рис. 11в).

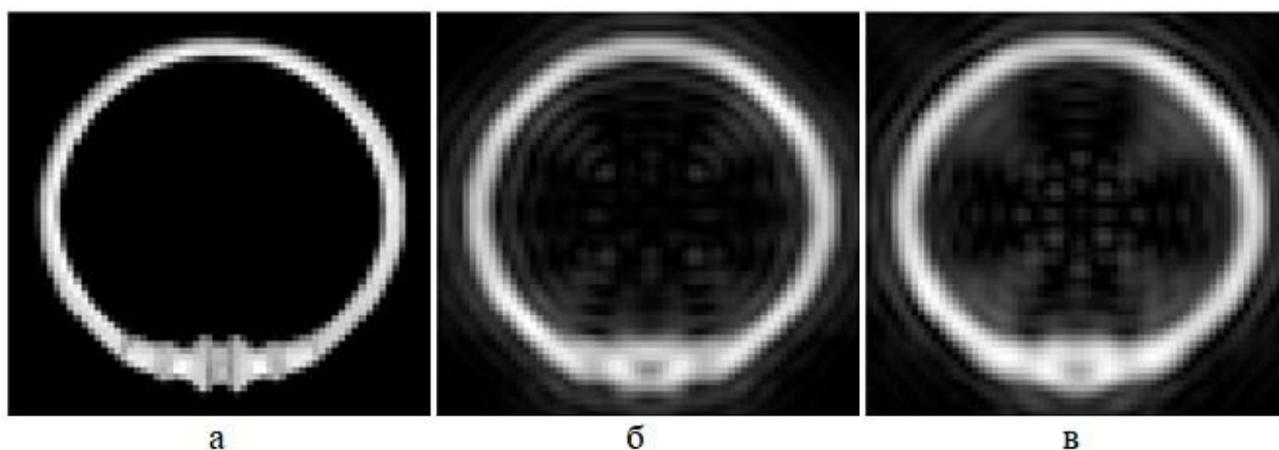


Рис. 11. Объект «гривна» (64 на 64 пикселя) – а). Восстановленные изображения из голограмм по стандартной схеме – б), по схеме «2 линейки» – в).

Таблица 2. Объективные оценки качества изображений «гривна», реконструированных из радиоголограмм.

	Исходное	Стандартная схема	Упрощенная схема
мера структурного подобия	1	0.775	0.709
оценка резкости	28.356	13.102	13.53
средний контраст	0.357	0.299	0.299
средняя яркость	30.797	57.479	64.988
СКО1	68.577	61.62	65.481
СКО2	0	24.32	27.507
эксцесс	2.751	1.242	0.798
асимметрия	2.094	1.576	1.448
мера спектрального подобия	1	0.6	0.645
СКО разности фазы	0	1.534	1.839
мера гистограммного подобия	1	0.8	0.781

Из сравнения данных табл. 1 и табл. 2 видно, что реконструированные изображения по двум схемам построения голограмм, по всем показателям, довольно близки между собой. Различия составляют от практически нуля (средний контраст), до нескольких процентов в других случаях.

Еще одной областью применения методов подповерхностного зондирования является гуманитарное разминирование. Эта задача является очень актуальной во многих регионах нашей планеты. Основными трудностями

здесь являются надежность идентификации сигналов, отраженных от взрывоопасных предметов и естественных неоднородностей грунта, а также от различных антропогенных объектов в грунте [21]. Для решения этих проблем в МГТУ им. Н.Э. Баумана был разработан георадар MiRascan, позволяющий обнаруживать и идентифицировать предметы на небольшой глубине под поверхностью земли (до 20 см) на основе анализа формы объекта [21]. Принцип действия радара основан на методах многочастотного зондирования конденсированных сред, таких как строительные материалы, грунты и т.д. Радар имеет пять рабочих частот в диапазоне 1,5 – 2,0 ГГц [21]. Последовательный прием сигналов от металлоискателя и на каждой частоте, и для двух поляризаций антенны георадара осуществляется в процессе сканирования поверхности земли. Внешний вид миноискателя MiRascan представлен на рис. 12а. Микроволновые изображения результатов сканирования российской противотанковой мины ТМ-62М представлены на рис. 12б (перекрестная поляризация принимаемого и передаваемого сигналов) и рис. 12в (параллельная поляризация) [21].

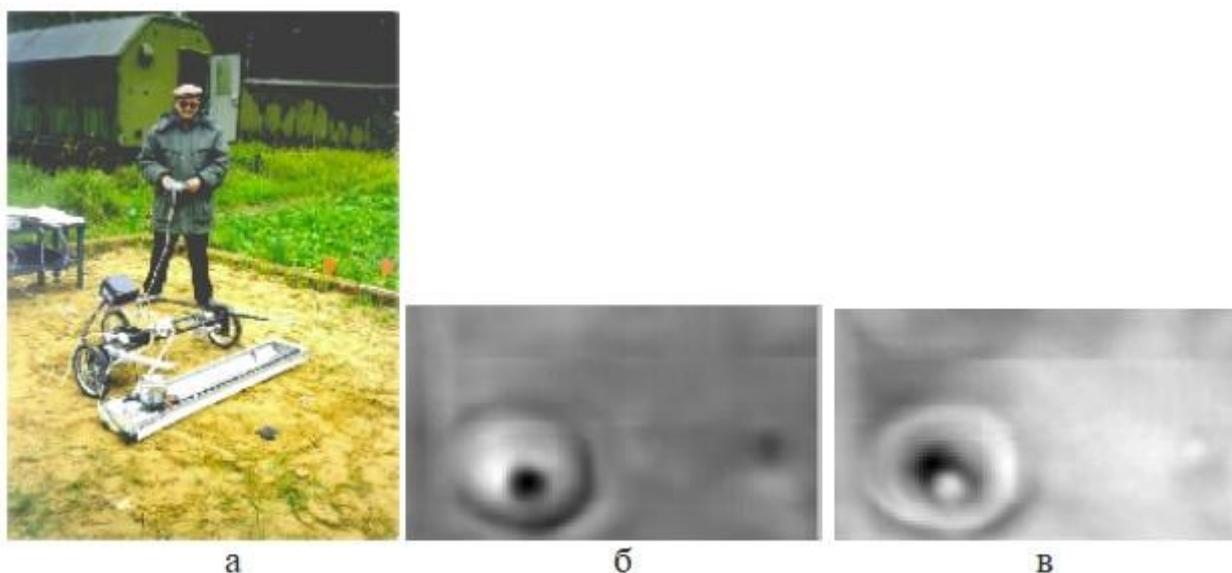


Рис. 12. Из [21]. Внешний вид миноискателя MiRascan – а). Микроволновые изображения российской противотанковой мины ТМ-62М: при перекрестной поляризации принимаемого и передаваемого сигналов – б), при параллельной поляризации – в).

Рабочие длины волн георадара MiRascan от 0,15м до 0,2м не позволяют получить детальное изображение мины, но достаточно уверенно выявляют

характерную круглую форму искомого объекта и локализуют его местоположение.

В заключении предлагаемой здесь работы, по объективным критериям, оценим на сколько снижается качество изображения, восстановленного из радиоголограммы, если над исследуемым объектом расположен маскирующий объект. В качестве примера возьмем плоское изображение противотанковой мины рис. 13а.

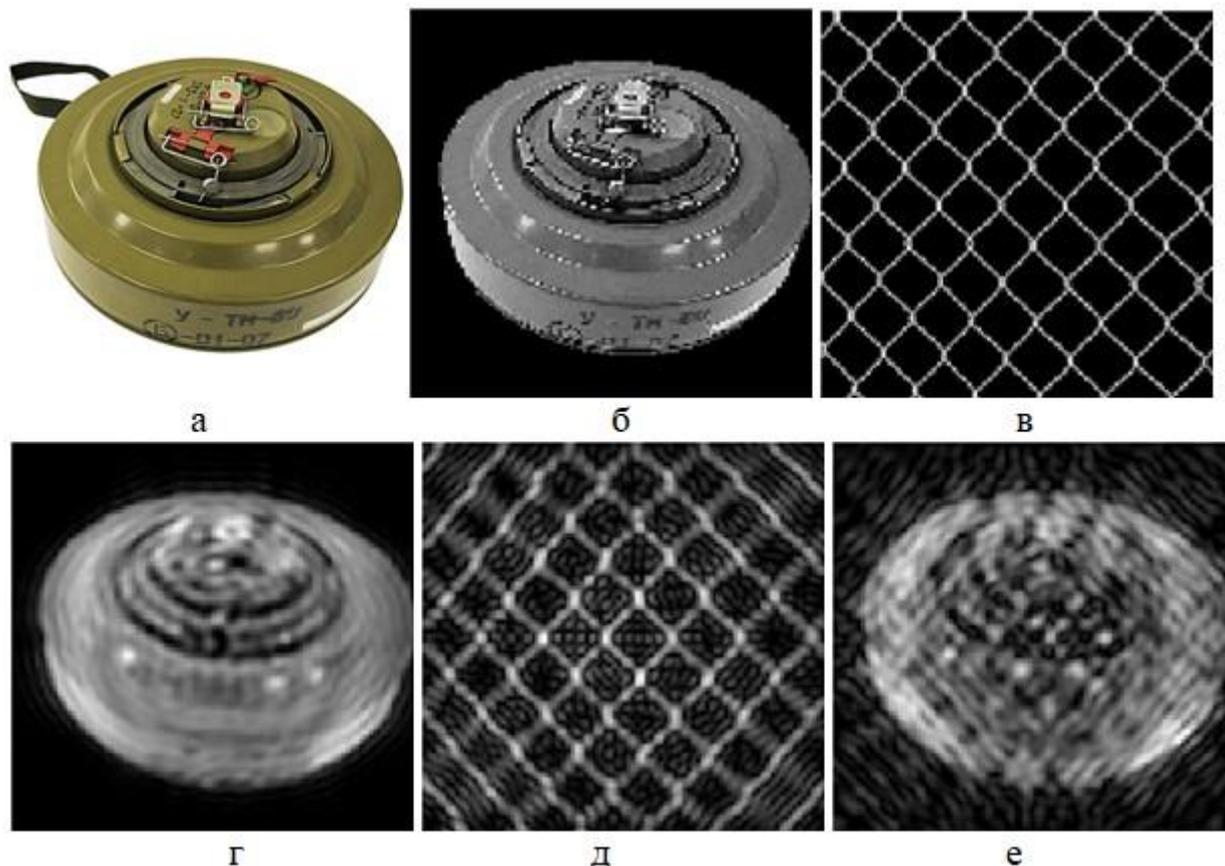


Рис. 13. Фотография мины ТМ-89 – а). Исходная модель объекта «мина» (128 на 128 пикселей) для построения голограммы – б). Модель маскирующего объекта типа «сетка Рабица» (128 на 128 пикселей) – в). Восстановление объекта «мина», при фокусировке на ней (0,4м от площади голограммы) – г). Восстановление объекта «сетка Рабица», при фокусировке на сетке (0,35м от площади голограммы) – д). Восстановление объекта «мина» с маскировкой ее «сеткой Рабица», при фокусировке на мине (0,4м от площади голограммы) – е).

Размеры диаметра объекта (мина ТМ-89) по открытым источникам (<http://war-russia.info/index.php/nomenklatura-vooruzhenij/446-sukhoputnye->) составляет 32 см. Для большей детализации изображений, при моделировании, расчеты голограмм проводились по стандартной схеме измерений, при

следующих параметрах: длина волны  $\lambda=0,013\text{м}$ , расстояние от антенны до объекта  $z'=0.4\text{м}$ , шаг по объекту/голограмме  $dx=0.003\text{м}$ , размер объекта  $N=128$  пикселя, количество пикселей голограммы  $N_g=256$ . Модель исходного «идеального» объекта оптического качества размером 128 на 128 пикселей показана на рис. 13б. Модель маскирующего объекта типа «сетка Рабица» (128 на 128 пикселей) – рис. 13в. Восстановление объекта «мина» при фокусировке на ней (0,4м от площади голограммы) без каких-либо мешающих факторов – рис. 13г. Восстановление объекта «сетка Рабица» при фокусировке на сетке (0,35м от площади голограммы) без каких-либо мешающих факторов – рис. 13д. Восстановление объекта «мина», при маскировке ее «сеткой Рабица» (фокусировка на mine – 0,4м от площади голограммы) – рис. 13е. Т.е. изображение рис. 13е получено из суммарной голограммы сразу для двух объектов, расположенных в пространстве один над другим (сетка маскирует мину).

Таблица 3. Объективные оценки качества изображения «мина» при маскировке ее объектом «сетка Рабица» (реконструкции из радиоголограмм).

	Исходная модель «мина»	Стандартная схема «мина»	«мина» под «сеткой Рабица»
мера структурного подобия	1	0.906	0.859
оценка резкости	26.552	3.833	3.521
средний контраст	0.177	0.224	0.193
средняя яркость	59.63	72.704	81.381
СКО1	61.594	61.684	67.767
СКО2	0	24.053	28.858
экссесс	-1.046	-1.359	-1.379
асимметрия	0.421	0.249	0.234
мера спектрального подобия	1	0.318	0.302
СКО разности фазы	0	1.814	2.245
мера гистограммного подобия	1	0.932	0.89

В табл. 3 приведены данные объективного контроля качества исходного «идеального» изображения рис. 13б, реконструированного из голограмм объекта

«мина» без каких-либо мешающих факторов рис. 13г, объекта «мина», замаскированного объектом «сетка Рабица» рис. 13е.

Экссесс значений яркостей для цифрового изображения указывает, насколько плоско- или островершинным является распределение при сравнении с нормальным распределением. То, что вычисленные значения эксцесса для изображений «мина» меньше нуля (табл. 3) указывает на то, что эти распределения плосковершинные (относительно нормального, эксцесс которого равен нулю). Для изображений «ИРЭ» и «Гривна» эксцесс больше нуля (табл. 1 и табл. 2). Это означает что распределения яркостей более островершинные, чем нормальное. Что касается абсолютных значений эксцесса для исследуемых методов, то наиболее близким с исходным является эксцесс для изображений восстановленных из радиоголограмм, полученных по стандартной схеме без каких-либо мешающих факторов. Асимметрия значений яркостей для цифрового изображения измеряет асимметрию распределения около среднего. Положительные значения асимметрии для всех трех примеров (табл. 1 – 3) 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 изображения, восстановленные из радиоголограмм, полученных по стандартной схеме, ближе к «идеальному». Как видно из таблиц 1 – 3 оценки асимметрии и эксцесса выдают результаты мало говорящие о степени соответствия восстановленных изображений эталону. Поэтому в [18,19] был введен новый критерий «мера гистограммного подобия» (МГП). Он основан на сравнении форм распределений яркостей реконструированных изображений с аналогичным распределением для эталона.

Иллюстрацией распределения яркостей для цифрового изображения является гистограмма (рис. 14).

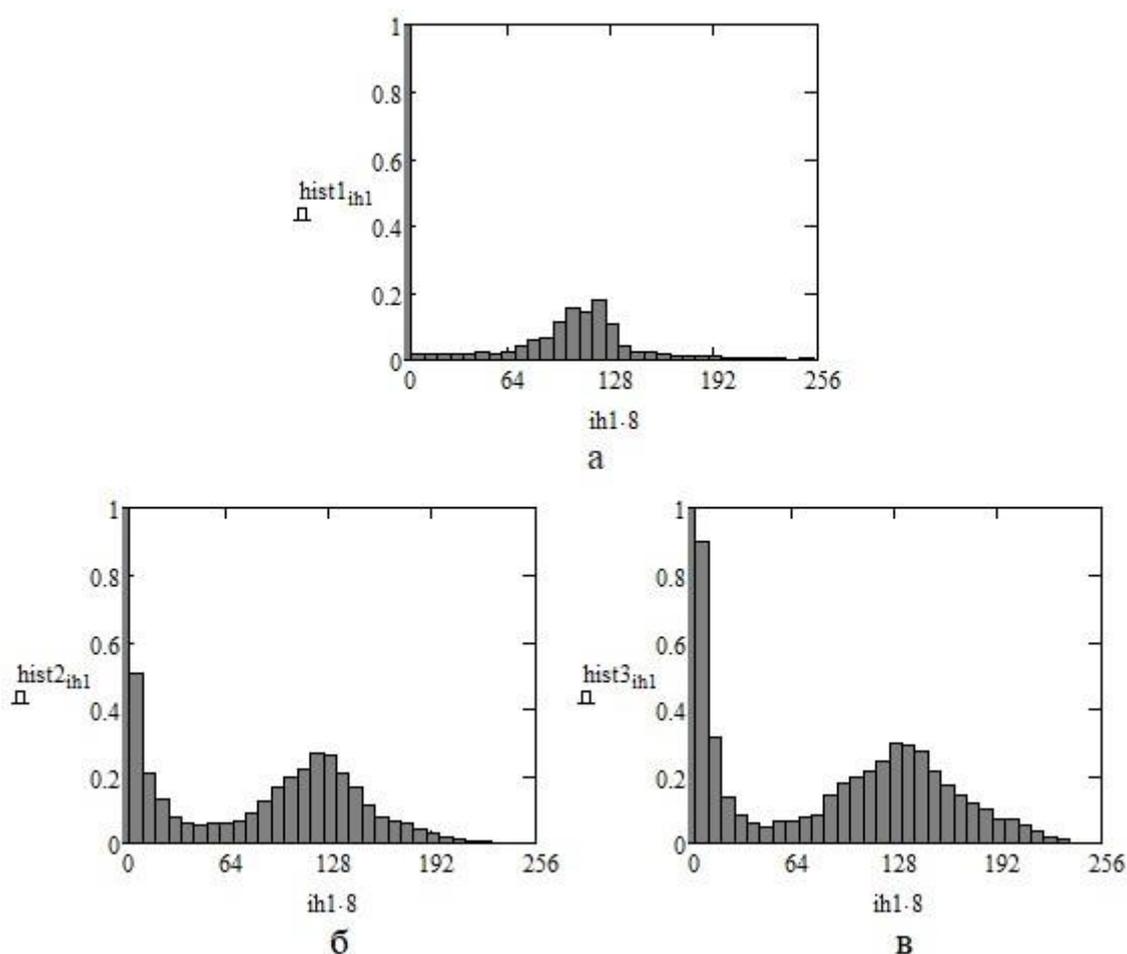


Рис. 14. Гистограммы яркостей для: исходного изображения рис. 13б – а); изображения рис. 13г – б); изображения рис. 13е – в).

Вычислять меру гистограммного подобия предлагается следующим образом [18,19]:

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

В этой формуле:  $hist1_{ih1}$  – значения по столбикам эталонной нормированной гистограммы (рис. 14а);  $hist2_{ih1}$  – значения по столбикам тестируемой нормированной гистограммы (рис. 14в). Вычисляется усредненный модуль разности по каждой паре столбиков гистограмм.

В предлагаемой здесь работе, для большей наглядности, мера гистограммного подобия (МГП) в таблицах 1–3 приведена к единице:

$$HSIM1 = 1 - HSIM$$

$HSIM1=1$  при полной идентичности гистограмм, а в случаях не соответствия гистограммы исследуемого изображения с «идеальной» МГП снижается.

Мера гистограммного подобия для всех трех примеров демонстрирует незначительное снижение от исходного «идеала» (падает не более чем на 22 процента в самом худшем случае (табл. 2 – «гривна» по методу «2 линейки»)). Снижение качества восстановленных изображений и по критерию «мера структурного подобия», как было отмечено выше, для первого примера «ИРЭ», сохраняется и во всех трех рассмотренных случаях более чем на 70 процентов (строка 1 в таблицах 1–3). Это должно позволить, с достаточной надежностью, обнаружить и идентифицировать все три исследуемых объекта в наших примерах.

Таким образом, можно констатировать, что по всем объективным критериям, ожидаемо, в связи с разницей между диапазонами радиоволн, «оптическое» качество исходных объектов: «ИРЭ», «гривна» и «мина», значительно выше, чем восстановленные из голограмм изображения на длине волны 1,3см. Что касается относительной разницы между двумя случаями построения голограмм, то реконструированные изображения, по всем показателям, довольно близки между собой. Различия составляют от практически нуля (средний контраст), до нескольких процентов в других случаях. Значит можно сделать заключение о принципиальной работоспособности упрощенной схемы измерения радиоголограмм «2 линейки».

## **Заключение**

В этой работе производится сравнение качества изображений, восстановленных из радиоголограмм, измеренных разными методами. Для решения этой задачи привлекаются ряд объективных критериев: мера структурного подобия (МСП), оценка резкости, средний контраст, средняя яркость, СКО1 (среднеквадратичное отклонение от своего среднего значения), СКО2 (среднеквадратичное отклонение попиксельной разницы между эталонным и реконструированным изображением), эксцесс, асимметрия, мера спектрального подобия, СКО разности фазы (с эталонным спектром), мера гистограммного подобия. Таким образом, на основе сравнительного анализа,

проверяется эффективность способа измерения радиоголограмм, основанного на использовании неподвижных линейки приемников и линейки передатчиков [15]. Кроме этого, тестируется эффективность новых методов оценки качества изображений применительно к задачам подповерхностной радиолокации. Можно считать доказанным то, что вносимые способом «2 линейки» искажения в измеренные голограммы достаточно небольшие и снижают качество восстановленных изображений по основным показателям на несколько процентов. А «мера структурного подобия» и «мера гистограммного подобия» сохраняется во всех трех рассмотренных случаях более чем на 70 процентов по сравнению с «идеальным» исходным изображением оптического качества. Это должно позволить, с достаточной надежностью, обнаружить и идентифицировать все объекты наших примеров. Для дополнительного тестирования эффективности предложенных критериев, в работу включен пример с задачей количественной оценки снижения качества изображения восстановленного из радиоголограммы, причем над исследуемым объектом («мина») расположен маскирующий объект («сетка Рабица»). Выяснено что, при данной конфигурации схемы измерений, объект «мина» может быть обнаружен и идентифицирован, поскольку снижение объективных оценок качества из-за маскировки незначительно (до десяти процентов). Проведенное исследование позволяет сделать заключение о принципиальной возможности применения как методики измерения голограмм «2 линейки», так и предложенных критериев для оценки качества изображений, получаемых при дистанционном зондировании.

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

### Литература

1. Финкельштейн М. И. и др. Подповерхностная радиолокация //М.: Радио и связь. – 1994. – Т. 44. – 216 с.

2. Финкельштейн М. И., Кутев В. А., Золотарев В. П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. //М.: Недра – 1986. – 128с.
3. Ivashov S. I. et al. Comparison of different NDT methods in diagnostics of rocket cryogenic tanks thermal protection coating //2019 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems (COMCAS). – IEEE, 2019. – pp. 1-5. DOI: [10.1109/COMCAS44984.2019.89581577](https://doi.org/10.1109/COMCAS44984.2019.89581577)
4. Zhuravlev A. et al. On the use of microwave holography to detect surface defects of rails and measure the rail profile //Sensors. – 2019. – Т. 19. – №. 6. – 1376. –pp. 1–11. DOI: [10.3390/s19061376](https://doi.org/10.3390/s19061376)
5. Бугаев А. С., Ивашов С. И., Разевиг В. В. Использование голографических подповерхностных радиолокаторов для обследования объектов культурного наследия //Успехи современной радиоэлектроники. – 2021. – Т. 75. – №. 10. – С. 24.
6. Ivashov S., Bugaev A., Razevig V. Discussion of the Non-Destructive Testing Possibilities for the Study of the Great Pyramid of Giza //Heritage. – 2023. – Т. 6. – №. 8. – P. 5867-5882. <https://doi.org/10.3390/heritage6080308>
7. Bechtel T. et al. Comparison of ROC curves for landmine detection by holographic radar with ROC data from other methods //2015 8th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR). – IEEE, 2015. – p. 1-4. DOI: [10.1109/IWAGPR.2015.7292645](https://doi.org/10.1109/IWAGPR.2015.7292645)
8. Ивашов С. И., Бугаев А. С. Использование генераторов шума в радиометрических системах для обнаружения скрытых объектов //Радиотехника и электроника. – 2013. – Т. 58. – №. 9. – С. 935-942. DOI: [10.7868/S0033849413090052](https://doi.org/10.7868/S0033849413090052)
9. Разевиг В. В., Бугаев А. С., Чапурский В. В. Сравнительный анализ фокусировки классических и мультистатических радиоголограмм //Радиотехника. – 2013. – №. 8. – С. 008-017.

10. Крайний В. И., Семенов А. Н., Чапурский В. В. Фокусировка многочастотных мультистатических радиоголограмм методом неэквидистантного БПФ //Машиностроение и компьютерные технологии. – 2015. – №. 11. – С. 292-300.
11. Чапурский В. В. Получение радиоголографических изображений объектов на основе разреженных антенных решеток типа ММО с одночастотным и многочастотным излучением //Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Приборостроение». – 2011. – №. 4. – С. 72-91.
12. Чапурский В. В. Синтезирование радиоизображений объектов с помощью линейной антенной решетки типа ММО //Инженерный журнал: наука и инновации. – 2012. – №. 8 (8). – С. 11.
13. Зверев В. А. Радиооптика //М.: Сов. радио. – 1975. – С. 304.
14. 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. DOI: 10.7868/S0033849417070038
15. Кокошкин А. В. и др. Об одном способе измерения радиоголограмм //Журнал радиоэлектроники. – 2017. – №. 1. Дата обращения: 12.09.2023. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan17/1/text.pdf>
16. Кокошкин А. В. и др. Сравнение объективных методов оценки качества цифровых изображений //Журнал радиоэлектроники. – 2015. – №. 6. Дата обращения: 12.09.2023. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun15/15/text.html>
17. Кокошкин А. В. Оценка спектрального подобия цифровых изображений //Журнал радиоэлектроники. – 2020. – №. 8. URL: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.8.4>
18. 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>
19. Кокошкин А.В., Новичихин Е.П. Оценка качества изображений, полученных дистанционным зондированием //РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы.

Информационные технологии. – 2023. – Т. 15. – №. 3. – С. 311-318. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.311.

20. Города, селища, могильники. Раскопки 2017. Материалы спасательных археологических исследований. //М.: Институт археологии РАН. – 2018. –Т. 25. – 456 с.
21. Ivashov S. I. et al. A review of the remote sensing laboratory's techniques for humanitarian demining //Proceedings of the International Conference Requirements and Technologies for the Detection, Removal and Neutralization of Landmines and UXO. – 2003.

**Для цитирования:**

Кокошкин А.В. Оценка качества изображений, восстановленных из голограмм, измеренных разными методами. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.13>