

УДК 621.396

Алгоритмы апостериорной фильтрации короткоэкспозиционного изображения ДЗЗ, пространственно-инвариантного к атмосферным искажениям

К. Н. Свиридов

д. т. н., профессор

АО «Российские космические системы»

e-mail: sviridovkn@yandex.ru

Аннотация. Оптические изображения дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) искажены приземным слоем турбулентной атмосферы. Для компенсации атмосферных искажений предлагаются алгоритмические технологии последетекторной пространственной фильтрации искаженного изображения. Решается задача апостериорного определения оптической передаточной функции (ОПФ) системы атмосфера–телескоп ДЗЗ по ее короткоэкспозиционному изображению. Рассмотрены существующие алгоритмы апостериорного определения оценок модуля и фазы мгновенной ОПФ системы атмосфера–телескоп и представлены новые. При этом для оценки модуля ОПФ предложено определять и использовать статистически подобный эталонный объект, а для оценки фазы ОПФ предложено использовать статистическое усреднение и рекурсивный алгоритм восстановления. По апостериорно полученным оценкам модуля и фазы формируется ОПФ системы атмосфера–телескоп, которая используется для формирования винеровского фильтра и пространственной фильтрации атмосферных искажений зарегистрированного изображения. Приведены результаты экспериментов, подтверждающих теорию.

Ключевые слова: турбулентная атмосфера, алгоритмические технологии, последетекторная обработка изображений, статистически подобный эталон, апостериорная оценка модуля и фазы ОПФ, винеровская фильтрация искажений изображения

A Posteriori Filtering Algorithms for Short-Exposure ERS Images, Spatially Invariant to Atmospheric Distortions

K. N. Sviridov

doctor of engineering science, professor

Joint Stock Company “Russian Space Systems”

e-mail: sviridovkn@yandex.ru

Abstract. Optical images of Earth remote sensing (ERS) are distorted by the surface layer of the turbulent atmosphere. To compensate for the atmospheric distortions it is suggested to utilize the algorithmic technologies of postdetector spatial filtering of the distorted image. The article proposes a solution to the problem of the a posteriori determination of the optical transfer function (OTF) from the remote sensing telescope-atmosphere system by its short-exposure image. The existing algorithms of a posteriori determination of the magnitude and phase estimates of the instantaneous OTF atmosphere-telescope are discussed and new ones are provided. Therewith, to assess the OTF module, it is proposed to define and use a statistically similar object as a reference, and for the evaluation of the phase of the OTF it is proposed to use the statistical averaging and the recursive reconstruction algorithm. According to the a posteriori obtained estimates of the magnitude and phase, the atmosphere-telescope OTF is formed, which is used to form the Wiener filter and spatial filtering atmospheric distortions of the captured image. The results of experiments confirming the theory are presented.

Keywords: turbulent atmosphere, algorithmic technology, postdetector image processing, statistically similar reference, a posteriori evaluation of the magnitude and the phase of the OTF, Wiener image distortion filtering

Введение

Изображение объекта (зондируемого участка земной поверхности), наблюдаемого из космоса через приземной слой атмосферы, оказывается искаженным турбулентностью атмосферы [1]. Для коррекции пространственно-инвариантных атмосферных искажений зарегистрированного изображения существуют различные алгоритмы фильтрации его пространственного спектра [2]. Реализация этих алгоритмов предполагает априорное знание оптической передаточной функции (ОПФ) $H(u, v)$ или импульсного отклика $h(x, y)$ (функции рассеяния точки) системы атмосфера–телескоп, сформировавшей изображение. Априори, однако, такая информация отсутствует и возникает задача апостериорного определения указанных величин по самому зарегистрированному изображению [3].

Трудность ее решения при фильтрации короткоэкспозиционного изображения обусловлена тем, что мгновенная (короткоэкспозиционная) ОПФ системы атмосфера–телескоп не имеет универсальной аналитически известной зависимости такой, как средняя ОПФ при длинноэкспозиционной регистрации, а является комплексной функцией, изменяющейся случайным образом от одной короткоэкспозиционной регистрации к другой.

Постановка задачи

Сформулируем постановку решаемой задачи. Имеется короткоэкспозиционное изображение $g(x, y)$, пространственно-инвариантное к атмосферным искажениям,

$$g(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(\xi, \eta) h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta + n(x, y), \quad (1)$$

где $f(\xi, \eta)$ — истинное распределение интенсивности объекта (участка зондируемой земной поверхности), $\{\xi, \eta\}$ — координаты на земной поверхности, $h(x - \xi, y - \eta)$ — пространственно-инвариантная, случайная функция рассеяния точки (ФРТ) системы атмосфера–телескоп, а $n(x, y)$ — аддитивный шум фона и регистрации в плоскости изображения $\{x, y\}$.

Пренебрегая шумом, преобразуем интеграл свертки (1) по Фурье в область пространственного спектра

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v), \quad (2)$$

где заглавные буквы обозначают пространственно-частотные спектры и ОПФ от соответствующих функций, обозначенных малыми буквами. Заметим, что $h(x, y)$ и $H(u, v)$ образуют фурье-пару и знание одного предполагает знание другого.

Требуется найти $h(x, y)$ или $H(x, y)$ по $g(x, y)$, а методы нахождения $f(\xi, \eta)$ при заданных $h(x, y)$ или $H(x, y)$ известны [2].

Для решения этой задачи здесь предлагается подход к восстановлению модуля и фазы ОПФ системы атмосфера–телескоп, основанный на статистической обработке компонент пространственных спектров фрагментов зарегистрированного изображения с использованием статистически подобных эталонов. При решении задачи принимаются следующие предположения: 1) ФРТ является пространственно-инвариантной; 2) протяженность ФРТ мала по сравнению с протяженностью зарегистрированного изображения; 3) изображение ДЗЗ свободно от шума.

С учетом сделанных предложений разделим искаженное изображение (1) на фрагменты, которые могут перекрываться (т. е. частично совпадать). Тогда в силу пространственной инвариантности системы для фрагментов изображения с размерами, большими элемента разрешения системы атмосфера–телескоп, можно записать

$$g_i(x, y) = \int_i f_i(\xi, \eta) h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta, \quad (3)$$

где $i = 1, 2, \dots, N$ — индекс, указывающий на номер i -го фрагмента, а N — число обрабатываемых фрагментов изображения.

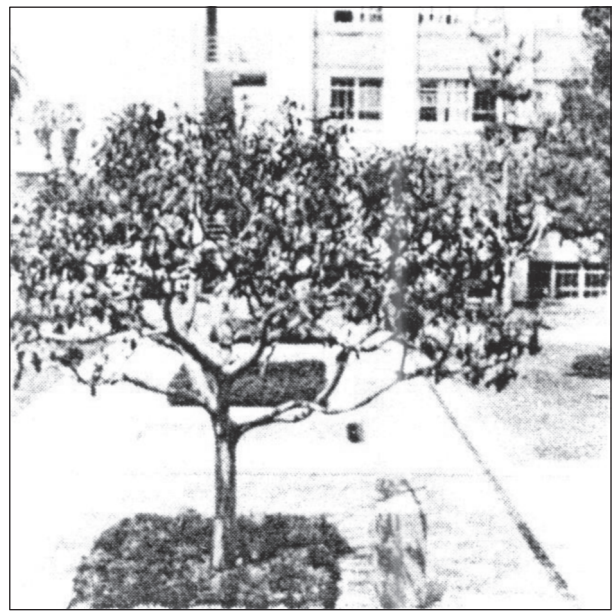
Преобразуем обе части уравнения (3) по Фурье и получаем его описание в пространственно-частотной области в виде

$$\begin{aligned} |G_i(u, v)| e^{j\theta_{G_i}(u, v)} &\approx \\ &\approx |F_i(u, v)| e^{j\theta_{F_i}(u, v)} |H(u, v)| e^{j\theta_H(u, v)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь $|G_i(u, v)|$ — модуль пространственного спектра i -го фрагмента искаженного изображения, $|F_i(u, v)|$ — модуль пространственного спектра



а



б

Рис. 1. Два статистически подобных изображения

i -го фрагмента искаженного распределения интенсивности объекта, $|H(u, v)|$ — модуль ОПФ системы атмосфера–телескоп для зарегистрированного изображения (1), а $\theta_{Gi}(u, v)$, $\theta_{Fi}(u, v)$, $\theta_H(u, v)$ — фазы соответствующих пространственных спектров и ОПФ системы атмосфера–телескоп.

Далее обработку амплитудной и фазовой информации будем осуществлять отдельно, как и в работе [3].

Статистически подобный эталон

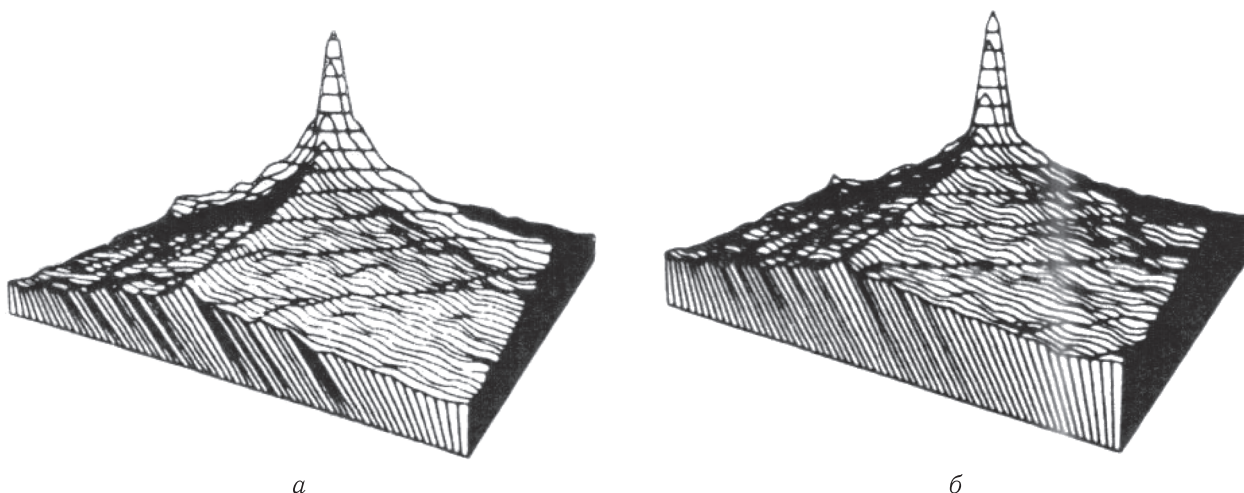
Для апостериорного определения модуля мгновенной ОПФ зарегистрированного изображения используют статистически подобные эталонные объекты [4,5]. Для подтверждения существования статистически подобных эталонов в работе [6] были проведены экспериментальные исследования, некоторые результаты которых представлены ниже. Так, в качестве иллюстрации статистически подобных эталонов на рис. 1 представлены два изображения объектов, статистически подобных в том смысле, что величины

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |F_{ik}(u, v) F_{ik}^*(u + \Delta u, v + \Delta v)| \quad (5)$$

являются похожими для $k = 1, 2$, где индекс k обозначает каждое из двух изображений рисунка.

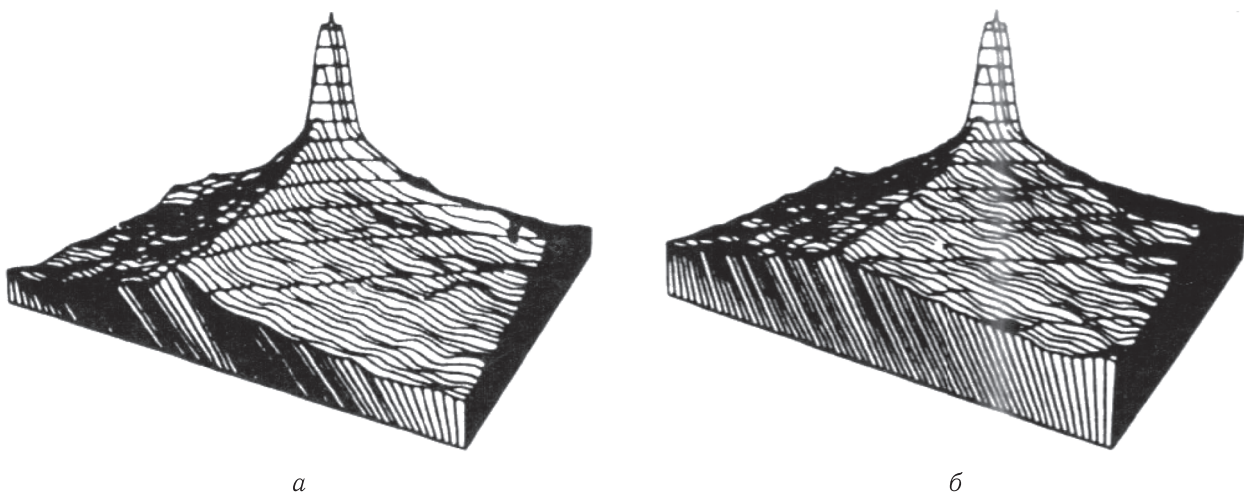
Заметим, что здесь предметное содержание одного изображения отлично от содержания другого. Отличие в предметном содержании объектов выбрано специально, чтобы подчеркнуть, что различным объектовым содержаниям могут соответствовать похожие статистики. В качестве иллюстрации этого на рис. 2 и рис. 3 представлены результаты соответствующих вычислений (5) для изображений рис. 1. Здесь на рис. 2 представлены автокорреляции (5) для $\Delta u = 1$ и $\Delta v = 0$, а на рис. 3 представлены автокорреляции (5) для $\Delta u = 0$ и $\Delta v = 1$. Эти результаты [6] были получены с использованием П-образной функции «скользящего окна», которая выделяла фрагменты размером 64×64 пикселя с их 50%-м перекрытием. Так как каждое представленное изображение рис. 1 имело размер 512×512 пикселей, то в этом случае число обрабатываемых фрагментов N было равно 225.

Результаты, представленные на рис. 2 и рис. 3, подтверждают статистическую похожесть (в смысле (5)) изображений, представленных на рис. 1, а, б.



Автокорреляция, соответствующая рис. 1, а

Автокорреляция, соответствующая рис. 1, б

Рис. 2. Log_{10} от величины автокорреляции для $\Delta U = 1, \Delta V = 0$ 

Автокорреляция, соответствующая рис. 1, а

Автокорреляция, соответствующая рис. 1, б

Рис. 3. Log_{10} от величины автокорреляции для $\Delta U = 0, \Delta V = 1$

Апостериорная оценка модуля ОПФ

Существуют разные подходы к апостериорной оценке модуля мгновенной ОПФ $|H(u, v)|$ с использованием статистически подобного эталона.

Так, Cole [4], в соответствии с (4), выделял модуль пространственного спектра изображения

$$|G_i(u, v)| \approx |F_i(u, v)| |H(u, v)| \quad (6)$$

и брал натуральный логарифм от обеих частей выражения (6)

$$\ell_n |G_i(u, v)| \approx \ell_n |F_i(u, v)| + \ell_n |H(u, v)|, \quad (7)$$

а, усредняя (7) по N фрагментам, получал

$$\begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ell_n |G_i(u, v)| &\approx \\ &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ell_n |F_i(u, v)| + \ell_n |H(u, v)|. \end{aligned} \quad (8)$$

Полагая далее, что зарегистрированное изображение (1) было искажено не настолько, чтобы нельзя было определить общий класс, к которому относится неискаженное изображение $f(x, y)$,

он использовал эталонный объект $p(x, y)$ того же класса для оценки среднего модуля пространственного спектра

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ell_n |P_i(u, v)| \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ell_n |F_i(u, v)|, \quad (9)$$

где $P_i(u, v)$ обозначает пространственный спектр фрагментов прототипа.

Затем, вычитая (9) из (8), Cole окончательно получал

$$\ell_n |H(u, v)| \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ell_n |G_i(u, v)| - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ell_n |P_i(u, v)|. \quad (10)$$

Это восстановление [4] предполагало оптическую передаточную функцию с нулевой фазой, то есть $\theta_H(u, v) \approx 0$.

Cannon [5] предполагал стационарность объекта и использовал для апостериорной оценки модуля ОПФ соотношение стохастической линейной системы

$$\Phi_g(u, v) = \Phi_f(u, v) |H(u, v)|^2. \quad (11)$$

Здесь Φ обозначает спектральные плотности мощности изображения Φ_g и объекта Φ_f . При этом величина Φ_g была оценена по зарегистрированному изображению $g(x, y)$, а величина Φ_f была оценена по объекту-прототипу $p(x, y)$.

Отсюда искомый модуль ОПФ был определен как

$$|H(u, v)| = [\Phi_g(u, v) / \Phi_f(u, v)]^{1/2}. \quad (12)$$

На основании проведенных нами исследований [3] и с использованием статистически подобного эталонного объекта предложен новый подход к апостериорной оценке модуля $|H(u, v)|$.

В соответствии с этим подходом, учитывая (4), формируют квадрат модуля пространственного спектра фрагментов изображения в виде

$$|G_i(u, v)|^2 = |H(u, v)|^2 |F_i(u, v)|^2. \quad (13)$$

Усредняют (13) по всем N фрагментам зарегистрированного изображения и получают

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |G_i(u, v)|^2 = |H(u, v)|^2 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |F_i(u, v)|^2. \quad (14)$$

Величину $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |F_i(u, v)|^2$ определяют по статистически подобному эталону $p(x, y)$ как

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |F_i(u, v)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i(u, v)|^2. \quad (15)$$

На основании соотношений (14) и (15) оценку модуля ОПФ $|\hat{H}(u, v)|$ определяют как

$$|\hat{H}(u, v)| = \left[\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |G_i(u, v)|^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i(u, v)|^2} \right]^{1/2}. \quad (16)$$

Заметим, что в задачах ДЗЗ в качестве статистически подобных эталонов могут быть такие объекты, как лес, поле, город, океан и т.п. в соответствии с определенным классом зондируемого участка земной поверхности.

Апостериорная оценка фазы ОПФ

Здесь, как и в случае оценки модуля ОПФ, существуют разные подходы. Для нахождения оценки фазы ОПФ выделяем из (4) фазы пространственных спектров фрагментов искаженного изображения (1) в виде

$$\theta_{G_i}(u, v) = \theta_H(u, v) + \theta_{F_i}(u, v) \quad (17)$$

и, усредняя их по всем N фрагментам зарегистрированного изображения, получаем

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_{G_i}(u, v) = \theta_H(u, v) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_{F_i}(u, v). \quad (18)$$

Так как объект ДЗЗ (зондируемый участок земной поверхности) имеет, как правило, сложное распределение интенсивности, то его фрагменты $f_i(x, y)$ в плоскости изображения будут иметь существенно отличные друг от друга спектры $F_i(u, v)$, распределение фазы которых $\theta_{F_i}(u, v)$ в точке (u, v) близко к равновероятному в интервале $(-\pi, \pi)$.

Тогда, при больших N , имеем

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_{F_i}(u, v) \approx 0 \quad (19)$$

и определяем оценку фазы ОПФ из (18) как

$$\hat{\theta}_H(u, v) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_{G_i}(u, v). \quad (20)$$

Точность получаемой таким образом оценки фазы ОПФ будет зависеть от числа обрабатываемых фрагментов зарегистрированного изображения и внутренней структуры распределения интенсивности фрагментов.

Другой подход к апостериорной оценке фазы мгновенной ОПФ $\hat{\theta}_H(u, v)$ был предложен в работе [6]. Здесь после выделения фрагментов зарегистрированного изображения и преобразования их по Фурье в область пространственного спектра, аналогично (4), получали

$$G_i(u, v) = H(u, v)F_i(u, v) \quad (21)$$

и формировали произведения

$$G_i(u, v)G_i^*(u + \Delta u, v + \Delta v) = H(u, v) \times H^*(u + \Delta u, v + \Delta v)F_i(u, v)F_i^*(u + \Delta u, v + \Delta v), \quad (22)$$

а, выделяя фазы в (22), получали

$$\theta_{G_i}(u, v) - \theta_{G_i}(u + \Delta u, v + \Delta v) = \theta_H(u, v) - \theta_H(u + \Delta u, v + \Delta v) + \theta_{F_i}(u, v) - \theta_{F_i}(u + \Delta u, v + \Delta v), \quad (23)$$

где обозначения G_i , H и F_i относятся к фазам соответствующих функций $G_i(u, v)$, $H(u, v)$ и $F_i(u, v)$.

Усредняя далее (23) по всем N фрагментам зарегистрированного изображения, получали

$$\begin{aligned} \langle \theta_{G_i}(u, v) - \theta_{G_i}(u + \Delta u, v + \Delta v) \rangle_i &= \\ &= [\theta_H(u, v) - \theta_H(u + \Delta u, v + \Delta v)] + \\ &+ \langle \theta_{F_i}(u, v) - \theta_{F_i}(u + \Delta u, v + \Delta v) \rangle_i, \end{aligned} \quad (24)$$

а, учитывая, что $\theta_H = (0, 0) \equiv 0$, перестраивали (24) и получали рекурсивное соотношение для оценки $\hat{\theta}_H(u, v)$

$$\begin{aligned} \theta_H(u + \Delta u, v + \Delta v) &= \\ &= \theta_H(u, v) - \langle \theta_{G_i}(u, v) - \theta_{G_i}(u + \Delta u, v + \Delta v) \rangle_i + \\ &+ \langle \theta_{F_i}(u, v) - \theta_{F_i}(u + \Delta u, v + \Delta v) \rangle_i, \end{aligned} \quad (25)$$

где угловые скобки $\langle \cdot \rangle$ обозначают статистическое среднее $(\langle \cdot \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N)$.

Проведенные исследования [6] показали, что средняя оценка фазовых разностей $\langle \Delta \theta_{F_i}(\Delta u, \Delta v) \rangle_i$ может быть аппроксимирована нулем, то есть

$$\langle \theta_{F_i}(u, v) - \theta_{F_i}(u + \Delta u, v + \Delta v) \rangle_i \approx 0. \quad (26)$$

Тогда оценка фазы мгновенной ОПФ зарегистрированного изображения может быть получена рекурсивным соотношением

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_H(u + \Delta u, v + \Delta v) &\approx \hat{\theta}_H(u, v) - \\ &- \langle \theta_{G_i}(u, v) - \theta_{G_i}(u + \Delta u, v + \Delta v) \rangle_i. \end{aligned} \quad (27)$$

Пространственная фильтрация зарегистрированного изображения

Оценив модуль $|\hat{H}(u, v)|$ [(12) или (16)] и фазу $\hat{\theta}_H(u, v)$ [(20) или (27)] мгновенной ОПФ системы атмосфера-телескоп для зарегистрированного изображения (1), формируют оценку мгновенной ОПФ в виде

$$\hat{H}(u, v) = |\hat{H}(u, v)| \exp\{j\hat{\theta}_H(u, v)\}. \quad (28)$$

Знание $\hat{H}(u, v)$ позволяет скорректировать атмосферные искажения зарегистрированного изображения (1) известными методами пространственной фильтрации [2].

1. Инверсная фильтрация

При большом отношении сигнал/шум, характерном для задач ДЗЗ, можно пренебречь аддитивными шумами в изображении (1). Тогда в пространственно-частотной области для зарегистрированного изображения имеем (2)

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v).$$

Отсюда оценка пространственного спектра неискаженного истинного распределения интенсивности объекта $\hat{\hat{F}}(u, v)$ может быть определена инверсной фильтрацией [7] как

$$\begin{aligned} \hat{\hat{F}}(u, v) &= G(u, v)R(u, v) = G(u, v)/\hat{H}(u, v), \\ R(u, v) &= 1/\hat{H}(u, v), \end{aligned} \quad (29)$$

где $R(u, v)$ — фильтрующая функция, а $\hat{H}(u, v)$ обозначает сформированную оценку ОПФ (21). Оценка истинного распределения интенсивности объекта $\hat{f}(x, y)$ может быть получена при обратном фурье-преобразовании от $\hat{F}(u, v)$ (29). Этот подход в ряде случаев дает приемлемый результат фильтрации, но в других случаях нули $\hat{H}(u, v)$ и наличие аддитивного шума в (1) могут привести к плохо обусловленным результатам фильтрации. Для устранения этой неопределенности предлагается использовать линейную винеровскую фильтрацию.

2. Винеровская фильтрация

Винеровский фильтр является фильтром общего назначения, который дает приемлемые результаты и определяется [8] как

$$R(u, v) = \frac{\hat{H}^*(u, v)\Phi_f(u, v)}{|\hat{H}(u, v)|^2\Phi_f(u, v) + \Phi_n(u, v)}. \quad (30)$$

Здесь $\Phi_f(u, v)$ и $\Phi_n(u, v)$ обозначают спектральные плоскости мощности истинного распределения интенсивности объекта $f(x, y)$ и шума $n(x, y)$ соответственно. Модельный эксперимент [9] показал, что выбор фильтра для восстановления $f(x, y)$ (то есть инверсного, винеровского, гомоморфного и т. п.) также влияет на результат.

Все эти фильтры требуют знания оценки $\hat{H}(u, v)$, но винеровский фильтр выбирается как классический пример стабильного фильтра. Он является оптимальным в смысле минимума среднеквадратичной ошибки. Стабильность винеровского фильтра имеет результатом его эксклюзивное использование.

Предположим, что искаженное изображение $g(x, y)$ является стационарным в широком смысле [10]. Тогда спектральная плотность мощности зарегистрированного изображения $\Phi_g(u, v)$ есть знаменатель в (30)

$$\Phi_g(u, v) = |\hat{H}(u, v)|^2\Phi_f(u, v) + \Phi_n(u, v). \quad (31)$$

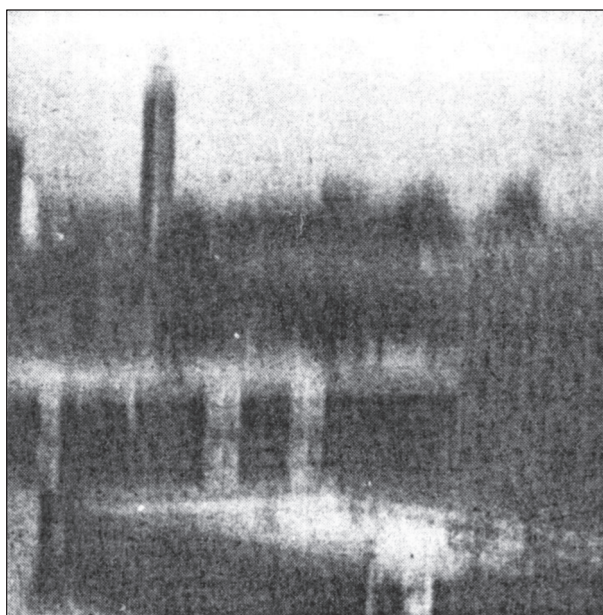
Знаменатель винеровского фильтра (31) может быть оценен из зарегистрированного искаженного изображения $g(x, y)$, а его числитель, точнее $\Phi_f(u, v)$, может быть оценен статистически подобным прототипом $p(x, y)$.

Экспериментальные результаты апостериорной фильтрации

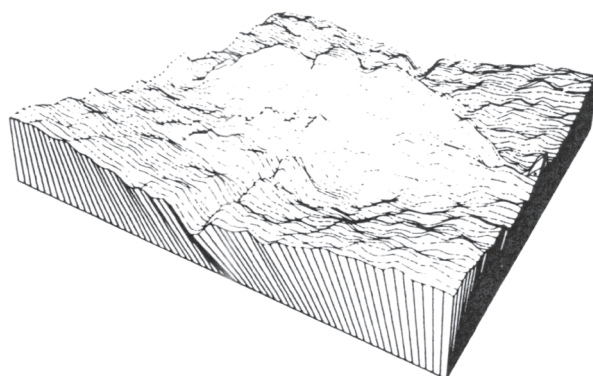
Эксперимент по апостериорной пространственной фильтрации искаженного изображения был проведен в работе [6]. В нем апостериорная оценка модуля ОПФ для зарегистрированного изображения $|\hat{H}(u, v)|$ определялась с использованием статистически подобных эталонов, представленных на рис. 1, по алгоритму, предложенному в [5], формула (12). Апостериорная оценка фазы ОПФ зарегистрированного изображения $\hat{\theta}_H(u, v)$ в этом эксперименте была получена с использованием рекурсивного алгоритма (27). Примеры апостериорного восстановления зарегистрированных искаженных изображений с использованием апостериорно полученных оценок $|\hat{H}(u, v)|$, $\hat{\theta}_H(u, v)$ и винеровского фильтра (30) представлены на рис. 4 и рис. 5.

Здесь на рис. 4, а и рис. 5, а показаны исходные для обработки искаженные изображения 1 и 2, на рис. 4, б и рис. 5, б, а также рис. 4, в и рис. 5, в представлены соответственно оценки модулей и фаз ОПФ для искаженных изображений, а на рис. 4, г и рис. 5, г представлены обработанные изображения, улучшенные винеровской фильтрацией. Улучшение отфильтрованных изображений очевидно. Здесь в дополнение к повышению пространственного разрешения появились некоторые элементы сцены, которые были неузнаваемыми в исходном изображении. Так, на рис. 4, а объект на вершине трубы является неузнаваемым. В восстановленном изображении рис. 4, г видно, что этот объект является шаром.

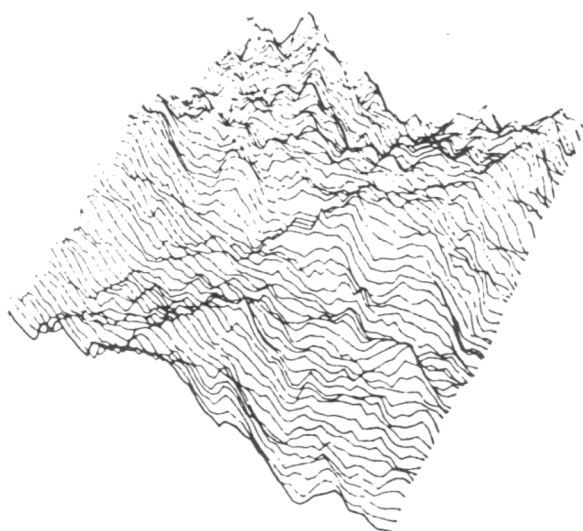
В дополнение на рис. 4, г заметно улучшение в определении окон и структуры здания в правой части сцены. Аналогичное повышение пространственного разрешения наблюдается и для сцены рис. 5. Здесь в восстановленном изображении рис. 5, г заметно увеличение резкости изображения и появление деревьев как в юго-западном квадранте кадра, так и в центре правой стороны кадра, а также четко видны деревья вдоль вершины кадра. Кроме того, здесь следует отметить увеличение резкости изображений машин и зданий.



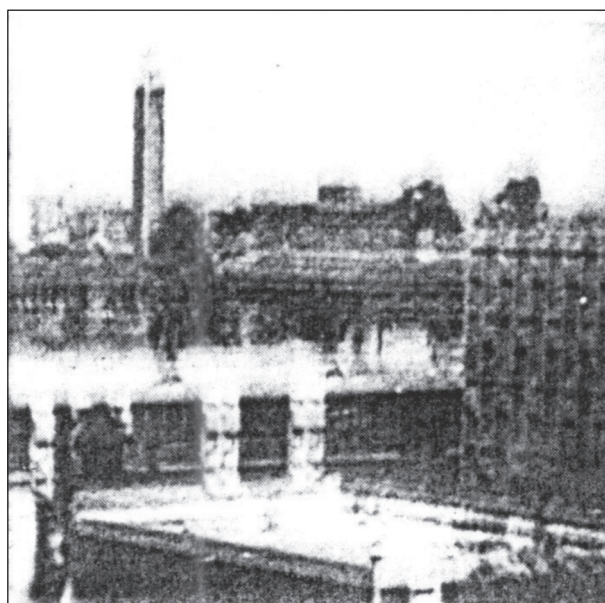
а



б



в



г

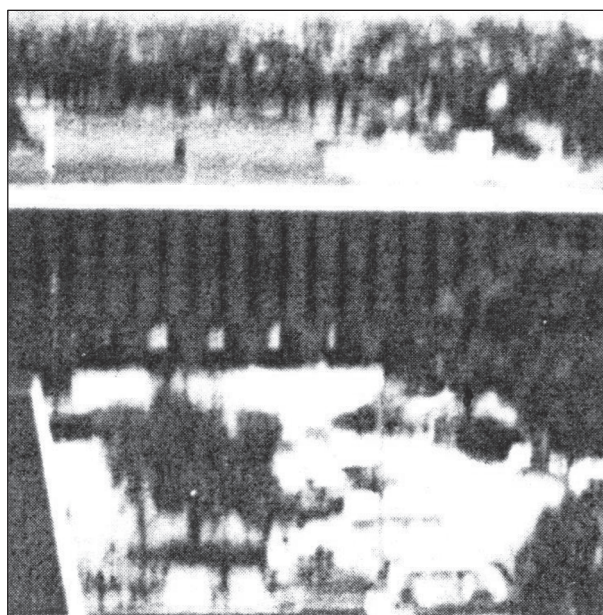
Рис. 4. Апостериорная фильтрация искаженного изображения — 1

а) зарегистрированное искаженное изображение — 1; б) апостериорная оценка модуля ОПФ; в) апостериорная оценка фазы ОПФ; г) восстановленное фильтрацией изображение — 1

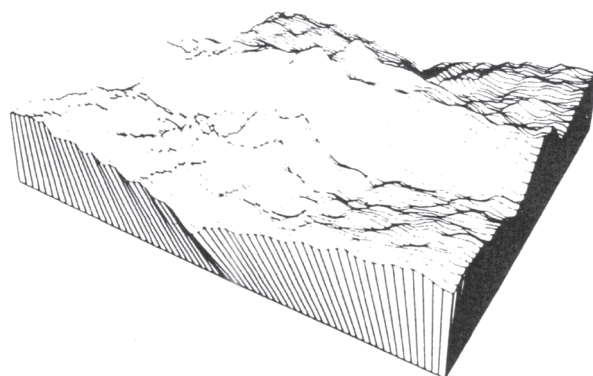
Заключение

Результаты экспериментов подтвердили эффективность рассмотренных выше алгоритмов апостериорной пространственной фильтрации по улучшению пространственного разрешения зарегистри-

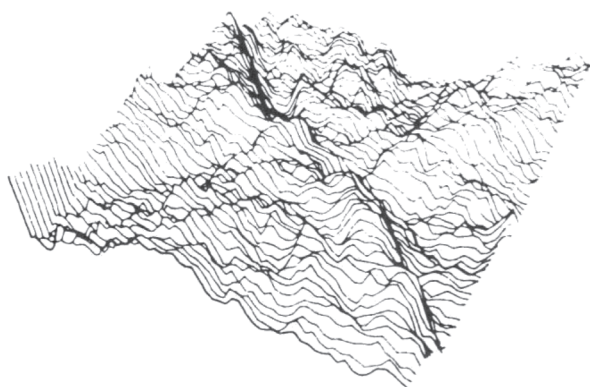
рованного искаженного изображения с использованием статистически подобных эталонов. Это свидетельствует о том, что рассмотренные выше алгоритмы могут быть эффективно использованы для апостериорной фильтрации и повышения пространственного разрешения зарегистрированного



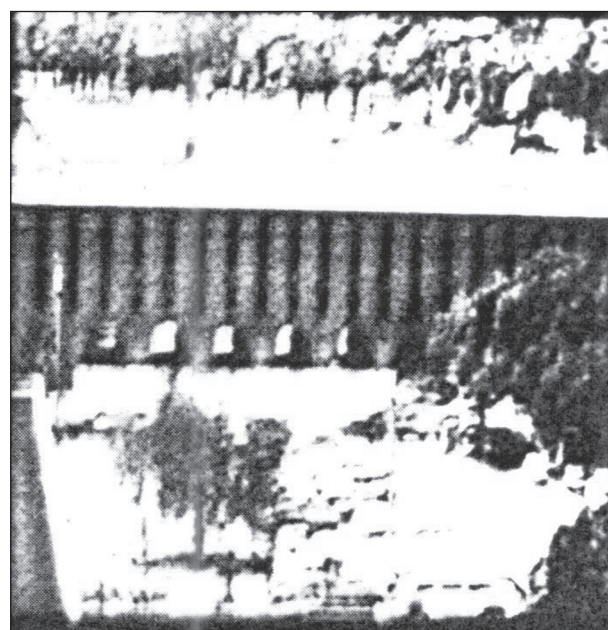
a



б



в



г

Рис. 5. Апостериорная фильтрация искаженного изображения — 2

a) зарегистрированное искаженное изображение — 2; *б*) апостериорная оценка модуля ОПФ; *в*) апостериорная оценка фазы ОПФ; *г*) восстановленное фильтрацией изображение — 2

короткоэкспозиционного изображения ДЗЗ, пространственно-инвариантного к атмосферным искажениям. Алгоритм восстановления короткоэкспозиционного изображения ДЗЗ, пространственно-неинвариантного к атмосферным искажениям,

был предложен нами ранее [11]. Практическая реализация предложенных алгоритмов обработки короткоэкспозиционных изображений ДЗЗ в сочетании с реализацией технологий их приобретения (формирования и детектирования) позво-

лят достичь предельного инструментального разрешения систем ДЗЗ в условиях атмосферного видения, что повысит коммерческую привлекательность и конкурентоспособность отечественных данных ДЗЗ на потребительском рынке.

Список литературы

1. Свиридов К.Н. О предельном разрешении аэрокосмических систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2014, т. 1, вып. 1. С. 34.
2. Tsujinchi J. Correction of optical images by compensation of aberration and by spatial frequency filtering, in Progress in Optics / Ed. E. Wolf / North-Holland, Amsterdam, 1963. V. 2. P. 130.
3. Свиридов К.Н., Бакут П.А., Сидельников В.Н., Устинов Н.Д. Апостериорная пространственная фильтрация искаженного атмосферой короткоэкспозиционного изображения // Оптика и спектроскопия, 1982, т. 53, вып. 1. С. 163.
4. Cole E.R. The Removal of Unknown Image Blurs by Homomorphic Filtering // Dept. of Computer Science, University of Utah, ARPA Technical Report UTEC-CSC-74-029, June 1974.
5. Cannon T.M. Digital Image Deblurring by Nonlinear Homomorphic Filtering // Dept. of Computer Science, University of Utah, ARPA Technical Report UTEC-CSC-74-091, August 1974.
6. Morton J.B. An Investigation Into An A Posteriori Method of Image Restoration // USCPI Report № 810, University of Southern California Image Processing Institute, April 1978.
7. Harris J.L., Sr. Image Evaluation and Restoration // JOSA, 1966. V. 56. P. 569.
8. Hellstrom C.W. Image Restoration by the Method of Least Squares // JOSA, 1967. V. 57. P. 297.
9. Breedlove J.R., Jr. Digital Image Processing of Simulated Turbulence and Photon Noise Degraded Images of Extended Objects // Proc. of SPIE "Imaging through the Atmosphere", 1976. V. 75. P. 155.
10. Cannon T.M. Blind Deconvolution of Spatially Invariant Image Blurs with Phase // IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process., 1976. V. 24. P. 58.
11. Свиридов К.Н. Алгоритм восстановления короткоэкспозиционного изображения ДЗЗ, пространственно неинвариантного к атмосферным искажениям // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2016, т. 3, вып. 2. С. 31.