

Разработка блочно-программной системы для апостериорного анализа и восстановления мультиспектральных изображений¹

В.Н. Карнаухов*, В.И. Кобер*, М.Г. Мозеров*, П.А. Чочиа*

* *Институт проблем передачи информации, Российская академия наук, Москва, 127051, Россия*
Поступила в редколлегию 26.09.2018

Аннотация—Представлен прототип блочно-программной системы, позволяющей решать как основные задачи восстановления изображений, так и вспомогательные задачи этого процесса, включая анализ/диагностику изображений, генерацию баз данных синтезированных тестовых изображений. Разработанная система может работать как в режиме эмуляции всего процесса преобразования изображений: искажение – анализ – восстановление изображений (что позволяет настроить/обучить систему на конкретное устройство), так и в режиме анализа и восстановления искаженных изображений. Предложен метод оценки искажающего оператора по наблюдаемому искаженному изображению. Для определения типа искажающего оператора используется обучаемый алгоритм распознавания типичных операторов линейного искажения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: восстановление изображений, мультиспектральное изображение, оценка параметров искажающего оператора

ВВЕДЕНИЕ

При цифровой обработке многомерных данных часто возникает необходимость в восстановлении мультиспектральных искаженных изображений по наблюдаемым. Искажения могут быть обусловлены техническими характеристиками изображающих систем, движением регистрирующей камеры или объекта и т.д. Относительное движение камеры и регистрируемого объекта является основной причиной появления так называемого “смаза” на изображении — одного из самых неприятных дефектов регистрируемой видеоинформации. Искаженные изображения, как правило, не поддаются непосредственной интерпретации и требуют выполнения тех или иных операций устранения дефектов. Поэтому первым этапом цифровой обработки является восстановление неискаженного изображения по наблюдаемому искаженному.

Методы восстановления изображений, искаженных смазом, используются во многих приложениях, связанных с компьютерным зрением и обработкой изображений [1]. Методам цифрового восстановления изображений посвящено значительное количество исследований, в большинстве которых используется модель однородного линейного оператора [2],[3],[4],[5]. Модели неоднородного оператора, как правило, основываются на предположениях локальной однородности искажения, например, для моделирования линейного искажения на изображениях при кусочно-равномерном движении объектов сцены или камеры [6],[7],[8],[9]. Заметим, что качество восстановленного изображения, прежде всего, зависит от точности используемой математической модели искажающей системы, в частности, от точности задания параметров искажения, которые априори не известны. Поэтому первым шагом на пути решения задачи восстановления искаженных изображений является оценка параметров искажения. Этой задаче посвящено большое количество работ [5], [7]. Среди существующих методов оценки параметров искажающих операторов можно отметить кепстральные методы [10], [11], использующие

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00150)

спектральные характеристики искаженных изображений для оценки типа и параметров линейных искажений. Они достаточно просты, не требуют больших вычислительных затрат при реализации, однако весьма чувствительны к шуму. Другим интересным подходом к оценке параметров смаза искаженного изображения являются методы, использующие автокорреляционную функцию искаженного изображения [12],[13]. Смазанное изображение в этом случае рассматривается, как суперпозиция нескольких сдвинутых исходных неискаженных изображений, а автокорреляционная функция градиента искаженного изображения представляет собой прямую линию, проходящую через центр корреляционной плоскости; при этом направление и длина этой линии определяют параметры искажающего оператора.

В рамках настоящего исследования была разработана блочно-программная система, позволяющая решать как основные задачи восстановления изображений, так и вспомогательные задачи этого процесса, включая анализ/диагностику изображений, генерацию баз данных синтезированных тестовых изображений. Разработанная система может работать как в режиме эмуляции всего процесса преобразования изображения (искажение – анализ – восстановление) что позволяет настроить/обучить систему на конкретное устройство, так и в режиме анализа и восстановления искаженных изображений. Статья организована следующим образом: в разделе 1 описана модель формирования мультиспектрального изображения, искаженного линейным оператором; раздел 2 посвящен разработанному методу анализа и оценки параметров линейного смаза искаженного изображения; в разделе 3 представлена разработанная и реализованная в виде прототипа блочно-программная система анализа/диагностики и восстановления искаженных изображений, а в Заключение представлены выводы.

1. МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ИСКАЖЕННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Рассмотрим, прежде всего, модель формирования мультиспектрального изображения, которую будем использовать в рамках данной работы. Исходное мультиспектральное изображение $\{S(g, v, \lambda), \lambda = \lambda_1, \dots, \lambda_P\}$, где P — количество спектральных диапазонов, формируется некоторой совокупностью изображающих систем, каждая из которых характеризуется функцией рассеяния точки $H(x, y, g, v, \lambda)$ в соответствующем спектральном диапазоне, определяемом длиной волны электромагнитного излучения λ .

Для каждого из используемых спектральных диапазонов $\{\lambda_m, m = 1, \dots, P\}$ изображающая система формирует, используя соответствующий матричный фотоприемник, монохромное изображение $s(x, y, \lambda)$ по известному линейному закону, который с учетом длины волны электромагнитного излучения λ может быть записан как

$$s(x, y, \lambda) = \iint_{\Delta S} S(g, v, \lambda) H(x, y, g, v, \lambda) dg dv, \quad (1)$$

где ΔS — область исходного изображения, (g, v) — координаты точки в плоскости исходного изображения, (x, y) — координаты точки в плоскости регистрируемого изображения. При регистрации мультиспектрального изображения формируется совокупность из P монохромных изображений $\{s(x, y, \lambda), \lambda = \lambda_1, \dots, \lambda_P\}$, соответствующих используемым спектральным диапазонам.

В реальной жизни исходное изображение является непрерывным, и процесс его линейного формирования можно записать при помощи интегрального уравнения Фредгольма первого рода, которое в случае регистрации мультиспектрального изображения примет вид:

$$\iint_{\Delta S} S(g, v, \lambda) H_r(i, j, g, v, \lambda) dg dv = s(i, j, \lambda) + n(i, j, \lambda), \quad (2)$$

$$H_r(i, j, g, v, \lambda) = \iint_{A_{i,j}} \gamma(x, y, \lambda) H(x, y, g, v, \lambda) dx dy, \quad (3)$$

где $A_{i,j}$ — площадь (i, j) -го светочувствительного элемента, $n(i, j, \lambda)$ — ошибка преобразования (i, j) -ым элементом матричного приемника сигнала на длине волны λ (аддитивный шум сенсора), $\{i = 1, \dots, I\}$, $\{j = 1, \dots, J\}$ и $I \times J$ — размер изображения. Функция $\gamma(x, y, \lambda)$ определяет спектральную чувствительность элементов сенсора матричных фотоприемниках. Для реальных матричных фотоприемников эта функция может быть неодинаковой по полю датчика, однако она, как правило, задана производителем или ее можно измерить.

В данной работе мы ограничимся рассмотрением линейных, пространственно-инвариантных систем, когда формирование искаженных монохромных изображений $f_m(x, y)$ в спектральном диапазоне m описываются уравнением

$$f_m(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} s_m(\xi, \eta) h_m(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta + n_m(x, y), \quad (4)$$

где $h_m(x, y)$ — импульсная характеристика линейной изображающей системы в спектральном диапазоне m .

В области преобразования Фурье (при известных ограничениях на функции) это уравнение можно записать как

$$F(\omega_1, \omega_2) = S(\omega_1, \omega_2) H(\omega_1, \omega_2) + N(\omega_1, \omega_2), \quad (5)$$

где $F(\omega_1, \omega_2)$, $S(\omega_1, \omega_2)$, $H(\omega_1, \omega_2)$, $N(\omega_1, \omega_2)$ — Фурье-спектры соответствующих функций.

2. АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ИСКАЖАЮЩЕГО ОПЕРАТОРА ПО ИСКАЖЕННОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ

Одним из важнейших шагов в решении задачи восстановления искаженных изображений является диагностика типа и параметров искажения. Если известны характеристики изображающей системы, ее относительное положение и движение по отношению к объекту съемки, то возможно вычисление функции рассеяния точки. Однако на практике такие данные известны редко, и зачастую можно лишь предполагать класс операторов, описывающих дефекты наблюдаемого изображения, а конкретные параметры искажений, необходимые для формирования восстанавливающего оператора, должны быть оценены по наблюдаемому искаженному изображению. Актуальным в такой постановке является задача диагностики искажений и их параметров по наблюдаемому изображению, которая на данный момент остается недостаточно изученной. Ниже мы ограничимся вопросом диагностики линейных пространственно-инвариантных систем, описываемых уравнением типа свертки (4).

Спектры реальных исходных изображений $S(\omega_1, \omega_2)$ в (5), вообще говоря, не обладают какими-то специфическими свойствами [14], поэтому по их амплитудным спектрам можно сделать только самые общие заключения о характеристиках изображения [15],[16]. В то же время спектры искажающих операторов $H(\omega_1, \omega_2)$ существенно отличаются от спектров реальных изображений. Они имеют ряд особенностей, которые переносятся в спектры искаженных изображений $F(\omega_1, \omega_2)$, и которые можно использовать для диагностики вида и параметров искажающего оператора [17].

Искажающий оператор, имеющий эффективный размер R , в рамках модели (4), определяется ядром интегрального преобразования $h(x, y)$. В реальных задачах $h(x, y)$ — функция с конечным носителем, поэтому ядро $h(x, y)$ обращается в ноль при $(|x|, |y|) \geq R$. С другой

стороны, изображение реальной сцены является функцией, заданной на всей плоскости. На различии этих двух представлений — финитности передаточной функции и неограниченности изображения — и основаны дальнейшие рассуждения.

Согласно (5) амплитуда спектра искаженного изображения равна произведению амплитуд спектров исходного сигнала $s(x, y)$ и ядра преобразования $h(x, y)$ (если пренебречь шумом). Если апертура сглаживания пространственно ограничена, спектр искаженного изображения будет характеризоваться упорядоченным расположением нулей на плоскости (ω_1, ω_2) . Найдя закономерности расположения нулей спектра $H(\omega_1, \omega_2)$, можно определить тип и параметры искажающего оператора; для равномерного движения, описываемого однородным искажающим оператором, такими параметрами являются направление и величина сдвига.

Амплитуда спектра реального изображения быстро убывает с ростом ω . Для удобства анализа преобразуем амплитудный спектр изображения, используя операцию круговой эквализации, состоящую в следующем. Пространство спектра разбивается на множество колец $(R_i, i = 1, \dots, N_{\max})$ с радиусами ρ_i в диапазоне $\omega_i < \rho_i \leq \omega_i + \Delta\omega$ и центрами в точке $(\Omega/2, \Omega/2)$. Подсчитываются средние значения M_i элементов в кольце R_i ,

$$M(R_i) = \text{mean}(\omega_1, \omega_2) \mid (\omega_1, \omega_2) \in R_i \quad (6)$$

и для попадающих в него элементов выполняется следующее преобразование:

$$\text{Re}_{eq}(\omega_1, \omega_2) = \text{Re}(\omega_1, \omega_2) / M_i \quad (7)$$

для $(\omega_1, \omega_2) \in R_i$, где $\text{Re}(\omega_1, \omega_2)$ — значение амплитуды спектра в точке (ω_i, ω_2) .

В случае искажения изображения смазом вдоль какого-то направления, амплитуда спектра $\text{Re}(\omega_1, \omega_2)$ будет содержать близкие к нулю значения, располагающиеся в виде полос, проходящих в направлении, перпендикулярном направлению сдвига. Расстояния между полосами будут равны Ω/d , где Ω — размер изображения, а d — величина смаза. Для нахождения направления сдвига воспользуемся так называемым “кепстральным” преобразованием. Понятие “кепстр” определяется следующим выражением [18],[19]:

$$C_S(q) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \ln [S(\omega)]^2 e^{i\omega q} d\omega, \quad (8)$$

где $S(\omega)$ — амплитудный спектр анализируемого сигнала, а $C_S(q)$ можно толковать как энергетический спектр функции $\ln [S(\omega)]^2$. Как правило, кепстр используется для анализа одномерных сигналов [19] (например, акустических), но он применим и к двумерным сигналам. Кепстр неискаженного изображения будет представлять практически равномерный фон. В случае же изображения, искаженного смазом, в спектре которого присутствуют периодически расположенные полосы нулей, кепстр будет содержать множество значительно отличающихся по амплитуде элементов, выстроенных вдоль прямой линии, проходящей через центр. При этом указанная линия будет перпендикулярна полосам спектра, т.е. ее наклон будет совпадать с направлением смаза изображения. Такой сигнал легко обнаруживается путем анализа кепстра в полярных координатах (φ, r) усреднением значений кепстра вдоль радиуса r и отысканием значимого максимума по углу φ .

Сказанное выше проиллюстрировано на Рис. 1. Исходное неискаженное изображение (аэрофотоснимок) представлено на (а); на (б) — то же изображение, но искаженное линейным смазом размером 16 элементов, ориентированным под углом 112° ; на (в) показана круговая

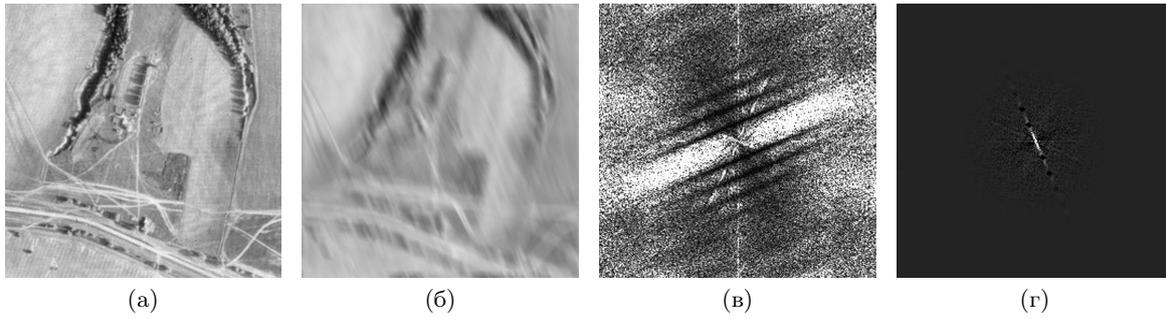


Рис. 1. (а) исходное изображение; (б) изображение, искаженное линейным смазом; (в) круговая эквализация спектра изображения (б); (г) кепстр сигнала (в).

эквализация спектра изображения (б); на (г) отображен кепстр Фурье-спектра (в). Найдя направления смаза φ , величина смаза находится путем определения эффективного периода полос на изображении выровненного Фурье-спектра (Рис. 1(в)). Для этого вычисляются средние значения яркостей по отрезкам, параллельным направлению полос:

$$\bar{c}(u) = \frac{1}{V_{\max} - V_{\min} + 1} \sum_{v=V_{\min}}^{V_{\max}} s(x_{u,v}, y_{u,v}), \tag{9}$$

где $x_{u,v}$ и $y_{u,v}$ находятся следующим образом: $x_{u,v} = v \sin \varphi + u \cos \varphi$ и $y_{u,v} = v \cos \varphi - u \sin \varphi$. После этого по массиву вычисленных $\bar{c}(u)$ период p полос находится как точка максимума:

$$p = \arg \max_{\delta_{\min} \leq \delta \leq \delta_{\max}} \left(\frac{1}{n} \sum_{n=1}^{n(\delta+1) < \Omega/2} (\bar{c}(n\delta + \delta/2) - \bar{c}(n\delta)) \right). \tag{10}$$

Получив значение периода p , и зная размер изображения Ω , вычисляется величина смаза d : $d = \Omega/p$. Проведенные эксперименты показали устойчивость и надежность описанного метода для диагностики параметров линейного искажающего оператора.

Качество восстановленного изображения зависит от точности математической модели искажающей системы, типа искажения и оценки характеристик искажающего оператора. Предлагаемый подход к анализу параметров линейного искажения состоит из двух процедур: для определения типа искажающего оператора применяется алгоритм распознавания, обучаемый на выборке типичных операторов линейного искажения, а для уточнения найденного вида искажения используется анализ множества нулевых точек модуля спектра искаженного изображения.

3. БЛОЧНО-ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА И ВОССТАНОВЛЕНИЯ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

При решении практических задач восстановления изображений возникает необходимость выбора из существующих методов восстановления искаженных изображений метода, оптимального для данной конкретной задачи и удовлетворяющего заданным критериям оценки качества восстановления, времени обработки и/или другим целевым критериям.

Выбор оптимального решения предполагает необходимость сравнения результатов решений разработанных и выбранных методов в соответствии с заданными критериями оценки качества. Этот процесс во многих случаях требует большого объема вычислительных затрат. Процесс исследования характеристик разработанных методов для различных классов изображений, исследования их свойств в зависимости от значений параметров используемой модели

изображающей системы и в зависимости от значений параметров алгоритмов восстановления также обычно требует большого объема вычислительных затрат. В рамках данного исследования была разработана блочно-программная система для апостериорного анализа и восстановления мультиспектральных изображений. Цель разработки этой системы — ускорение трудоемких процессов выполнения компьютерных экспериментов для исследования свойств разработанных методов восстановления изображений, а также сравнение существующих методов с разработанными.

Для реализации блочно-программной системы апостериорного восстановления мультиспектральных изображений была выбрана линейная модель. Основные функциональные элементы разработанной системы представлены блок-схемой прототипа данной системы, показанной на Рис. 2. Название каждого из основных представленных блоков системы соответствует его функциональной роли в системе. Входной блок осуществляет ввод исходных изображений в

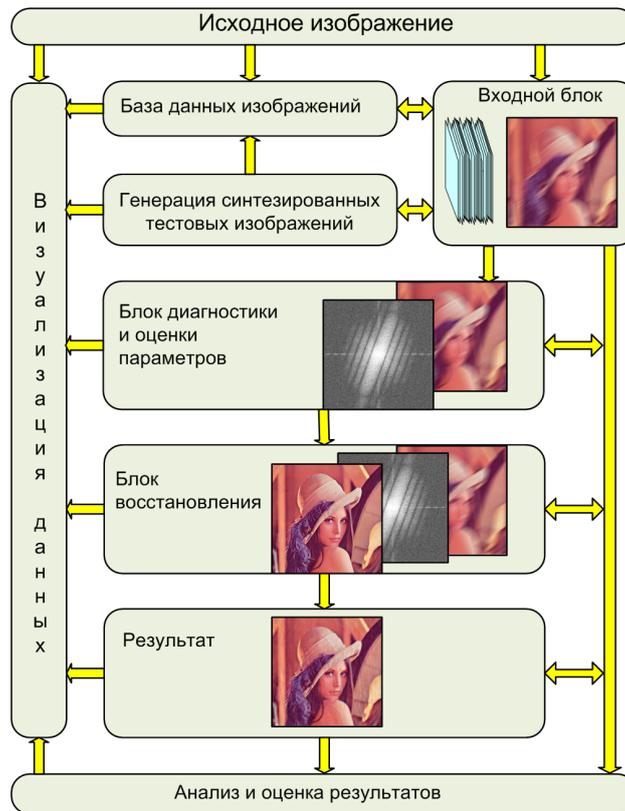


Рис. 2. Блок-схема системы анализа и восстановления мультиспектральных изображений.

систему. Система поддерживает пакетный режим обработки изображений. На вход системы может быть подано как одно исходное изображение, так и набор (произвольной длины) исходных изображений, определяемый списком файлов. Основные этапы обработки изображений в системе реализованы в виде конвейерного процесса, поэтому все изображения, представленные в списке входного блока, будут обработаны в соответствии с выбранной конфигурацией процесса обработки и в соответствии с выбранными значениями параметров обработки. Необходимость визуализации, сохранения, выбора используемой базы данных для хранения промежуточных и основных результатов обработки определяются на стадии выбора конфигурации процесса обработки.

На Рис. 3 представлено основное интерфейсное окно системы анализа и восстановления мультиспектральных изображений. Оно иллюстрирует визуализацию изображений на трех стадиях процесса обработки исходного изображения в системе: искаженное исходное изображение (справа), энергетический спектр исходного искаженного изображения (в центре) и результат обработки — восстановленное изображение (слева). Управление системой, конфигу-

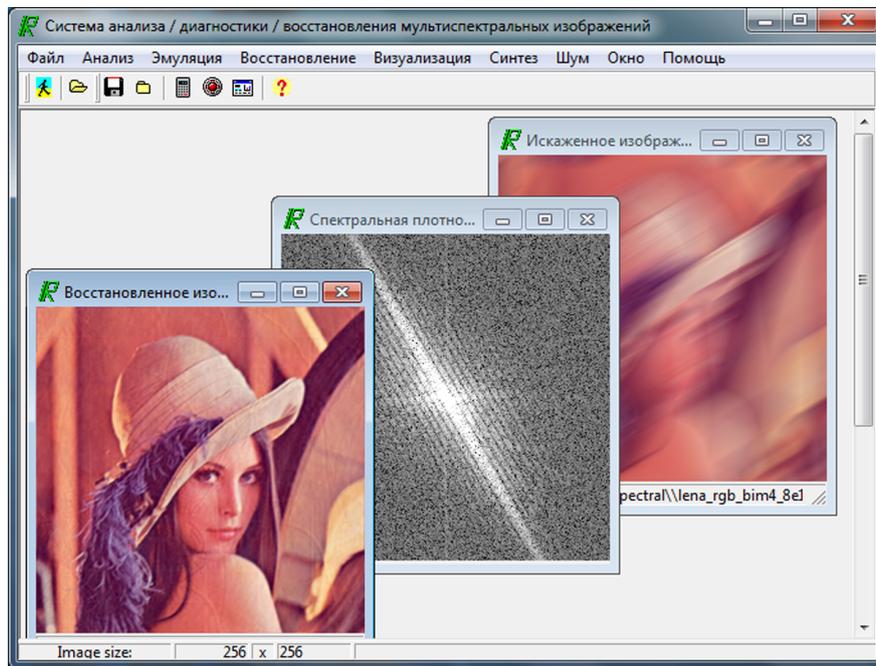


Рис. 3. Основное интерфейсное окно системы анализа и восстановления мультиспектральных изображений.

рирование процесса обработки и инициализация процесса обработки осуществляются с помощью соответствующих интерфейсных окон, которые вызываются с помощью основного меню системы, расположенного в верхней части основного интерфейсного окна.

В качестве примера на Рис. 4 представлено интерфейсное окно эмуляции процесса искажения изображения в изображающей системе и последующего его восстановления в разработанной системе. Для конфигурирования всех необходимых для процесса эмуляции данных, а также задания значений требуемых параметров, используется соответствующий раздел интерфейсного окна (переключатель). Это окно содержит пять основных разделов конфигурирования, представленных в виде переключаемых страничных интерфейсных объектов.

1. Формирование списка исходных изображений для конвейерной обработки.
2. Выбор типа и параметров искажения.
3. Выбор типа и параметров шума.
4. Выбор типа и параметров процесса восстановления.
5. Выбор необходимости визуализации и сохранения обработанных изображений в базе данных.

Как уже отмечалось выше, основные этапы обработки изображений в системе реализованы в виде конвейерного процесса. Поэтому этапы обработки, определяемые в разделах конфигурирования со второго по четвертый, могут быть выключены для исполнения путем выбора страниц “Нет” переключателей соответствующего страничного интерфейсного объекта. Так,

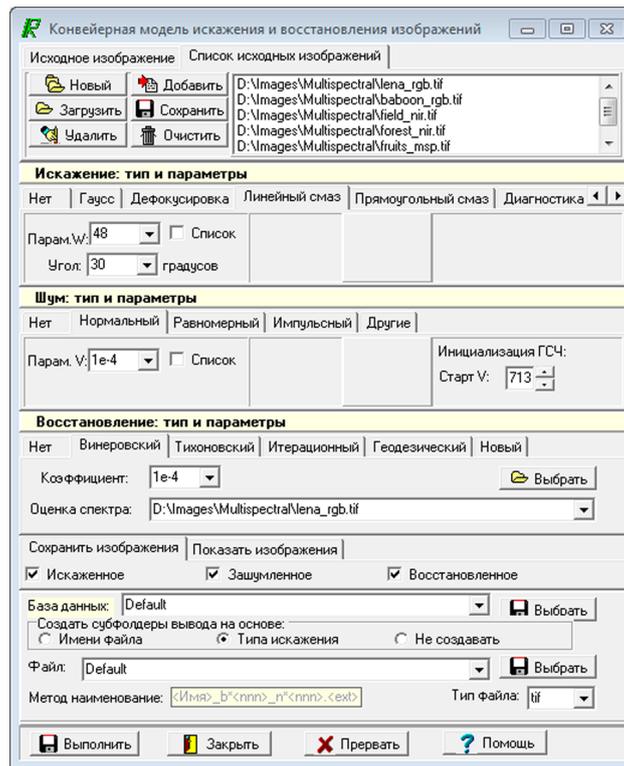


Рис. 4. Интерфейсное окно эмуляции процесса искажения изображения и его восстановления в разработанной системе.

например, если выбрана страница “Нет” третьего переключателя, то будет осуществляться моделирование процесса искажения и восстановления исходных изображений с использованием типа и параметров искажения, выбранного во втором переключателе, и метода и параметров восстановления, определенных в четвертом переключателе. При выборе страницы “Нет” для четвертого переключателя будет осуществляться только генерация искаженных изображений с использованием типа и параметров искажения, определенного во втором переключателе, и добавлением шума, тип и параметры которого определены в третьем переключателе.

В процессе разработки и исследования методов восстановления искаженных мультиспектральных изображений зачастую требуются наборы синтезированных искаженных изображений с заданными, точно известными характеристиками типа и параметров искажения. Такие изображения необходимы, например, для обучения подсистем диагностики типа и параметров искажения, для сравнения различных методов восстановления и др. Разработанная система обладает функциональными возможностями генерации больших объемов синтезированных изображений. Генерируемые синтезированные изображения будут сохраняться в базе данных изображений, определенной в пятом переключателе при конфигурировании процесса. Количество синтезированных изображений ограничивается только объемом дискового хранения используемой базы данных. Процедура определения значений параметров при конфигурировании процесса упрощена. Необходимо только определить минимальное и максимальное значения параметров и шаг их приращения или количество значений параметров при равномерном шаге их изменения от минимального до максимального значения.

Для добавления в систему новых функциональных возможностей, например, новых методов, типов искажений и шумов необходимо просто включить их в систему, а интерфейс прописать в переключателе соответствующего страничного интерфейсного объекта.

Авторы данной работы на протяжении многих лет проводят свои исследования в области цифровой обработки, анализа и восстановления изображений [6],[9]–[13],[20]. Разрабатываемые в ходе этих исследований авторами новые методы, алгоритмы и программные средства анализа и обработки изображений постоянно дополняют функциональные возможности системы. Разработанная система в сегодняшней конфигурации позволяет существенно сократить время разработчиков на проведение компьютерных экспериментов по исследованию разрабатываемых методов восстановления искаженных изображений и их сравнению с известными методами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен прототип блочно-программной системы анализа/диагностики и восстановления искаженных мультиспектральных изображений. Эта система может работать как в режиме эмуляции всего процесса преобразования изображений: искажение – анализ – восстановление, так и в режиме анализа и восстановления искаженных изображений. Система позволяет также осуществлять генерацию баз данных синтезированных тестовых изображений. Разработанная система в сегодняшней конфигурации позволяет существенно сократить время разработчиков на проведение компьютерных экспериментов по исследованию разработанных методов восстановления искаженных изображений и их сравнению с известными методами. Предложен и разработан метод оценки искажающего оператора по наблюдаемому искаженному изображению. Для определения типа искажающего оператора используется обучаемый алгоритм оценки вида и параметров типичных операторов линейного искажения изображений. Для оценки параметров искажения данный алгоритм использует энергетический спектр изображения, подвергаемый процедуре круговой эквализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yaroslavsky L. Digital holography and digital image processing: principles, methods, algorithms. Springer Science & Business Media, 2013.
2. Biemond, J., Lagendijk, R.L., Mersereau R.M. Iterative methods for image deblurring, *Proceedings of the IEEE*, 1990, Vol. 78, No 5, pp. 856–883.
3. Banham M., Katsaggelos, A. Digital image restoration, *IEEE Signal Processing Magazine*, 1997, Vol. 14, No.2, pp. 24–41.
4. Sroubek F., Flusser J. Multichannel blind iterative image restoration, *IEEE Trans. Image Process.*, 2003, Vol. 12, No. 9, pp. 1094–1106.
5. Yitzhaky Y., Kopeikai N.S. Identification of Blur Parameters from Motion Blurred Images. *Graphical Models and Image Processing*, 1997, vol. 59, No. 5, pp. 310–320.
6. Kober V., Karnaukhov V. Restoration of multispectral images degraded by non-uniform camera motion *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2015. V. 60. No. 12, P. 1366-1371.
7. Chakrabarti A., Zickler T., Freeman W.T., Analyzing spatially-varying blur, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2010, pp. 2512–2519.
8. Levin A., Weiss Y., Durand F., Freeman W.T. Understanding and evaluating blind deconvolution algorithms, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2009, pp. 1964-1971.
9. Karnaukhov V., Kober V. A fast preview restoration algorithm for space-variant degraded images *Proc. SPIE 9971, Applications of Digital Image Processing XXXIX*, 2016, pp. 99712W 7, doi: 10.1117/12.2236812.
10. Karnaukhov V., Kober V. Analysis of Linear Distortion Characteristics in Problems of Restoration of Multispectral Images *Journal of Communications Technology and Electronics* 2017, Vol. 62, No. 12, pp. 1464-1469. doi: 10.1134/S1064226917120063.

11. Karnaukhov V., Kober V. Blind identification of linear degradation operators in the Fourier domain *Proc. SPIE's 60 Annual Meeting; Conference: Applications of Digital Image Processing XXXVIII, 9-13 August 2015, San Diego, California, USA*, 2015. Vol. 9599. P. 95992I-7. DOI: 10.1117/12.2188481.
12. Karnaukhov V., Mozerov M. Restoration of multispectral images by the gradient reconstruction method and estimation of the blur parameters on the basis of the multipurpose matching model *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2016, Vol. 61, No. 12, pp. 1426-1431. doi: 10.1134/S106422691612010X.
13. Karnaukhov V., Mozerov M. Motion blur estimation based on multitarget matching model. *Optical Engineering*, 2016, Vol. 55, No. 10, pp. 100502X/1-4. doi: 10.1117/1.OE.55.10.100502.
14. Опшенхайм А.В., Лим Дж.С. Важность фазы при обработке сигналов. *ТИИЭР*, т. 69, № 5, 1981, С. 39–54.
15. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. М.: Мир. 1982.
16. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012.
17. Милюкова О.П., Чочиа П.А. Использование метрических и топологических характеристик изображения для диагностики искажений в задаче восстановления сигнала *Информационные процессы*, 2017, Т. 17, № 4, С. 236-244.
18. Michael Noll A. Cepstrum Pitch Determination *J. Acoustical Society of America*, vol. 41, no. 2, 1967, pp. 293-309.
19. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь. 1986. 512 с.
20. Karnaukhov V., Kober V. A correlation-based algorithm for detecting linearly degraded objects using noisy training images *Proc. SPIE 9971, Applications of Digital Image Processing XLI*, 2018, Vol. 10752. P. 1075220-1-8. doi: 10.1117/12.2319765.

Design of a block-software system for a posteriori analysis and restoration of multispectral images

Karnaukhov V., Kober V., Mozerov M., Chochia P.

A block-software system for analysis/diagnostics and restoration of blurred multispectral images is presented. The developed system can work both in the mode of simulation of all steps of image processing: blurring – analysis – restoration (which allows you to configure/train the system for a specific device), and in the mode of analysis and restoration of blurred images. This system can be also exploited for generation of image databases of synthesized test images. A method for estimating the blurring operator from the observed blurred image is proposed. To determine the type of the blurring operator, learning recognition algorithm for typical linear distortion operators is used.

KEYWORDS: image restoration, multispectral image, blur parameter estimation