

УДК 621.396

Алгоритм восстановления коротко-экспозиционного изображения ДЗЗ, пространственно неинвариантного к атмосферным искажениям

К. Н. Свиридов

д. т. н., проф., АО «Российские космические системы»

e-mail: sviridovkn@yandex.ru

Аннотация. Отмечено негативное влияние турбулентности атмосферы на системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Рассмотрены аппаратные и алгоритмические технологии частичной коррекции атмосферного влияния. Предложен и обоснован новый алгоритм для восстановления неискаженного атмосферой изображения, обладающего дифракционным разрешением телескопа ДЗЗ в его широком поле зрения.

Предложенный алгоритм позволяет упростить и ускорить процесс получения изображения ДЗЗ, а при цифровой статистической обработке фрагментов одного зарегистрированного изображения позволяет определить и скомпенсировать его атмосферные искажения. Данный алгоритм обладает новизной и полезностью для его практического применения в системах ДЗЗ.

Ключевые слова: турбулентная атмосфера, проблемы «видения» и «изопланатичности», пространственная фильтрация, восстановление изображения

The Recovery Algorithm for Short-Exposure ERS Image, Space-Invariant to the Atmospheric Distortions

K. N. Sviridov

doctor of engineering science, professor, Joint Stock Company “Russian Space Systems”

e-mail: sviridovkn@yandex.ru

Abstract. Negative influence of the atmospheric turbulence on the ERS systems is noted. Hardware and software technologies for partial correction of atmospheric influence are reviewed. A new algorithm for recovering the image undistorted by the atmosphere, which has a diffraction-limited resolution of the ERS telescope in its broad field of view, is proposed and proved.

The offered algorithm makes easier and increases the rate for Earth remote sensing (ERS) images receiving. This algorithm enables to determine and reimburse its atmospheric distortions at digital statistic processing of the fragments of one registered image. The algorithm is a new and can be applied practically in the ERS systems.

Keywords: turbulent atmosphere, problems of “seeing” and “isoplanacity”, spatial filtration, image restoration.

Введение

Оптические изображения объектов, наблюдаемых через турбулентную атмосферу, оказываются искаженными как процессом формирования изображений, так и процессом их регистрации. При этом искажения процесса формирования изображения обусловлены пространственно-временными флуктуациями показателя преломления турбулентной атмосферы, а искажения процесса регистрации обусловлены квантовым характером взаимодействия света с веществом светочувствительного слоя фотоматериала и нелинейностью процесса фото экспонирования. Для коррекции этих искажений разработаны алгоритмы фильтрации изображений [1]. Эти алгоритмы основаны на предположении линейности и пространственной инвариантности систем получения изображений. Однако если нелинейностью процесса регистрации в ряде случаев можно пренебречь и считать систему получения изображений линейной, то пространственная инвариантность (изопланатичность) систем, формирующих изображения через турбулентную атмосферу, ограничивается [2, 3]. Это ограничение является существенным при фильтрации мгновенных (коротко-экспозиционных) изображений протяженных участков земной поверхности и не позволяет обрабатывать указанные изображения известными алгоритмами пространственной фильтрации [1].

В настоящей работе предлагается новый алгоритм статистической обработки и восстановления коротко-экспозиционного изображения ДЗЗ, пространственно-неинвариантного к атмосферным искажениям.

Влияние турбулентной атмосферы на системы ДЗЗ

Наличие турбулентной атмосферы Земли между зондируемым участком земной поверхности и космическим аппаратом ДЗЗ существенно ограничивает информационные возможности систем ДЗЗ [4]. Возникают две проблемы: проблема «видения» через турбулентную атмосферу и проблема «изопланатичности» зондируемого участка земной поверхности. Суть этих проблем состоит в том, что проблема «видения» накладывает ограничения

на минимальный размер деталей, разрешаемых системой атмосфера–телескоп ДЗЗ на зондируемом участке земной поверхности, а проблема «изопланатичности» ограничивает максимальный размер зондируемого участка земной поверхности, который еще является пространственно инвариантным к атмосферным искажениям, то есть эта проблема ограничивает поле зрения системы атмосфера–телескоп ДЗЗ.

Эти проблемы существенно зависят от условий наблюдения и, в частности, от условий регистрации изображений ДЗЗ.

Если время регистрации (экспонирования) $\tau_{\text{Э}}$ превышает интервал временной корреляции атмосферных флуктуаций $\tau_{\text{А}}$ (так называемого времени «замороженности» турбулентностей атмосферы), говорят о длинно-экспозиционной регистрации, а если время регистрации $\tau_{\text{Э}}$ меньше $\tau_{\text{А}}$, то говорят о коротко-экспозиционной регистрации. Эти два крайних случая существенно отличаются характером атмосферных искажений. Так, если длинно-экспозиционное изображение, усредненное по атмосферным искажениям за время $\tau_{\text{Э}} > \tau_{\text{А}}$, обладает худшим разрешением, чем мгновенное коротко-экспозиционное изображение, регистрируемое за время $\tau_{\text{Э}} < \tau_{\text{А}}$, то оно является пространственно инвариантным к атмосферным искажениям во всем поле зрения системы атмосфера–телескоп ДЗЗ, в отличие от коротко-экспозиционного изображения, состоящего в этом поле из ряда мгновенных областей изопланатичности, пространственно неинвариантных к атмосферным искажениям.

В соответствии с этим на ранней стадии развития технологий ДЗЗ желание работать в широком поле зрения стимулировало получение длинно-экспозиционных изображений ДЗЗ как в отечественных космических аппаратах ДЗЗ «Ресурс-ДК1» [5] и «Ресурс-П» [6], так и в американских космических аппаратах ДЗЗ QuickBird, WorldView и GeoEye [7].

Используемая в них при детектировании технология ВЗН (временной задержки и накопления) приводит к регистрации длинно-экспозиционного изображения ДЗЗ, усредненного по атмосферным искажениям.

Характеристикой этого изображения является средняя (длинно-экспозиционная) оптическая

передаточная функция (ОПФ), определяемая [8] как

$$\langle \tau(\mathbf{f}) \rangle_{\text{д-э}} = \langle \tau(\mathbf{f}) \rangle = \tau_0(\mathbf{f}) \exp \left\{ -3,44 [\bar{\lambda} F \mathbf{f} / r_0(\bar{\lambda}, H)]^{5/3} \right\}. \quad (1)$$

С развитием техники ДЗЗ появились новые технологии, позволяющие определять и корректировать атмосферные искажения. Эти технологии условно можно отнести к двум классам: аппаратурных и алгоритмических технологий. Рассмотрим их.

Аппаратурные технологии коррекции влияния турбулентности атмосферы в системах ДЗЗ

Первая аппаратурная технология повышения пространственного разрешения систем ДЗЗ основана на изменении телескопа ДЗЗ, а именно на замене стеклянного телескопа-рефрактора на зеркальный телескоп-рефлектор и увеличении диаметра приемной апертуры телескопа D до величины $D > 2r_0(\bar{\lambda}, H)$. Эта технология позволяет в условиях атмосферного видения и длинно-экспозиционной регистрации изображений ДЗЗ достигать предельного разрешения, равного 4,6 см. Главная проблема практической реализации этой технологии заключается в необходимости создания телескопа апертурного синтеза концепции МЗТ (многозеркального телескопа) с диаметром апертуры $D = 7$ м при $H = 350$ км или $D = 10$ м при $H = 500$ км, где H — высота космического аппарата ДЗЗ над земной поверхностью. Эта технология ДЗЗ была рассмотрена в работе [9], где предложена альтернативная возможность достижения предельного разрешения ДЗЗ с авиационных высот $H = (10-20)$ км телескопом-рефлектором сплошной апертуры с диаметром апертуры $D = (20-40)$ см соответственно.

Другая аппаратурная технология повышения пространственного разрешения систем ДЗЗ основана на преддетекторной адаптивной компенсации случайных наклонов волнового фронта, обусловленных влиянием турбулентности атмосферы. Эта технология предложена в [10] и исследована в [11]. Она позволяет получать среднее коротко-экспозиционное изображение, характеризующееся средней

коротко-экспозиционной оптической передаточной функцией, определяемой [8] как

$$\langle \tau(\mathbf{f}) \rangle_{\text{к-э}} = \tau_0(\mathbf{f}) \times \exp \left\{ -3,44 [\bar{\lambda} F \mathbf{f} / r_0(\bar{\lambda}, H)]^{5/3} [1 - (\bar{\lambda} F \mathbf{f} / D)^{1/3}] \right\}. \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) $\mathbf{f} = (\rho_1 - \rho_2) / \bar{\lambda} F$ — пространственно-частотный вектор в апертуре ρ телескопа ДЗЗ, $\bar{\lambda}$ — средняя длина волны солнечного излучения подсвета ($\bar{\lambda} = 0,5$ мкм), F — фокусное расстояние телескопа ДЗЗ, $\tau_0(\mathbf{f})$ — оптическая передаточная функция телескопа ДЗЗ, а $r_0(\bar{\lambda}, H)$ — пространственный радиус корреляции атмосферных флуктуаций светового излучения на высоте H космического аппарата ДЗЗ, определяемый [9] как

$$r_0(\bar{\lambda}, H) \approx \frac{H}{L} r_0(\bar{\lambda}, L), \quad (3)$$

где $r_0(\bar{\lambda}, L) = 0,1$ м — величина пространственного радиуса корреляции атмосферных флуктуаций светового излучения на границе турбулентного слоя L ($L \approx 10$ км).

Нетрудно видеть, что при высоте КА ДЗЗ $H = 350$ км величина $r_0(\bar{\lambda}, H)$ оказывается равной 3,5 м, при $H = 500$ км $r_0(\bar{\lambda}, H) = 5$ м, а при $H = 750$ км величина $r_0(\bar{\lambda}, H) = 7,5$ м. Таким образом, величина $r_0(\bar{\lambda}, H)$ оказывается значительно большей диаметра $D = 1,1$ м существующих телескопов ДЗЗ [7], а атмосферные искажения волнового фронта на приемной апертуре телескопа ДЗЗ представляют собой случайные наклоны волнового фронта, компенсируемые в предложенной адаптивной системе. При этом очевидно, что получаемая здесь средняя коротко-экспозиционная ОПФ (2) превалирует над средней длинно-экспозиционной ОПФ (1) во всей области пространственных частот, обеспечивая выигрыш в разрешении среднего коротко-экспозиционного изображения ДЗЗ. Исследования показали, что при оптимальном диаметре апертуры $D = 3,5 r_0$ система с адаптивной компенсацией случайных наклонов волнового фронта по сравнению с системой без компенсации обеспечивает максимальный выигрыш разрешения в 4 раза [11].

В целом аппаратурные технологии, обеспечивая теоретически хорошие результаты по разрешению,

практически требуют существенной модернизации аппаратуры систем ДЗЗ. Более простой путь достижения положительных результатов по улучшению пространственного разрешения и увеличению изопланатичного поля зрения систем ДЗЗ обеспечивают алгоритмические технологии.

Алгоритмические технологии коррекции влияния турбулентности атмосферы в системах ДЗЗ

Первой алгоритмической технологией, предложенной в [12], стала технология, основанная на получении и обработке серии из N спектрально-фильтруемых коротко-экспозиционных изображений ДЗЗ. Проведенные исследования [13] показали, что в результате детектирования и регистрации серии мгновенных изображений ДЗЗ, независимых друг от друга по атмосферным искажениям, и их последующей статистической обработки, получают среднее коротко-экспозиционное изображение, характеризующее по разрешению средней коротко-экспозиционной ОПФ (2), а по изопланатичности поля зрения средней длинно-экспозиционной ОПФ (1). Таким образом, эта алгоритмическая технология позволяет повысить пространственное разрешение при одновременном увеличении пространственно инвариантного поля зрения системы ДЗЗ. Сложность практической реализации этой технологии обусловлена необходимостью изменения процесса детектирования изображений ДЗЗ и перехода от традиционного детектирования средних длинно-экспозиционных изображений стратегии ВЗН к стратегии выборочного детектирования мгновенных коротко-экспозиционных изображений ДЗЗ, независимых друг от друга по атмосферным искажениям.

Другая алгоритмическая технология повышения пространственного разрешения систем ДЗЗ, предложенная в [14], не требует изменения стратегии детектирования ВЗН и основана на последетекторной адаптивной фильтрации зарегистрированного длинно-экспозиционного изображения ДЗЗ, пространственно инвариантного к атмосферным искажениям. Проведенные исследования [15] данной алгоритмической технологии подтвердили эффек-

тивность алгоритма адаптивной фильтрации длинно-экспозиционного изображения по повышению его пространственного разрешения. При этом выигрыш в разрешении не превышает 2 раз, но может оказаться достаточным для улучшения пространственного разрешения отечественных данных ДЗЗ, равного сегодня 1 м, до зарубежного уровня пространственного разрешения данных ДЗЗ, равного 0,5 м.

Более эффективной, чем рассмотренные выше алгоритмические технологии, является рассматриваемая ниже новая алгоритмическая технология ДЗЗ, основанная на статистической обработке субизображений и их фрагментов одного коротко-экспозиционного изображения ДЗЗ, пространственно неинвариантного к атмосферным искажениям, апостериорном определении мгновенных ОПФ системы атмосфера–телескоп ДЗЗ для каждой области изопланатичности исходного изображения ДЗЗ, их использовании для последующей пространственной фильтрации соответствующих субизображений и сшивании результатов фильтрации для восстановления неискаженного атмосферой дифракционно ограниченного изображения зондируемого участка земной поверхности. Рассмотрим эту технологию.

Статистическая обработка субизображений и их фрагментов коротко-экспозиционного неизопланатичного изображения ДЗЗ

При дистанционном зондировании освещенных Солнцем участков земной поверхности распределение интенсивности спектрально-фильтруемого в полосе $\Delta\lambda < \Delta\lambda_A$, коротко-экспозиционного $\tau_{\Sigma} < \tau_A$ изображения объекта (участка земной поверхности) $I_{\Sigma}(\mathbf{I})$, если аддитивным шумом можно пренебречь, определяется интегралом суперпозиции вида

$$I_{\Sigma}(\mathbf{I}) = \int I_O(\mathbf{r})I_A(\mathbf{r}, \mathbf{I}) d\mathbf{r}, \quad (4)$$

где $I_O(\mathbf{r})$ — истинное распределение интенсивности объекта, а $I_A(\mathbf{r}, \mathbf{I})$ — мгновенный импульсный отклик системы атмосфера–телескоп (функция

размытия точки), $\Delta\lambda_A = \lambda/\sigma_\Theta$, а σ_Θ — среднеквадратичное отклонение атмосферных флуктуаций фазы Θ_A светового излучения.

В силу пространственной неинвариантности зарегистрированного изображения, функция $I_A(\mathbf{r}, \mathbf{I})$ является различной для разных точек \mathbf{r} объекта $I_O(\mathbf{r})$, что не позволяет применить теорему свертки теории Фурье-преобразований к выражению (4) и получить соответствующее его описание в пространственно-частотной области.

Для осуществления пространственной фильтрации полученного неизопланатичного изображения разбиваем его на N субизображений, соизмеримых с размером области изопланатичности системы атмосфера–телескоп, т. е. на N независимых областей, в пределах каждой из которых система пространственно инвариантна. Тогда для каждого j -го субизображения выражение (4) можно представить интегралом свертки

$$I_{\mathbf{I}}^j(\mathbf{I}) = \int I_O^j(\mathbf{I}) I_A^j(\mathbf{I} - \mathbf{r}) d\mathbf{r}, \quad (5)$$

где $j = 1, 2, \dots, N$ — индекс, указывающий на номер j -го субизображения и атмосферной реализации, принимавшей участие в формировании j -го субизображения.

Теперь при наличии пространственной инвариантности каждого субизображения, преобразуя обе части уравнения (5) по Фурье, получаем его описание в пространственно-частотной области в виде

$$|\tilde{I}_{\mathbf{I}}^j| \exp(i\tilde{\Theta}_{\mathbf{I}}^j) = |\tilde{I}_O^j| \exp(i\tilde{\Theta}_O^j) |\tilde{I}_A^j| \exp(i\tilde{\Theta}_A^j). \quad (6)$$

Здесь $|\tilde{I}_{\mathbf{I}}^j|$ — модуль пространственно-частотного спектра искаженного j -го субизображения, $|\tilde{I}_O^j|$ и $|\tilde{I}_A^j|$ — модуль пространственного спектра истинного j -го субизображения объекта и модуль ОПФ (оптической передаточной функции) системы атмосфера–телескоп j -го участка изопланатичности, $\tilde{\Theta}_{\mathbf{I}}^j$, $\tilde{\Theta}_O^j$, $\tilde{\Theta}_A^j$ — фазы соответствующих спектров и ОПФ системы атмосфера–телескоп.

Далее каждое субизображение разбиваем на M фрагментов, соответствующих числу элементов разрешения системы атмосфера–телескоп в пределах области изопланатичности.

По аналогии с (5) и (6) можно записать выражение для i -го фрагмента j -го субизображения

в виде

$$I_{\mathbf{I}}^{ij} = I_O^{ij} * I_A^j \quad (7)$$

и его пространственного спектра в виде

$$|\tilde{I}_{\mathbf{I}}^{ij}| \exp(i\tilde{\Theta}_{\mathbf{I}}^{ij}) = |\tilde{I}_O^{ij}| \exp(i\tilde{\Theta}_O^{ij}) |\tilde{I}_A^j| \exp(i\tilde{\Theta}_A^j). \quad (8)$$

Здесь $i = 1, 2, \dots, M$ — число фрагментов в области изопланатичности (субизображении), $|\tilde{I}_{\mathbf{I}}^{ij}|$ и $\tilde{\Theta}_{\mathbf{I}}^{ij}$ — соответственно модуль и фаза пространственного спектра ij -го фрагмента зарегистрированного изображения, $|\tilde{I}_O^{ij}|$ и $\tilde{\Theta}_O^{ij}$ — модуль и фаза пространственного спектра ij -го фрагмента истинного распределения интенсивности объекта, * обозначает операцию свертки, аналогичную (5). Далее обработку фазовой и амплитудной информации будем осуществлять отдельно.

1. Восстановление модулей мгновенных ОПФ-субизображений

Квадрат модуля пространственного спектра каждого ij -го фрагмента изображения определяется как

$$|\tilde{I}_{\mathbf{I}}^{ij}|^2 = |\tilde{I}_O^{ij}|^2 |\tilde{I}_A^j|^2. \quad (9)$$

Усредним эту величину по индексу i , т. е. найдем средний квадрат модуля пространственного спектра каждого фрагмента в пределах j -го субизображения:

$$\langle |\tilde{I}_{\mathbf{I}}^{ij}|^2 \rangle_i = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |\tilde{I}_{\mathbf{I}}^{ij}|^2 = \langle |\tilde{I}_O^{ij}|^2 \rangle_i |\tilde{I}_A^j|^2, \quad (10)$$

где $\langle \cdot \rangle = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M$ обозначает операцию усреднения.

Усредним теперь (9) по индексу j , т. е. усредним разные фрагменты по всем N субизображениям

$$\begin{aligned} \langle |\tilde{I}_{\mathbf{I}}^{ij}|^2 \rangle_j &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |\tilde{I}_{\mathbf{I}}^{ij}|^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |\tilde{I}_O^{ij}|^2 |\tilde{I}_A^j|^2 = \\ &= \langle |\tilde{I}_O^{ij}|^2 \rangle_j \langle |\tilde{I}_A^j|^2 \rangle_j. \end{aligned} \quad (11)$$

Функция $\langle |\tilde{I}_A^j|^2 \rangle_j$ представляет собой средний квадрат модуля ОПФ системы атмосфера–телескоп и в общем случае является известной для данных условий атмосферного видения [16]. Тогда,

осуществляя инверсную фильтрацию [17] $\langle |\tilde{I}_И^{ij}|^2 \rangle_j$, определяемого (11), получаем

$$\frac{\langle |\tilde{I}_И^{ij}|^2 \rangle_j}{\langle |\tilde{I}_А^{ij}|^2 \rangle_j} = \langle |\tilde{I}_О^{ij}|^2 \rangle_j. \quad (12)$$

Поскольку подавляющее большинство реальных протяженных объектов ДЗЗ статистически однородно [18], выполняется равенство

$$\langle |\tilde{I}_О^{ij}|^2 \rangle_j = \langle |\tilde{I}_О^{ij}|^2 \rangle_i = \langle |\tilde{I}_О^{ij}|^2 \rangle. \quad (13)$$

Подставляя полученную с учетом (12) и (13) величину $\langle |\tilde{I}_О^{ij}|^2 \rangle$ в (10), в результате инверсной фильтрации получаем квадрат модуля мгновенной ОПФ для j -й области изопланатичности (j -го субизображения)

$$\frac{\langle |\tilde{I}_И^{ij}|^2 \rangle_i}{\langle |\tilde{I}_О^{ij}|^2 \rangle} = |\tilde{I}_А^j|^2 \quad (14)$$

и, извлекая квадратный корень, получаем модуль мгновенной ОПФ системы атмосфера–телескоп для j -го субизображения

$$\sqrt{\langle |\tilde{I}_И^{ij}|^2 \rangle} = |\tilde{I}_А^j|. \quad (15)$$

2. Восстановление фаз мгновенных ОПФ-субизображений

Одновременно с модулем мгновенной ОПФ необходимо восстановить ее фазу. Легко видеть из (8), что

$$\tilde{\Theta}_И^{ij} = \tilde{\Theta}_О^{ij} + \tilde{\Theta}_А^j. \quad (16)$$

Для получения фазы мгновенной ОПФ сначала усредним фазы фрагментов, относящихся к одному субизображению, т. е. по i

$$\langle \tilde{\Theta}_И^{ij} \rangle_i = \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^M \tilde{\Theta}_И^{ij} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \tilde{\Theta}_О^{ij} + \tilde{\Theta}_А^j = \langle \tilde{\Theta}_О^{ij} \rangle_i + \tilde{\Theta}_А^j. \quad (17)$$

Далее, для того чтобы устранить в (17) среднюю фазу объекта, усредним (16) по j , т. е. просуммируем фазы фрагментов, относящихся к разным субизображениям:

$$\langle \tilde{\Theta}_И^{ij} \rangle_j = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N \tilde{\Theta}_И^{ij} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \tilde{\Theta}_О^{ij} + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \tilde{\Theta}_А^j. \quad (18)$$

Учитывая, что $\frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N \tilde{\Theta}_А^j = \langle \tilde{\Theta}_А^{ij} \rangle_j \equiv 0$ [19], и вычитая (18) из (17) с учетом статистической однородности объекта $\frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N \tilde{\Theta}_О^{ij} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \tilde{\Theta}_О^{ij}$, получаем

$$\langle \tilde{\Theta}_О^{ij} \rangle_i + \tilde{\Theta}_А^j - \langle \tilde{\Theta}_О^{ij} \rangle_j = \tilde{\Theta}_А^j. \quad (19)$$

3. Фильтрация субизображений и восстановление неискаженного атмосферой изображения зондируемого участка земной поверхности

Итак, мы восстановили модуль (15) и фазу (19) мгновенной ОПФ системы атмосфера–телескоп для j -го субизображения. Синтезируем его мгновенную ОПФ в виде

$$\tilde{I}_А^j = |\tilde{I}_А^j| \exp(i\tilde{\Theta}_А^j). \quad (20)$$

Осуществляя далее инверсную фильтрацию пространственного спектра j -го субизображения (6), получаем дифракционно ограниченный пространственный спектр j -го отфильтрованного субизображения объекта

$$\frac{\tilde{I}_И^j}{\tilde{I}_А^j} = \tilde{I}_О^j = |\tilde{I}_О^j| \exp(i\tilde{\Theta}_О^j) \quad (21)$$

и при обратном Фурье-преобразовании от него восстанавливаем неискаженное атмосферой дифракционно ограниченное субизображение j -го изопланатичного участка зондируемой земной поверхности

$$F^{-1}\{\tilde{I}_О^j\} = I_О^j. \quad (22)$$

Производя аналогичную обработку для всех N областей изопланатичности зарегистрированного коротко-экспозиционного изображения (4), восстанавливаем N субизображений вида (22), сшивая которые восстанавливаем неискаженное атмосферой дифракционно-ограниченное изображение зондируемого неизопланатичного объекта (участка земной поверхности) $I_О$.

В заключение заметим, что в случае когда исходное зарегистрированное изображение оказывается существенно искаженным аддитивными

шумами фона и регистрации, вместо инверсной фильтрации в (12), (14) и (21) необходимо осуществлять линейную винеровскую фильтрацию [20].

Таким образом, предложенный алгоритм обработки одного коротко-экспозиционного изображения, пространственно неинвариантного к атмосферным искажениям, позволяет решить как проблему «видения», так и проблему «изоплапатичности», обусловленные наличием турбулентности атмосферы. Алгоритм может быть эффективно использован для восстановления неискаженных атмосферой изображений протяженных участков земной поверхности при решении многих задач ДЗЗ сверхвысокого разрешения.

Список литературы

1. *Tsujinchi J.* Correction of optical images by compensation of aberrations and by spatial frequency filtering, in *Progress in Optics* / Ed. E. Wolf / North-Holland, Amsterdam, 1963, v. 2, p. 130.
2. *Fried D. L.* Varieties of isoplanatism // *Proc. of SPIE*, 1976, v. 75. P. 20. Imaging through the Atmosphere.
3. *Бакун П. А., Свиридов К. Н., Устинов Н. Д., Хомич Н. Ю.* Проблема изоплапатичности оптических систем, формирующих изображения через турбулентную атмосферу // *Оптика и спектроскопия*, 1986, т. 60, вып. 3. С. 611.
4. *Свиридов К. Н.* Технологии высокого разрешения оптических систем атмосферного видения. LAP (Lambert Academic Publishing), GmbH, 2015. ISBN 968-3-65969-676-3.
5. *Петри Г.* Российский спутник «Ресурс-ДК1»: альтернативный источник данных сверхвысокого разрешения // *Геоматика*, 2010, № 4. С. 38.
6. *Кирилин А. Н. и др.* Космический аппарат «Ресурс-П» // *Геоматика*, 2010, № 4. С. 23.
7. *Лавров В. В.* Космические съемочные системы сверхвысокого разрешения // *Геоинформационный портал ГИС-Ассоциации*, 2010, № 2.
8. *Fried D. L.* Optical Resolution through a Randomly Inhomogeneous Medium for Very Long and Very Short Exposures // *JOSA*, 1966, v. 56. P. 1372.
9. *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.
10. *Свиридов К. Н., Волков С. А.* Способ дистанционного зондирования Земли, заявка на изобретение № 2015129353 от 17.07.2014, заявитель — АО «Российские космические системы».
11. *Свиридов К. Н.* Дистанционное зондирование Земли с адаптивной компенсацией случайных наклонов волнового фронта // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2015, т. 2, вып. 3. С. 12.
12. *Свиридов К. Н.* Способ дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Патент РФ № 2531024 от 20.08.2014 по заявке на изобретение № 2013125540 от 03.06.2013, заявитель — АО «Российские космические системы».
13. *Свиридов К. Н.* О новом подходе к получению и обработке изображений ДЗЗ, искаженных турбулентной атмосферой // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2014, т. 1, вып. 4. С. 28.
14. *Свиридов К. Н.* Способ получения и обработки изображений, искаженных турбулентной атмосферой, заявка на изобретение № 2016100934 от 14.01.2016, заявитель — АО «Российские космические системы».
15. *Свиридов К. Н.* Адаптивная фильтрация изображений, искаженных турбулентной атмосферой // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2015, т. 2, вып. 4. С. 40.
16. *Korff D.* Analysis of a method for obtaining near-diffraction-limited information in the presence of atmospheric turbulence // *JOSA*, 1973, v. 63. P. 971.
17. *Harris J. L., Sr.* Image Evaluation and Restoration // *JOSA*, 1966, v. 56. P. 569.
18. *Cannon T. M.* Blind Deconvolution of Spatially Invariant Image Blurs with Phase // *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process.*, 1976, v. 24. P. 58.
19. *Бакун П. А., Свиридов К. Н., Устинов Н. Д.* О возможности восстановления неискаженного атмосферой изображения объекта по N его пятенным интерферограммам // *Оптика и спектроскопия*, 1981, т. 50, вып. 6. С. 1191.
20. *Hellstrom C. W.* Image Restoration by the Method of Least Squares // *JOSA*, 1967, v. 57. P. 297.