Математическая обработка изображений системы дистанционного зондирования на базе электронно-оптического преобразователя

А.А. Ильин ¹, **А.Н.** Виноградов ², **В.В.** Егоров ³, **А.П.** Калинин ⁴, **А.И.** Родионов ¹

¹ НТЦ «Реагент», Москва, Россия
E-mail: ilyinandrey@mail.ru, arodionov@reagent-rdc.ru

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
E-mail: alexey@magn.ru

³ Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
E-mail: victor_egorov@mail.ru

⁴ Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия
E-mail: kalinin@ipmnet.ru

Решается задача математической обработки изображений, получаемых системой дистанционного зондирования, построенной по схеме: электронно-оптический преобразователь (ЭОП) — оптическая система переноса изображения — прибор с зарядовой связью (ПЗС) матрица — цифровое средство обработки изображения — дисплей. Особенностью реализованного подхода является оценка и обработка локальных участков изображения с разным временем экспонирования, что позволяет сохранить показатели локального контраста. Для уменьшения влияния дробового шума ЭОП были разработаны алгоритмы обработки последовательности поступающих кадров посредством усреднения сигнала, накопленного по нескольким кадрам с учетом движения носителя. Демонстрационные испытания показали эффективность разработанных алгоритмов.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, алгоритм, электронно-оптический преобразователь, прибор с зарядовой связью, обработка, корреляция, локальный контраст, дробовой шум, кадр.

Введение

При аэрокосмическом дистанционном зондировании Земли часто имеют место эффекты ухудшения качества получаемых изображений за счет малого динамического диапазона съемочной системы, а также влияния дробового шума. Они особенно сильно проявляются в условиях слабой освещенности зондируемой поверхности. Для регистрации оптического сигнала в таких случаях используют приборы, включающие электронно-оптический преобразователь (ЭОП) и фотоприемные матрицы. Отметим, что ЭОП имеет заметно более высокий динамический диапазон по сравнению с широко применяемыми приборами с зарядовой связью (ПЗС) или комплементарной металлооксидной полупроводниковой (КМОП) матрицей: около 60 дБ против 48 дБ у фоточувствительной матрицы. В результате этого попытка непосредственного воспроизведения изображения с экрана ЭОП при помощи видеокамеры может привести к существенному падению динамического диапазона результирующего изображения — будут потеряны детали «в тени» или детали ярких объектов в зависимости от выбора рабочей точки на кривой чувствительности камеры.

Кроме того, максимальная яркость локального участка экрана ЭОП может быть настолько велика, что соответствующие элементы ПЗС матрицы легко перейдут в состояние

перенасыщения с последующим «разливом» накопленного под действием света заряда на соседние фотоэлементы (так называемый blooming). Эффект может быть настолько ярко выраженным, что даже на ПЗС матрицах, снабженных технологией anti-blooming, изображение ярких объектов будет расплываться, что ведет к ухудшению разрешения. Ухудшение пространственного разрешения сенсора дистанционного зондирования (ДЗ) имеет место также при быстром относительном движении объекта и сенсора (появление так называемого «смаза» изображения).

Однако основной причиной ухудшения качества изображения, получаемого с экрана ЭОП, является значительная величина дробового шума (при определенных условиях освещения сцены).

Настоящая работа посвящена разработке методов и алгоритмов обработки изображения для систем ДЗ, построенных по схеме ЭОП – оптическая система переноса и усиления изображения – ПЗС матрица – цифровое средство обработки изображения – дисплей и предназначенных для расширения динамического диапазона, получаемых с помощью систем ДЗ изображений, уменьшения влияния дробового шума и снижения влияния эффекта смаза изображения.

Алгоритм расширения динамического диапазона

Расширение динамического диапазона необходимо для того, чтобы оптимально отобразить на дисплее видеосигнал с ПЗС-матрицы, содержащий максимальное количество деталей изображения, видимых на экране ЭОП. С целью расширения динамического диапазона изображения, а также для подавления ярких точечных источников (пересвет и расплывание ярких объектов) был реализован режим съемки с переменной выдержкой: один кадр экспонировался с длительной выдержкой для обработки сцены в целом и деталей «в тени», а следующий кадр формировался с существенно меньшим временем накопления для получения информации о ярких объектах сцены. Объединение двух таких изображений позволяет оптимальным образом отобразить хорошо и плохо освещенные области сцены.

Особенностью реализованного подхода является оценка и обработка локальных участков изображения. В отличие от широко применяемых методов, которые производят простое наложение двух изображений, полученных с разным временем экспозиции, по всему полю кадра, реализованный алгоритм производит поиск именно участков изображения, сигнал в которых достиг насыщения. Далее проводится восстановление данных на этих участках с использованием информации из кадра, полученного с меньшей выдержкой, с последующей коррекцией гистограммы. Это позволяет сохранить (и даже улучшить) показатели локального контраста, величина которого важна для задач обнаружения и распознавания объектов в поле зрения системы наблюдения.

Демонстрация работы алгоритма расширения динамического диапазона представлена на $puc.\ 1.$



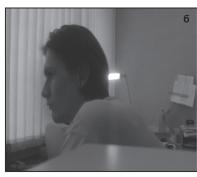




Рис. 1. Демонстрация процедуры и результативности применения алгоритма расширения динамического диапазона: а, б — изображения, полученные с большой и малой выдержкой; в — композитное изображение

Уменьшение влияния дробового шума ЭОП

С целью уменьшения влияния дробового шума ЭОП были разработаны алгоритмы математической обработки последовательности поступающих кадров, реализующие технологию подавления шума. Основой этих алгоритмов является усреднение накопленного сигнала по нескольким кадрам с учетом движения носителя прибора. Алгоритмы, основанные на усреднении изображения по нескольким кадрам (т.е. по времени), уже давно применяются в цифровых фотоаппаратах и видеокамерах (рис. 2).

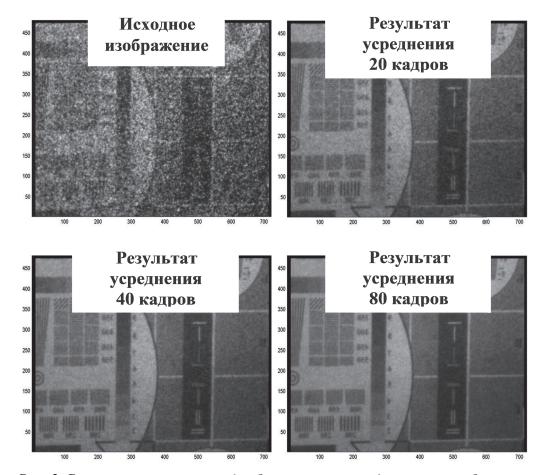


Рис. 2. Результат уменьшения дробового шума неподвижного изображения за счет усреднения нескольких кадров

Коренное отличие предлагаемого алгоритма — это полное отсутствие смаза изображения при плоскопараллельном движении области обзора прибора относительно зондируемой местности (Визилитер и др., 2010; Canty, 2007).

Фильтрация дробового шума при поступательном движении области обзора

Работа этого алгоритма происходит следующим образом. В память цифрового устройства обработки записывается и постоянно обновляется корректируемое изображение. Это изображение выводится на экран монитора. С приходом нового кадра от видеокамеры изображение в памяти обновляется. Обновление изображения осуществляется

следующим образом: корреляционным методом производится совмещение вновь пришедшего кадра и изображения, находящегося в памяти с учетом сдвига. На *рис. 3* поясняется вычисление сдвига изображения для двух последовательных кадров.

Далее с учетом вычисленного сдвига производится усреднение вновь пришедшего кадра и изображения в памяти с разными весовыми коэффициентами. Весовые коэффициенты подбираются программой так, чтобы максимально уменьшить шум (рис. 4).

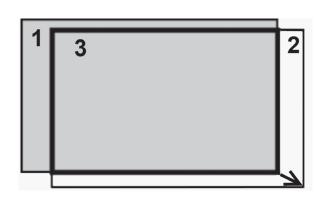


Рис. 3. Схема, поясняющая вычисление относительного сдвига изображения при поступательном движении носителя: 1 — предыдущий кадр; 2 — текущий кадр; 3 — область перекрытия кадров, по которой определяется сдвиг

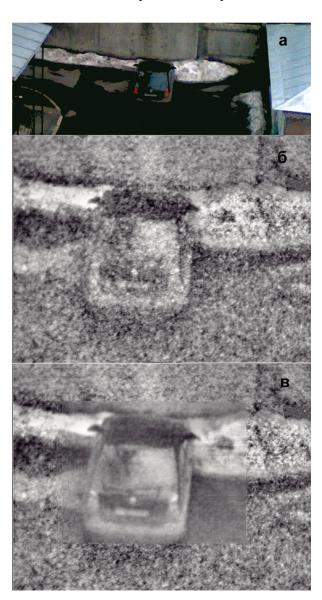


Рис. 4. Демонстрация работы алгоритма иумоподавления при поступательном движении области обзора: а – фотография исходной сцены; б – изображение на выходе ЭОП до фильтрации дробового шума; в – то же изображение после фильтрации

В этом алгоритме предлагается для четырех областей вычислять сдвиги между новым кадром и изображением, усредненным на предыдущем кадре. Изображение, полученное на предыдущем кадре, трансформируется на основании вычисленных сдвигов четырех областей (рис. 5). Далее трансформированное изображение используется для нового усреднения с вновь полученным кадром.

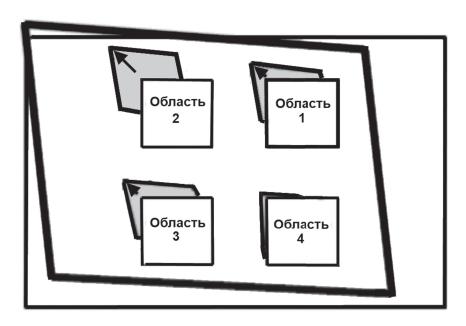


Рис. 5. Схема, поясняющая вычисление относительного сдвига и изменения масштаба изображения для четырех выделенных областей при 3D движении носителя

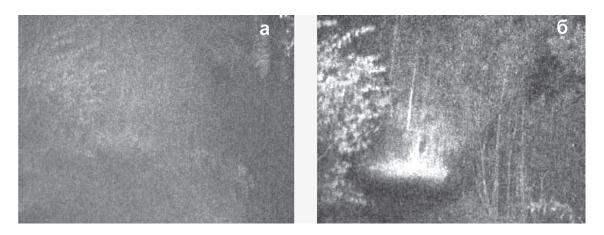


Рис. 6. Результат обработки видеозаписи, полученной при движении носителя на машине по лесной дороге: а – кадр без фильтрации дробового шума; б – кадр с фильтрацией

На *рис*. 6 показан эффект фильтрации дробового шума при произвольном 3D движении носителя.

В дополнение к описанным выше методам шумоподавления, отслеживающим перемещение объектов в поле зрения прибора для их лучшей обработки и устранения эффекта

смазывания при усреднении по времени, также реализована технология определения быстро движущихся объектов. Действительно, ведь быстро движущиеся объекты, а также объекты, только появившиеся в поле зрения прибора, не имеет смысла обрабатывать (проводить усреднение сигнала) — по ним просто нет временной статистики, а значит, и улучшения соотношения сигнал / шум на областях изображения, им соответствующих, ожидать не приходится. Попытка обработать подобные объекты методами на основе усреднения по времени часто приводит лишь к появлению дефектов на результирующем изображении. Технология определения движения позволяет выделить подобные объекты и своевременно отключить работу алгоритма шумоподавления для соответствующих участков изображения (но не всего кадра в целом!). Гибкая система настроек позволяет адаптировать эту технологию под конкретную задачу, определив «золотую середину» между уровнем шумоподавления и степенью деградации изображения на участках изображения, где присутствуют быстро движущиеся или внезапно появившиеся объекты.

Характеристики эффективности работы системы шумоподавления

Описанные выше алгоритмы шумоподавления позволяют существенно улучшить отношение сигнал / шум исходного изображения, обладая при этом малой величиной лага (задержкой вывода обработанного изображения). Технологии определения движения (Motion Detect, MD) и слежения за перемещением объектов способствуют достижению значительного снижения уровня шума при малом влиянии на качество отображения быстро движущихся объектов.

Методика измерения характеристик алгоритма шумоподавления

Пиковое отношение сигнал/шум (PSNR) измерялось путем накопления значений интенсивности в одной выбранной точке изображения (центр) по N = 25 последовательным кадрам с последующим расчетом по формуле (1):

$$PSNR = 20 \times \log \left(\frac{I_{\text{max}}}{\sigma} \right), \tag{1}$$

где $I_{\text{max}} = 255$ — максимальное значение 8-битного сигнала, σ — среднеквадратичное отклонение интенсивности в накопленной выборке.

Оценка быстродействия алгоритма проводилась посредством анализа временных диаграмм среднего значения интенсивности по небольшой квадратной области (10 х 10 точек) изображения. При этом динамическая сцена формировалась таким образом, чтобы в области измерения наблюдался периодический сигнал, соответствующий быстрому изменению яркости «черный – белый»: через диафрагму подавался световой импульс длительностью около 5 с. При включенном алгоритме шумоподавления изменение яркости обработанного изображения от максимума (источник света включен) до минимума (источник света выключен) хорошо описывается затухающей экспоненциальной функцией вида (2):

$$y = y_0 + A \cdot e^{-\frac{x}{\tau}} \tag{2}$$

Таким образом, рассчитывалось характерное время затухания τ , соответствующее времени, за которое сигнал затухает в e раз.

Также измерялось время, соответствующее изменению интенсивности от 90 до 10%.

Ввиду конечного времени интегрирования камеры, чрезвычайно сложно получить входной сигнал идеальной прямоугольной формы; причем времена нарастания и спада сигнала могут иметь вполне заметные величины. Поэтому также предлагается проводить измерения времени задержки спада сигнала после обработки на уровне 10% относительно входного, необработанного сигнала.

В связи с тем, что алгоритм шумоподавления производит анализ изображения с отслеживанием перемещения объектов, указанные времена показательны только для стандартизации измерения соотношения сигнал / шум, в то время как для абсолютной оценки степени деградации качества изображения динамической сцены их применение носит сомнительный характер.

Для сравнения измерения проводились как для сигнала не подверженного математической обработке, так и для сигнала, обработанного при помощи алгоритма шумоподавления, причем как с использованием технологии определения движения, так и без нее.

Ниже приведены данные, характеризующие эффективность алгоритмов шумоподавления.

Измеренные характеристики:

Улучшение соотношения сигнал/шум	до 25 раз (+6 дБ)
Лаг	< 0,1 с (1 кадр)
Время нарастания сигнала	< 0,1 c
Время спада сигнала: коэффициент затухания $ au$	< 0,6 c
Время перехода t 90-10%	< 1,1 c
Задержка по уровню 10%	< 0,8 c.

Не лишним будет также заметить здесь, что уровень развития современной вычислительной техники позволил реализовать вышеописанные алгоритмы, работающие в режиме реального времени. Алгоритмы написаны на языке программирования С.

Выводы

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Использование разработанного алгоритма расширения динамического диапазона изображений для систем с ЭОП и фотоприемной матрицей позволило существенно (до 12 дБ) увеличить его. Это позволяет сохранить (и даже улучшить) показатели локального контраста, величина которого важна для задач обнаружения и распознавания объектов в поле зрения системы наблюдения.

2. Предложенные алгоритмы шумоподавления для плоскопараллельного и при произвольном 3D движения носителя сенсора позволили существенно улучшить (6 дБ) качество получаемых изображений без потери разрешающей способности.

Литература

- 1. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Бондаренко А.В., Ососков М.В., Моржин А.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: Курс лекций и практических занятий. М.: Физматкнига, 2010. 672 с.
- 2. *Canty M. J.* Image analysis classification, and change detection in remote sensing: with algorithms for ENVI/IDL // CRC Press Taylor & Francis Group. 2007. 348 p.

Mathematical images processing for remote sensing system using the electron-optical image intensifier

A.A. Ilyin¹, A.N. Vinogradov², V.V. Egorov³, A.P. Kalinin⁴, A.I. Rodionov¹

¹ REAGENT Scientific Engineering Centre, Moscow, Russia E-mail: ilyinandrey@mail.ru, arodionov@reagent-rdc.ru ² M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia E-mail: alexey@magn.ru ³ Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia E-mail: victor_egorov@mail.ru ⁴ Ishlinsky Institute of Problems in Mechanics of RAS, Moscow, Russia E-mail: kalinin@ipmnet.ru

The problem of mathematical images processing for remote sensing system including electron-optical image intensifier- charge couple device (CCD)-digital image processing facility-display is solved. The peculiarity of used approach is estimation and processing of local image fragments with different exposition time. This permits to save the local contrast of image. In order to decrease the influence of electron-optical image intensifier shot noise the algorithms of processing for the frame sequence by means of averaging sequential frames taking into accounts carrier movement was developed. Demonstration tests showed its efficiency.

Keywords: remote sensing, algorithm, electron-optical image intensifier, CCD, processing, correlation, local contrast, shot noise, frame.