

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

УДК 621.396

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ПЕРЕНОРМИРОВКИ
С ОГРАНИЧЕНИЕМ К ИЗОБРАЖЕНИЯМ СО СПЕКЛ-ШУМОМ

© 2022 г. А. В. Кокошкин*

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
пл. Введенского, 1, Фрязино Московской обл., 141190 Российская Федерация***E-mail: shvarts65@mail.ru*

Поступила в редакцию 05.03.2022 г.

После доработки 28.06.2022 г.

Принята к публикации 20.07.2022 г.

Представлено применение метода перенормировки с ограничением (МПО) для подавления спекл-шума цифровых изображений. Тестирование метода происходит на различных видах изображений, полученных с помощью радиолокационной системы с синтезированием апертуры антенны (РСА), гидролокации и медицинских ультразвуковых исследований. Принципиальная возможность существенного снижения уровня спекл-шума обнаружена вследствие того, что МПО перенормирует спектр акустического изображения к модели универсального опорного спектра (УОС), которая является моделью спектра оптического изображения “хорошего” качества. Для повышения общей резкости после применения МПО рекомендовано использовать дополнительную обработку, подходящую к каждому конкретному виду изображений. Предложено оценивать степень подавления спекл-шума с помощью среднеквадратичного отклонения от изображения, усредненного по плавающему окну (спрайту). Проведенное исследование позволяет сделать вывод, что применение МПО к различным цифровым изображениям позволяет существенно снизить присущий им спекл-шум.

DOI: 10.31857/S0033849422120075

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при решении прикладных задач во многих областях человеческой деятельности, как правило, объектом исследования специалистов являются цифровые изображения. Например, радиолокационные системы с синтезированием апертуры антенны (РСА) чрезвычайно широко используются в различных технологиях дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). С помощью РСА можно получать радиолокационные изображения (РЛИ) поверхности Земли вне зависимости от наличия облачности и времени суток. Важным параметром РСА является длина волны сигнала, которая определяет, насколько далеко излучение может проникнуть в исследуемую среду. В некотором смысле родственным РСА по природе формирования цифровых изображений являются гидролокационные системы бокового обзора [1]. Таким образом, РСА (в широком смысле) используют в большом количестве прикладных задач, таких как: экология, природные ресурсы, археология, сельское хозяйство, чрезвычайные ситуации, промышленная и оборонная безопасность. В то же время принципы гидролокации широко используются не только практически во всех перечисленных выше областях, но и при медицинских ультразвуковых ис-

следованиях (УЗИ). Необходимо отметить, что для всех перечисленных выше изображений характерно наличие мешающего объективному анализу мультипликативного спекл-шума. Он возникает из-за интерференции волн, вызванной множественным рассеянием от малых, относительно элемента разрешения, отражателей. Спекл-шум проявляется в виде светлых пятен (и ярких точек), случайным образом разбросанных по всему изображению. Поэтому спекл-картину называют “зернистостью” или “гранулярной” структурой изображения. В отличие от радиолокационных систем с синтезированием апертуры антенны, которые используют для зондирования Земли из космоса, у гидролокационных комплексов изменение рельефа от точки к точке может быть соизмеримо с дальностью до объекта зондирования. Вследствие этого увеличивается вероятность того, что на одной и той же дальности окажется сигнал, отраженный от целей на разных углах прихода. Это приводит к усреднению сигналов, отраженных от разных участков [1]. Данная особенность увеличивает вероятность появления дополнительных спекл-шумов. Таким образом, подавление спекл-шума на изображениях является актуальной задачей практически во всех системах дистанционного зондирования.

Все методы подавления спекл-шума имеют своей целью освободить изображение от паразитных шумов и артефактов, выделить границы исследуемых сред и объектов. Данная статья посвящена цифровой обработке уже полученных изображений, в ней не рассматриваются вопросы борьбы со спекл-шумом с помощью различных технических средств повышения качества визуализации (в аппаратной части системы). Для решения конкретных прикладных задач создано большое количество алгоритмов цифровой обработки изображений. В одних случаях применяются медианная фильтрация и локально-усредняющие пространственные фильтры, в других – алгоритмы винеровской, калмановской или гомоморфной фильтрации. Кроме того, для борьбы со спекл-шумом, используются методы с вейвлет-преобразованиями и фрактальным кодированием [1–5].

Цель данной работы – показать, что недавно разработанный оригинальный метод перенормировки с ограничением (МПО) [6–9], помимо особенностей, отмеченных в более ранних публикациях, еще и существенно снижает спекл-шум на цифровых изображениях.

Изначально МПО создавали для решения задач восстановления изображений, искаженных известной аппаратной функцией (АФ), при наличии неизвестных помех и шума [6, 7]. Метод перенормировки с ограничением восстанавливает изображения, искаженные как АФ с осесимметричным спектром, так и с анизотропной АФ типа “смаз”. Причем модифицированный МПО может эффективно работать и без определения вида и параметров искажающей аппаратной функции [10]. МПО хорошо проявил себя при работе со спектрально-локальными помехами, и показал устойчивость к воздействию аддитивного шума [11].

При тестировании МПО на различных изображениях выяснилось, что применение этого метода значительно подавляет мультипликативный спекл-шум [9]. Объяснить это можно тем, что после применения МПО в среднем аксиально-симметричная (изотропная) часть амплитудного пространственного спектра исследуемых изображений становится подобной универсальному опорному спектру (УОС), т.е. модели спектра оптического изображения “хорошего” качества [6, 7]. Информация о контурах областей и объектов на изображении содержится не в амплитудной, а в фазовой части спектра. Таким образом, после снижения уровня спекл-шума все границы сред и локализация объектов на изображениях сохраняются. Необходимо отметить, что в этой работе все спектры и модели спектров центрированы, т.е. при визуализации спектров нулевая частота находится в центре изображения.

Для модели УОС предлагается использовать следующую формулу [7]:

$$URS(i, j) = A[B1 \exp(-G1R^{0.75}) + B2 \exp(-G2R^{0.12})], \quad (1)$$

где $A = 128$ – половина максимальной яркости, $B1 = 0.55$, $B2 = 0.45$, $G1 = 2.5$, $G2 = 1.5$, $R = i^2 + j^2$.

Краткое описание алгоритма МПО согласно [6, 12] приведено в Приложении.

В работах [9, 13] отмечено, что после применения МПО на изображениях РСА проявляется эффект “затуманивания” или легкой “размытости”. Поэтому для повышения общей резкости после применения МПО рекомендовано использовать дополнительную обработку, подходящую к каждому конкретному виду изображений. Из большого количества известных методов опытным путем для повышения общей резкости изображений были выбраны: лапласиан, подъем высоких частот спектра и нерезкое маскирование. В качестве дополнительной обработки после применения МПО были протестированы также: эквализация (выравнивание) гистограмм и гамма-коррекция, но они показали неудовлетворительные результаты. Задание (приведение) гистограмм дало положительный эффект в некоторых случаях.

В данной работе (как и в [13]) лапласиан использовался в своем классическом виде [14]. Что касается “подъема высоких частот спектра”, то эта операция состоит в следующем. Чтобы повысить различимость деталей на изображении после процедуры МПО амплитуды высоких частот спектра (ВЧ) умножаются на 1.5. При этом “ограничение” остается в силе, т.е. в окрестности низких частот (вокруг нулевой пространственной частоты) диаметром 9 пикселей значения амплитуд спектра не меняем. Еще один метод повышения резкости используемый в этой работе – “нерезкое маскирование” [14]. Он заключается в вычитании из изображения его нерезкой (размытой) копии. Т.е. сначала размывается исследуемое изображение (в нашем случае для размытия используется усредняющее плавающее окно размером 9 на 9 пикселей). Затем поэлементным вычитанием из исследуемого изображения его нерезкой копии получаем “маску”. В заключение прибавляем эту “маску” к улучшаемому изображению.

1. ПРИМЕНЕНИЕ МПО К ЦИФРОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

1.1. Изображение РСА

Применение МПО к изображениям РЛС с синтезированием апертуры антенны демонстрируется на примере радиолокационного изображения города Сан-Диего, США (размером 770 на 470 пикселей), полученного на официальном сайте Спутникового центра Европейского союза (The Eu-

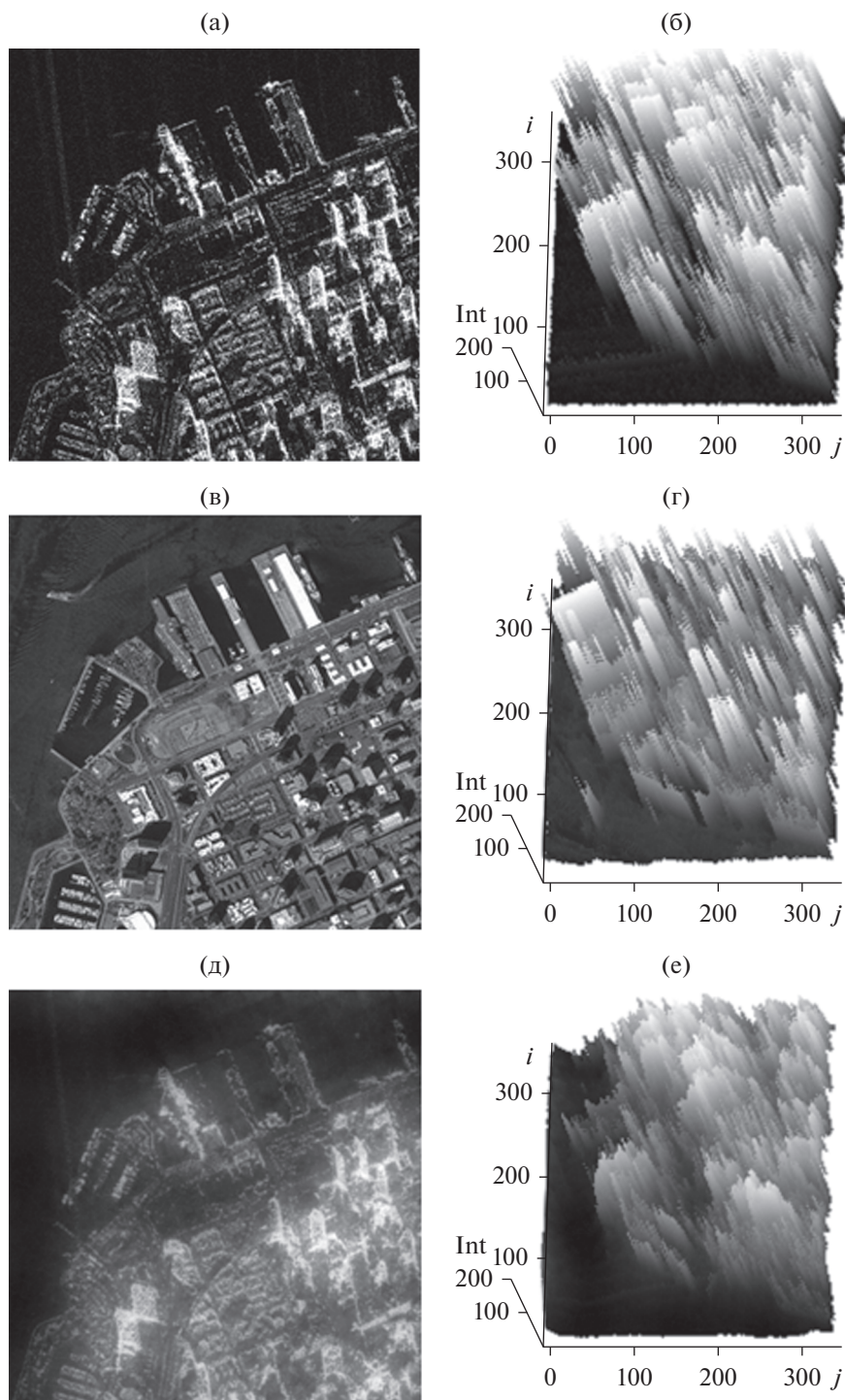


Рис. 1. Фрагменты исследуемого изображения (слева – собственно изображения, справа – объемный вид яркостей этих же изображений): а, б – РСА; в, г – оптического (прототип сцены для получения изображения РСА); д, е – РСА обработанного МПО; по вертикальной оси объемных рисунков отложены значения яркостей пикселей в градациях серого (“Int” сокращение “intensity” от нуля – черный, до 255 – белый), две оставшиеся оси объемных рисунков показывают координаты пикселей яркости на поле изображения (i, j).

European Union Satellite Centre: https://www.satcen.europa.eu/page/sar_course_sar.

На рис. 1а показан фрагмент (344 на 344 пикселей) упомянутого выше изображения.

Гистограммы яркостей изображений, представленных на рис. 1, показаны на рис. 2. Они нормированы на максимальное значение для каждого изображения. По горизонтальной оси

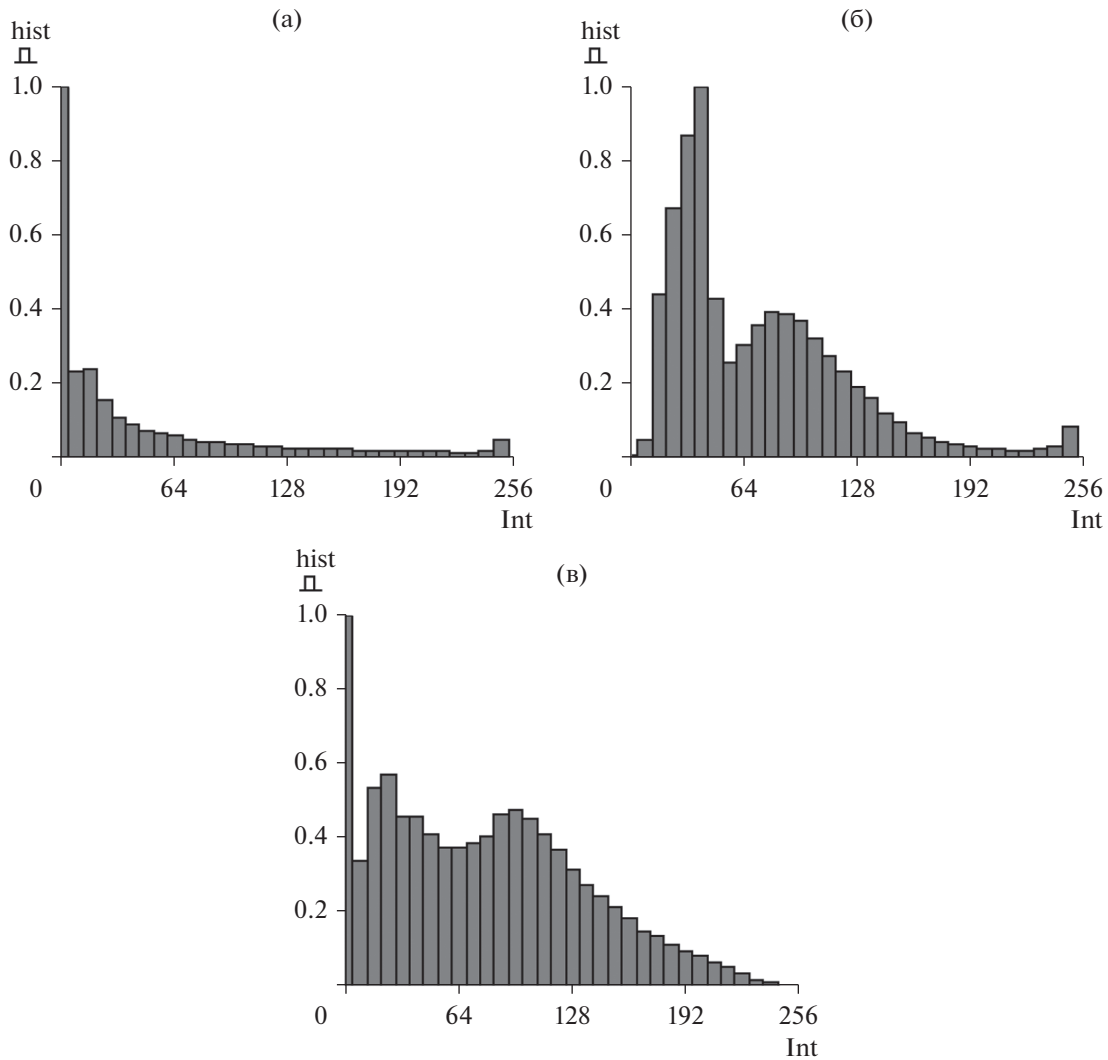


Рис. 2. Нормированные гистограммы распределения яркостей изображений: PCA (а), оптического (б), PCA, обработанного МПО (в).

отложены градации яркостей (“Int” сокращение “intensity” от 0 – черный, до 255 – белый).

Анализ рис. 1 и 2 позволяет сделать вывод о том, что по своей объемной структуре более близким к “идеальному”, чем изображение PCA (см. рис. 1б), является обработка PCA изображения с

помощью МПО (см. рис. 1е). На это же указывает и большая “схожесть” форм гистограмм яркостей рис. 2б и 2в по сравнению с рис. 2а. Это подтверждается статистическими характеристиками пространственных яркостей на исследуемых изображениях (табл. 1).

Таблица 1. Статистические характеристики пространственных яркостей на PCA изображении рис. 1а обработанном МПО и лапласианом

Значения	Тип изображения			
	OI	SAR	SAR MRL	SAR MRL L
M	85	56	99	99
S	49	65	53	55

Примечание. M (middle) – среднее значение, S (square) – среднее квадратичное отклонение (СКО), OI (optical image) – оптическое изображение, SAR (synthetic aperture radar) – PCA-изображение, SAR MRL (method of renormalization with limitation) – изображение PCA, обработанное методом перенормировки с ограничением, SAR MRL L (laplacian) – изображение PCA, последовательно обработанное методом перенормировки с ограничением и лапласианом.

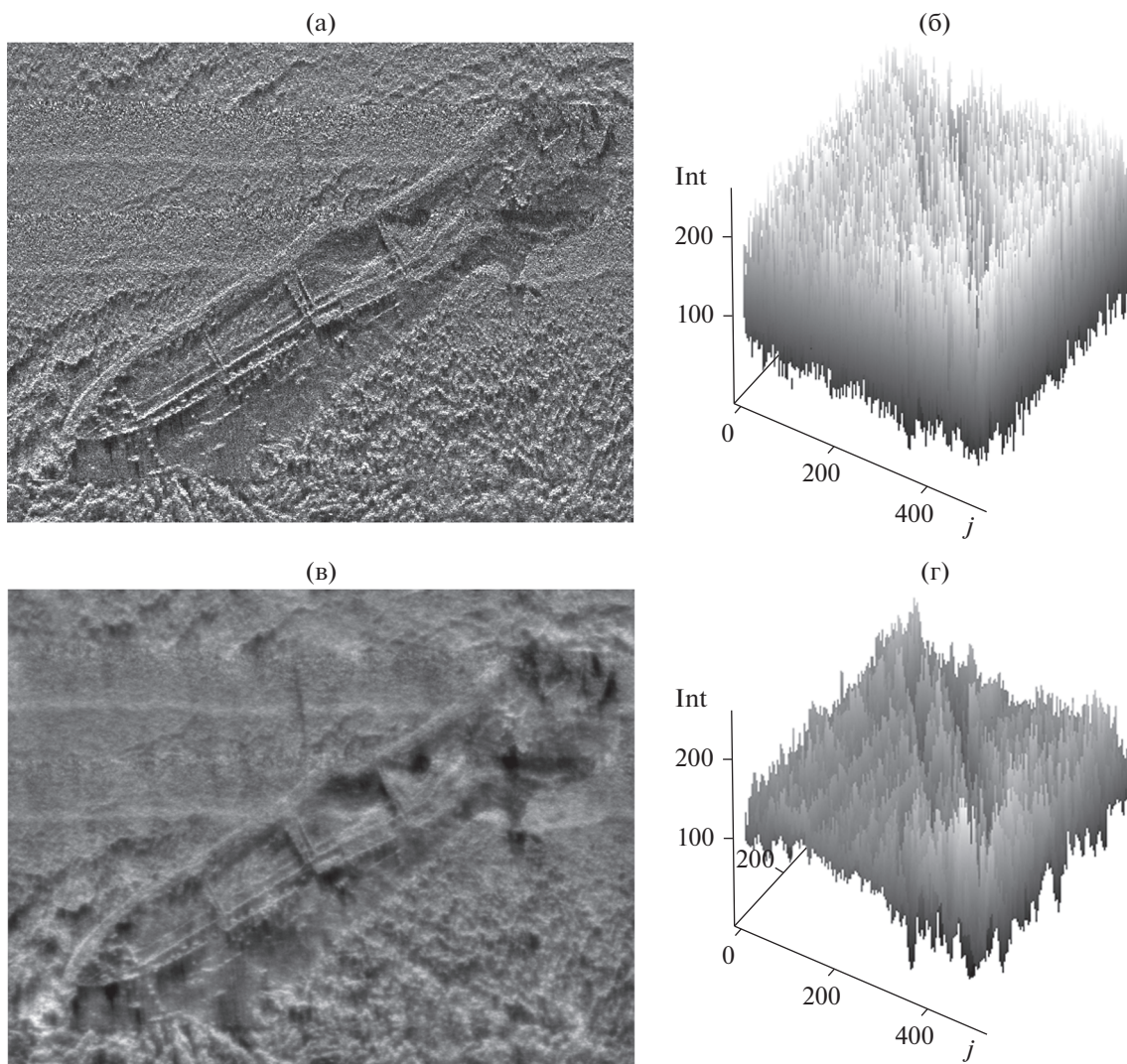


Рис. 3. Гидролокационное изображение затонувшего корабля: а, в – собственно изображения; б, г – объемный вид яркостей этих же изображений; а, б – исходное гидролокационное изображение; в, г – применение МПО к рис. 3а; по вертикальной оси объемных рисунков отложены значения яркостей пикселей в градациях серого (“Int” сокращение “intensity” от нуля – черный, до 255 – белый), две оставшиеся оси объемных рисунков показывают координаты пикселей яркости на поле изображения (i, j).

Из данных табл. 1 видно, что средние значения яркостей изображений РСА, обработанных методом перенормировки с ограничением (в том числе и с примененным последовательно лапласианом), равны 99 при 85 “идеальных”, присущих оптическому изображению, в то время как для изображения РСА средняя яркость соответственно равна 56 условных градаций яркости. Среднее квадратичное отклонение яркостей у МПО и МПО плюс лапласиан (53 и 55) тоже ближе к “идеальному” оптическому (49), чем СКО исходного изображения РСА (65).

1.2. Гидролокационные изображения

Рисунок 3а представляет собой гидролокационное изображение фрагмента морского дна с за-

тонувшим судном (размером 668 на 512 пикселей) [13], которое полученное с помощью интерферометрического гидролокатора бокового обзора (ИГБО) [15, 16], имеющего следующие технические характеристики:

- 1) разрешающая способность ИГБО по направлению движения 1.5 градуса, разрешение по наклонной дальности 0.03 м;
- 2) рабочая частота ИГБО 450 кГц;
- 3) средняя квадратичная погрешность измерения глубин ИГБО в полосе обзора до трех глубин не хуже 1% от глубины съемки, чувствительность к изменению коэффициента обратного рассеяния грунтов не менее 10%;
- 4) полоса съемки (обзора) ИГБО до 100 м на один борт;

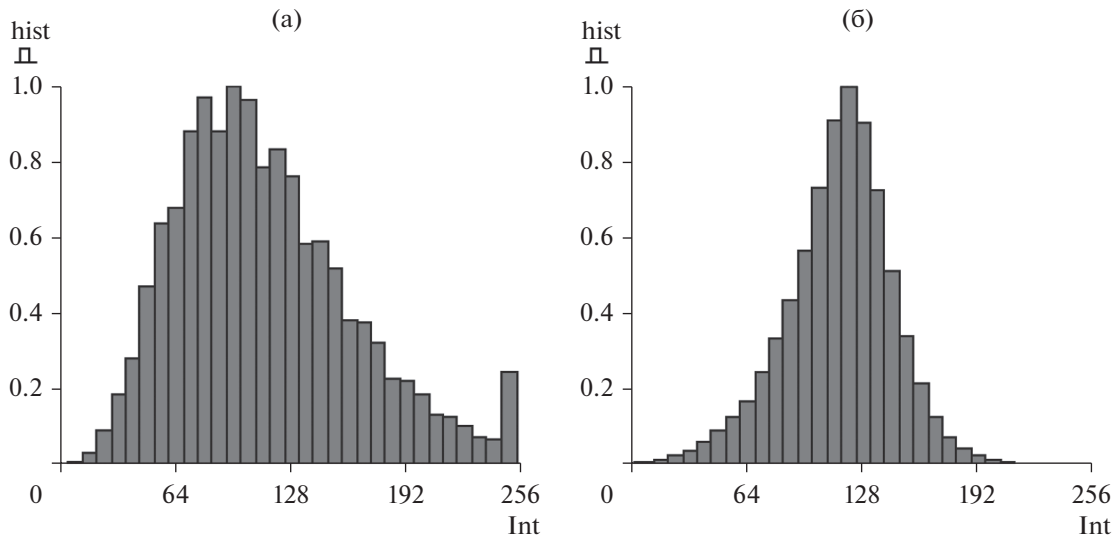


Рис. 4. Нормированные гистограммы изображений: а – для исходного гидролокационного изображения рис. 3а; б – для обработки МПО рис. 3в.

5) зондирующий сигнал – импульсный с линейно-частотной модуляцией.

В состав многофункционального гидролокационного комплекса АГКПС 100 входили дополнительные датчики:

- 1) приемник спутниковой навигации,
- 2) датчики крена дифферента и вертикальных перемещений,
- 3) гирокомпас,
- 4) измеритель скорости звука в воде.

Гидролокационную съемку проводили при движении судна по параллельным направлениям (галсам) на расстоянии 20 м между ними. Полученные на параллельных галсах акустические изображения наносили на географическую карту с учетом показаний, входящих в состав комплекса датчиков [11]. Особенностью построения карты является то, что изображения с соседних галсов не перекрываются (не происходит усреднения изображения с соседних галсов). Представленное на рис. 3а затонувшее судно имеет длину 40 м и лежит на глубине 17 м [13]. Рисунок 3в иллюстрирует применение метода перенормировки с ограничением к рис. 3а.

Рисунок 3 наглядно демонстрирует существенное снижение уровня спекл-шума после применения МПО к гидролокационному изображению. Об этом свидетельствует структура объемных изображений. Исходное изображение (см. рис. 3а, 3б) заполнено спекл-шумом по всему полю, в то время как обработка МПО (см. рис. 3в, 3г) убирает яркие точки, оставляя контуры корабля в неприкосновенности. Особый интерес представляет сравнение гистограмм яркостей этих изображений (рис. 4).

Гистограммы нормированы на максимальное значение для каждого изображения.

Нормированная гистограмма гидролокационного изображения (см. рис. 4а) имеет явно выраженный максимум, а значения яркостей растянуты по всему диапазону. Обращает на себя внимание значительное количество пикселей максимальной яркости (255 по горизонтальной оси на рис. 4а). Эти пиксели и являются спекл-шумом. Применение МПО к такому изображению в результате дает более “правильный”, в смысле подобия гауссовой кривой, вид гистограммы изображения с математическим ожиданием примерно посередине диапазона изменений яркостей (см. рис. 4б). При этом последняя гистограмма (рис. 4б) показывает отсутствие спеклов (большого количества пикселей максимальной яркости) на изображении, обработанном МПО. Это можно считать подтверждением того, что метод перенормировки с ограничением успешно борется со спекл-шумом.

Как отмечалось ранее, при подавлении спекл-шума с помощью МПО возникает эффект “затуманивания” или легкой “размытости”. Поэтому в качестве постобработки для повышения резкости используем повышение амплитуд высоких частот спектра, лапласиан и нерезкое маскирование. Для оценки снижения уровня спекл-шума были вычислены статистические характеристики значений яркостей на изображениях, обработанных МПО с дополнительными процедурами. В табл. 2 приведены средние значения, СКО по всей площади изображения, средние СКО по плавающему окну (спрайту) размером 9 на 9 пикселей. Средние СКО по спрайту более показательны для оценки подавления спекл-шума, они вычисляются не от среднего значения по всему изображению, а

как отклонение от усредненного плавающим окном уровня вокруг соответствующего пикселя.

Из данных табл. 2 можно установить, что при сохранении общего среднего значения яркостей СКО по спрайту у обработанных тем или иным способом изображений существенно меньше, чем у исходного акустического изображения. МПО с поднятием ВЧ в 1.5 раза как визуально, так и по своим статистическим характеристикам достаточно хорошо справляется с задачей повышения общей резкости изображения. Однако дальнейшая постобработка может привести к появлению артефактов, о чем свидетельствуют изменения статических характеристик и увеличение площади “белых” областей. Это проявляется и в изменениях гистограмм. Таким образом, применять дополнительные пространственные методы для увеличения резкости на подобных изображениях надо с осторожностью, однако постобработка весьма желательна для акустических изображений после применения МПО без поднятия ВЧ [13].

В других случаях это может быть не так. Акустические изображения существенно отличаются от оптических по своей структуре, а в зависимости от способа регистрации могут существенным образом отличаться и друг от друга. Поэтому методика обработки разных акустических изображений варьируется в каждом конкретном случае. В качестве второго примера используем гидролокационное изображение затонувшего корабля на фоне дна размером 3000 на 1085 пикселей (<https://www.kongsberg.com/ru/maritime/products/ocean-science/mapping-systems/sonars/SAS/>). Для наглядности и удобства работы возьмем фрагмент исходного изображения размером 1024 на 1024 пикселя (передняя часть затонувшего корабля), показанный на рис. 5а.

Для рассматриваемого нами случая гистограмма исходного акустического изображения показана на рис. 6а, а гистограмма результата применения МПО к этому изображению – на рис. 6б. Формы гистограмм на рис. 6 радикально отличаются от форм гистограмм на рис. 4. Рисунок 6 демонстрирует наличие большого количества пикселей черного цвета на изображениях (максимум вблизи нуля по горизонтальной оси). Гранулярная структура рис. 5а такова, что вся информативная часть подобных изображений представляет собой пиксели разных яркостей, разбросанные по черному фону. Применение метода перенормировки с ограничением к рис. 5а несколько трансформирует форму гистограммы. На рис. 6б видно относительное увеличение количества “ярких” пикселей по сравнению с рис. 6а. Однако форма гистограммы такого акустического изображения после применения МПО очень далека от похожей на распределение Гаусса гистограммы на рис. 4б.

Таблица 2. Статистические характеристики значений яркостей на гидролокационном изображении рис. 3а, обработанном МПО и дополнительными процедурами (лапласиан, нерезкое маскирование и МПО с повышением ВЧ в 1.5 раза)

Метод обработки	Значения		
	М	S	SS
SI	117	49	42
SI MRL	118	30	11
SI MRL L	119	34	17
SI MRL USM	118	37	20
SI MRL HFE	117	42	16
SI MRL HFE L	117	47	25
SI MRL HFE USM	117	52	30

Примечание. Здесь и в табл. 3 введены следующие обозначения: М – среднее значение, S – СКО, SS – СКО по спрайту; SI (sonar image) – исходное гидролокационное изображение, SI MRL (method of renormalization with limitation) – обработка с помощью МПО исходного изображения, SI MRL L – обработка с помощью МПО исходного изображения плюс лапласиан, SI MRL USM (unsharp masking) – обработка с помощью МПО исходного изображения плюс нерезкое маскирование, SI MRL HFE (high-frequency-emphasis filtering) – обработка с помощью МПО исходного изображения с поднятием высоких частот, SI MRL HFE L – обработка с помощью МПО исходного изображения с поднятием высоких частот плюс лапласиан, SI MRL HFE USM – обработка с помощью МПО исходного изображения с поднятием высоких частот плюс нерезкое маскирование.

Таблица 3. Статистические характеристики значений яркостей на гидролокационном изображении рис. 5а, обработанном МПО и дополнительными процедурами (лапласиан, нерезкое маскирование и МПО с повышением ВЧ в 1.5 раза)

Метод обработки	Значения		
	М	S	SS
SI	43	53	27
SI MRL	67	57	4
SI MRL L	67	57	6
SI MRL USM	67	58	7
SI MRL HFE	60	53	5
SI MRL HFE L	60	54	8
SI MRL HFE USM	60	55	9

В табл. 3 приведены статистические характеристики значений яркостей для гидролокационного изображения рис. 5а, обработанного МПО и дополнительными процедурами (лапласиан, нерезкое маскирование и МПО с повышением ВЧ в 1.5 раза).

В случае первого примера гидролокационного изображения (см. рис. 3, 4 и табл. 1) имело некоторый смысл вычислять СКО по всему полю изображения, чтобы получить представление о

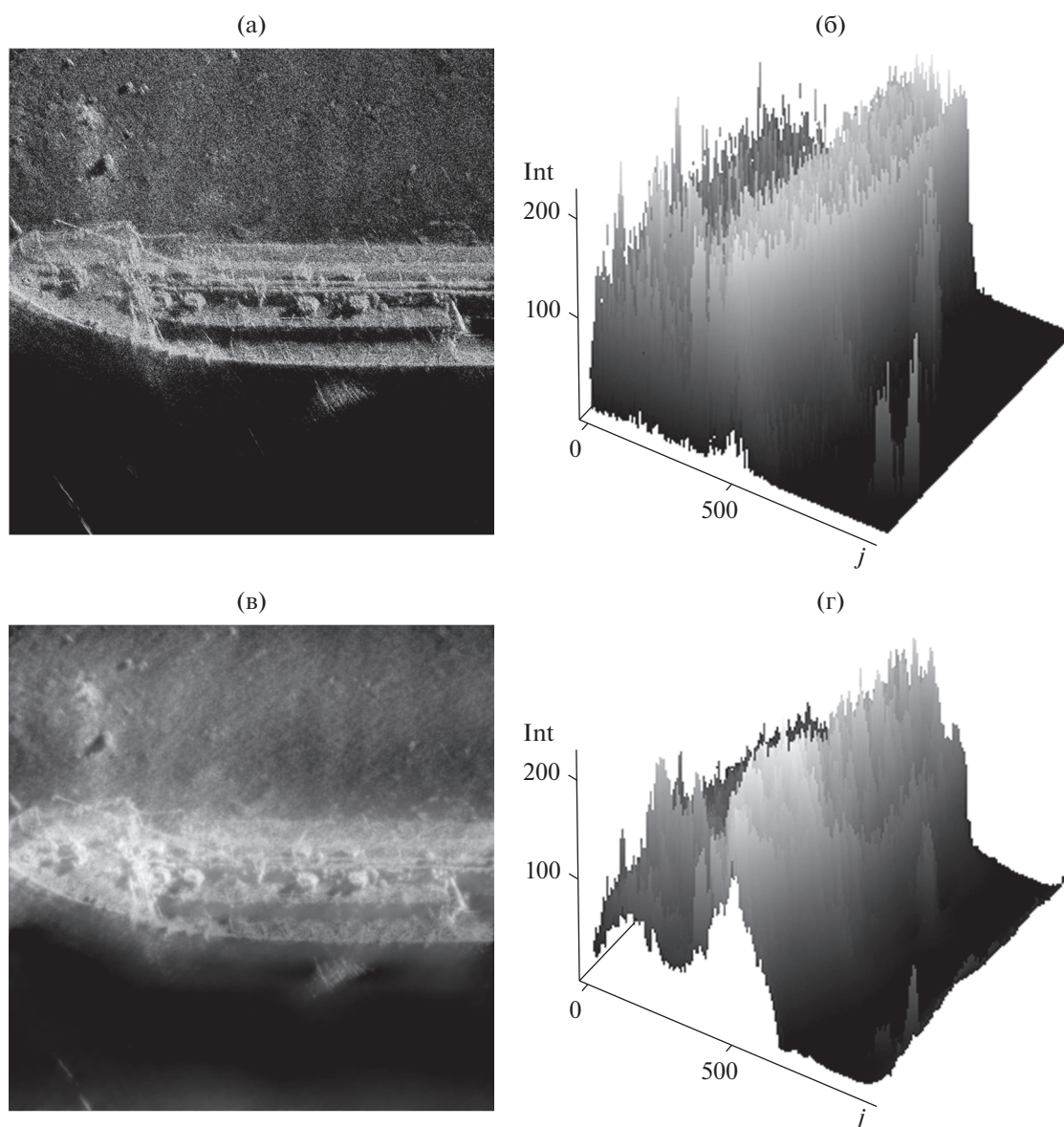


Рис. 5. Гидролокационное изображение передней части затонувшего корабля: слева – собственно изображения, справа – объемный вид яркостей этих же изображений; а, б – исходное гидролокационное изображение; в, г – применение МПО к рис. 5а; по вертикальной оси объемных рисунков отложены значения пространственных яркостей пикселей в градациях серого (“Int” сокращение “intensity” от 0 – черный, до 255 – белый), две оставшиеся оси объемных рисунков показывают координаты пикселей яркости на поле изображения.

степени подавления спеклов (хотя бы в случае “классического” МПО, т.е. МПО без применения дополнительных процедур). Применительно ко второму примеру (см. рис. 5, б) этого утверждать нельзя. Данные табл. 3 красноречиво свидетельствуют об этом. Средние яркости и среднеквадратичные отклонения по всему полю для второго примера увеличиваются после обработки МПО и после постобработки. Применение МПО “в среднем” преобразовывает исходные спектры в модель универсального опорного спектра, что, как было сказано выше, “в среднем” является спектром

оптического изображения “хорошего” качества. Вследствие структурных отличий оптических и акустических изображений это может вызвать вопросы. Из табл. 3 видно, что даже средние значения яркостей исходного акустического изображения (27) и результатов обработки МПО и постобработки (53, 57) могут существенно отличаться. В то же время СКО обработанных изображений, вычисленные по всему полю, могут даже превышать СКО исходного акустического. Все встает на свои места после оценки СКО по спрайту, как среднеквадратичного отклонения от усредненного

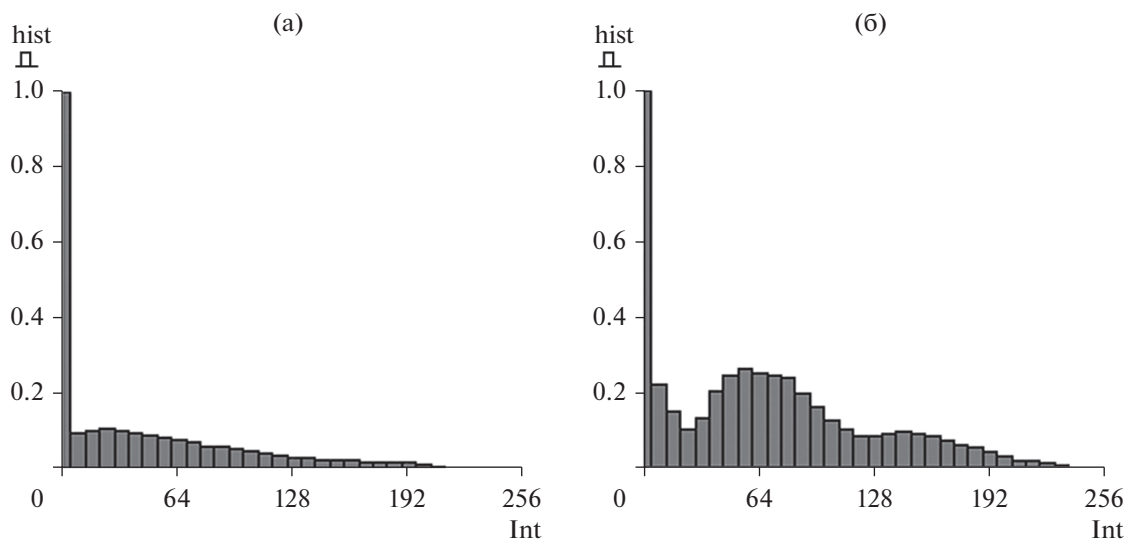


Рис. 6. Нормированные гистограммы изображений: а – для гидролокационного изображения рис. 5а; б – для обработки МПО рис. 5в.

плавающим окном 9 на 9 пикселей уровня вокруг каждого пикселя изображения. СКО по спрайту (SS) для обработки МПО и постобработки в разы меньше, чем это отклонение для исходного акустического изображения. После применения МПО меняется структура изображения. Она из зернистой становится близкой к структуре оптических изображений, более привычных человеческому глазу. Как и ранее, побочным эффектом трансформации структуры изображения является эффект “затуманивания” или небольшой “размытости” изображения. Это, в свою очередь, можно скорректировать той или иной постобработкой (методами, повышающими общую резкость изображений).

Для второго примера (см. рис. 5а) в отличие от первого (см. рис. 3а) для МПО с повышением высоких частот в 1.5 раза плюс лапласиан или плюс нерезкое маскирование получают приемлемые результаты. В качестве подтверждения изложенного выше рассмотрим результаты обработки различными методами гидролокационного изображения, представленного на рис. 5а (рис. 7). С экспертной точки зрения изображением с “наилучшей” резкостью можно считать изображение, обработанное с помощью МПО с повышением высоких частот в 1.5 раза плюс нерезкое маскирование (см. рис. 7г).

1.3. Медицинские ультразвуковые изображения

Изображения, полученные в ходе медицинских ультразвуковых исследований (УЗИ), были изучены в работе [8]. В качестве исходного взято изображение (рис. 8а) размером 640 на 480 пикселей из атласа ультразвуковых изображений (<https://www.medison.ru/ultrasound/gal103.htm>). Там, как

дополнительный этап обработки, после применения МПО с повышением высоких частот, предлагается применить билатеральную фильтрацию (БФ) [17, 18], что позволяет сгладить спеклы с сохранением четких границ объектов. По сравнению с описанными выше примерами это является особым случаем, поскольку после применения МПО с поднятием высоких частот не произошло существенного подавления спекл-шума (см. рис. 8) [8].

Там же [8] проиллюстрирован известный факт о том, что применение медианной фильтрации к данной задаче менее предпочтительно, поскольку эта процедура вместе со спекл-шумом может удалить и полезную информацию [14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено тестирование применения метода перенормировки с ограничением к цифровым изображениям с целью повышения их качества. Это является обобщением опыта использования МПО для борьбы со спекл-шумом. Установлено, что применение МПО к изображениям меняет их пространственную структуру. Так происходит потому, что метод перенормировки с ограничением, по своему определению, перенормирует спектр обрабатываемого изображения к модели универсального опорного спектра (УОС), которая является моделью спектра оптического изображения “хорошего” качества [6, 7]. Изображения РСА, гидролокации и УЗИ по своей структуре значительно отличаются от оптических изображений, поэтому в качестве “платы” за эти изменения при применении МПО проявляется эффект “затуманивания” или незначительной “размытости” изобра-

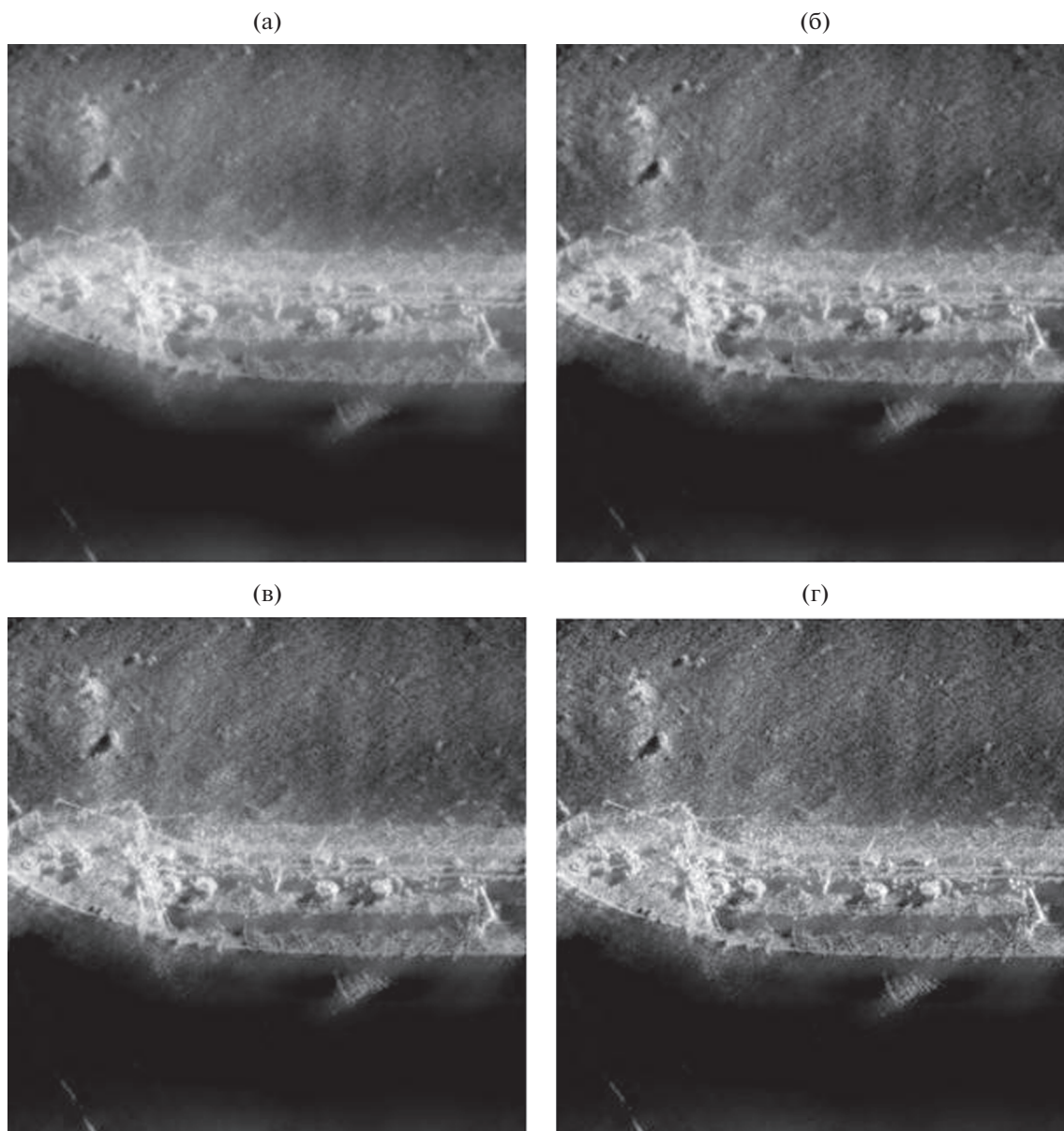


Рис. 7. Гидролокационное изображение рис. 5а, обработанное с помощью МПО (а), МПО с поднятием высоких частот (б), МПО с поднятием высоких частот плюс лапласиан (в), МПО с поднятием высоких частот плюс нерезкое маскирование (г).

жения. Для повышения общей резкости изображения предложено использовать постобработку (увеличение амплитуд высоких частот спектра, лапласиан, нерезкое маскирование) [14]. А в особых случаях (если после применения МПО с поднятием высоких частот не произошло существенного снижения уровня шума) в качестве постобработки протестирована билатеральная фильтрация [8, 17, 18]. Предложено оценивать степень подавления спекл-шума с помощью среднеквадратичного отклонения от изображения, усредненного по спрайту. Все изложенное позволяет сделать вывод о том, что применение МПО к цифровым изображениям

позволяет существенно снизить присущий им спекл-шум.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Описание алгоритма метода перенормировки с ограничением (МПО).

Сначала вычисляется инверсная фильтрация. То есть спектр исходного искаженного аппаратной функцией и зашумленного изображения – $FM(i, j)$ поэлементно делится на спектр этой АФ – $Faf(i, j)$. Затем вычисляется амплитудный спектр исходного изображения усред-

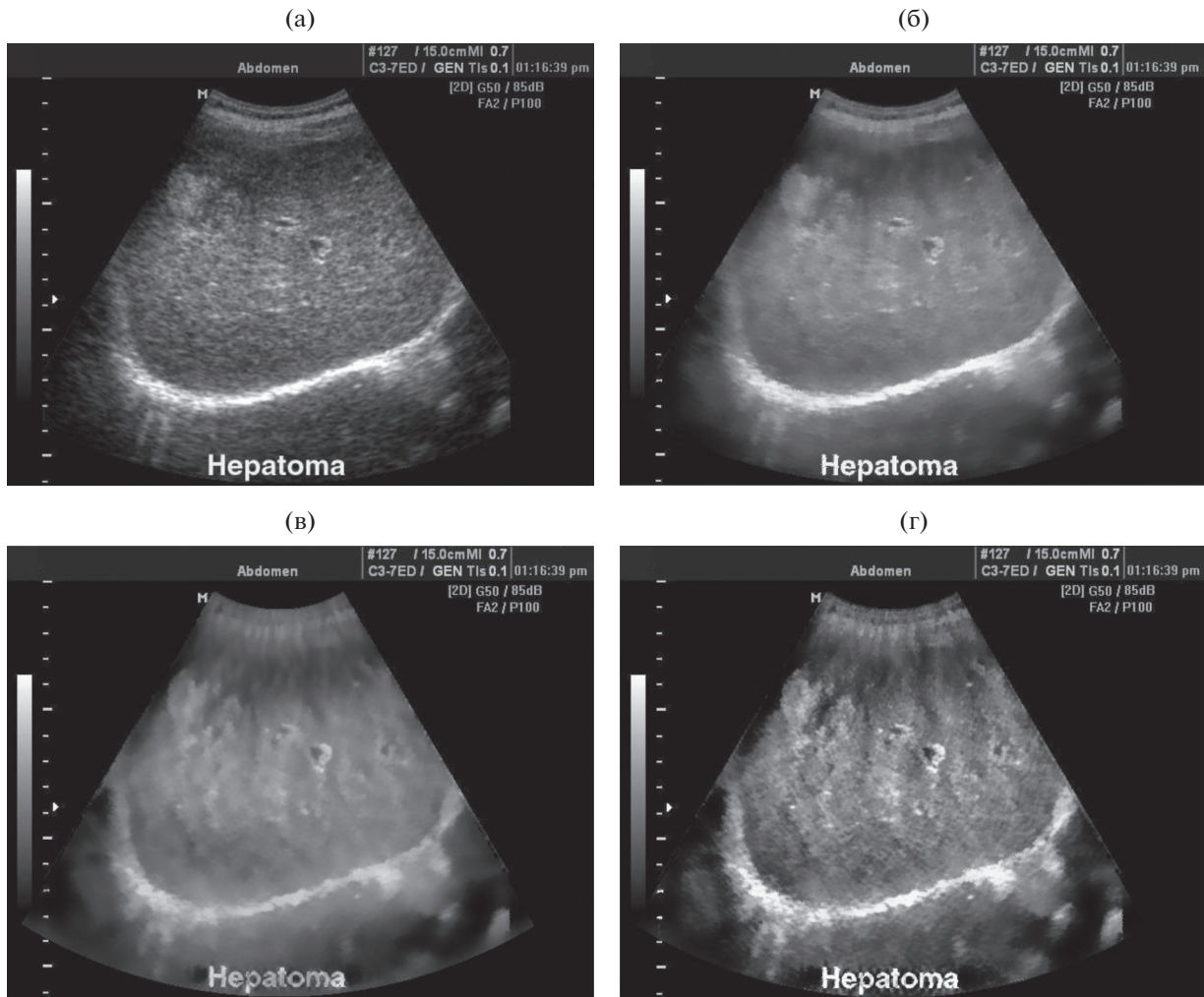


Рис. 8. Исходное изображение УЗИ (а) и результаты его обработки (все с применением развертки из секторального в прямоугольное и обратно): БФ к исходному (б), “классический” МПО плюс БФ (в), МПО с поднятием высоких частот плюс БФ (г).

ненный по спрайту (5×5 пикселей) (YCC) – $FM_s(i, j)$. И делается перенормировка результата инверсной фильтрации на модель универ-

сального опорного спектра (YOC) – $URS(i, j)$. Алгоритм МПО можно записать в виде следующего выражения:

$$FM_p(i, j) = \frac{FM(i, j) |Faf(i, j) URS(i, j)| FM_s(0, 0)}{Faf(i, j) FM_s(i, j) URS(0, 0)}, \quad (П.1)$$

где $FM_s(0, 0)$ и $URS(0, 0)$ – значения соответствующих спектров при нулевой пространственной частоте, $FM_p(i, j)$ – перенормированный инверсно отфильтрованный спектр.

“Ограничение”, заявленное в названии метода, заключается в следующем. Так как в среднем спектр $FM_p(i, j)$ должен соответствовать YOC , то превышение преобразованного амплитудного спектра над уровнем YOC более чем в Ur раз интерпретируем как помеху. Ur обычно выбирается равным

4. Помимо собственно помех это ограничивает и спектральные артефакты, присущие процедуре инверсной фильтрации и возникающие при операциях близких к так называемому “делению на ноль”. В окрестности низких частот (вокруг нулевой пространственной частоты) диаметром 9 пикселей значение спектра не меняем. В этой “неприкосновенной” области остается только результат инверсной фильтрации. В конечном итоге с помощью обратного преобразования Фурье

спектра $FMp(i, j)$ получим восстановленное изображение.

Поскольку в данной работе предполагается, что какому-либо размытию исходное изображение не подвергалось, то искажающая аппаратная функция принимается “игольчатой” (шириной много менее одного пикселя). Таким образом, $Faf(i, j)$ (спектр АФ) перестает фигурировать в формуле (П.1). И формула МПО принимает следующий вид:

$$FMp(i, j) = \frac{FM(i, j)URS(i, j) FMs(0, 0)}{FMs(i, j) URS(0, 0)}. \quad (\text{П.2})$$

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разманов В.М., Кривцов А.П., Долотов С.А. // РЭ.2006. Т. 51. № 1. С. 58.
2. Achim A., Bezerianos A., Tsakalides P. // IEEE Trans. 2001. V. MI-20. № 8. P. 772.
3. Isar A., Firoiu I., Nafornta C., Moga S. Sonar Systems / Ed. N. Kolev. P.139. Rieka: Intech Open, 2011. <https://www.intechopen.com/chapters/18875>
4. Ghazel M., Freeman G.H., Vrscay E.R. // IEEE Trans. 2003. V. IP-12. № 12. P. 1560.
5. Илюшин С.В. // T-Comm. 2011. № 3. С. 22.
6. Кокошкин А.В., Коротков В.А., Коротков К.В., Новичихин Е.П. // Журн. радиоэлектроники. 2015. № 7. <http://jre.cplire.ru/jre/jul15/5/text.pdf>.
7. Гуляев Ю.В., Зражевский А.Ю., Кокошкин А.В. и др. // Журн. радиоэлектроники. 2013. № 12. <http://jre.cplire.ru/jre/dec13/3/text.pdf>.
8. Кокошкин А.В. // Журн. радиоэлектроники. 2020. № 10. <http://jre.cplire.ru/jre/oct20/1/text.pdf>.
9. Кокошкин А.В. // Журн. радиоэлектроники. 2021. № 3. <http://jre.cplire.ru/jre/mar21/4/text.pdf>
10. Кокошкин А.В., Коротков В.А., Коротков К.В., Новичихин Е.П. // РЭ 2019. Т. 64. № 6. С. 563. <https://doi.org/10.1134/S0033849419060044>
11. Кокошкин А.В., Коротков В.А., Коротков К.В., Новичихин Е.П. // Журн. радиоэлектроники 2016. № 8. <http://jre.cplire.ru/jre/aug16/3/text.pdf>.
12. Кокошкин А.В., Коротков В.А. Программа реализации метода перенормировки с ограничением для обработки радиоизображений. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016661952. Оpubл. офиц. бюл. “Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем” № 11 от 20.11.2016 г.
13. Кокошкин А.В., Новичихин Е.П., Смольянинов И.В. // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии (РЭНСИТ). 2021. Т. 13. № 3. С. 377. <https://doi.org/10/17725/rensit.2021.13.377>
14. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: “Техносфера”, 2019.
15. Каевицер В.И., Кривцов А.П., Разманов В.М. и др. // Журн. радиоэлектроники. 2016. № 11. <http://jre.cplire.ru/jre/nov16/1/text.pdf>.
16. Смольянинов И.В. Программа для нанесения на географическую карту гидролокационного изображения морского дна. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2018663122. Оpubл. офиц. бюл. “Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем” № 11 от 22.10.2018 г.
17. Кранчатова Т.В., Филиппов М.В. // Наука и образование. 2012. № 02. <http://technomag.edu.ru/doc/340957.html>.
18. Tomasi C., Manduchi R. // Proc. 6th Int. Conf. on Computer Vision. Bombay. 7 Jan. 1998. N.Y.: IEEE, 1998. P. 839.