

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ЯРКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

САВКОВА Е. Н.

Белорусский национальный технический университет

Технологии обработки цифровых снимков широко применяются, например, в микроэлектронике (приемочный контроль микросхем), медицине (выявление определенных признаков объектов), астрономии (исследования блеска небесных светил), криминалистике (идентификация снимков) и других областях [1]. Созданные для этого программные продукты обработки изображений позволяют проводить исследования яркостных, цветовых, геометрических и других характеристик объектов, существенно сокращая время измерений и обеспечивая их высокую точность.

В зависимости от решаемых задач различают обработку изображений для улучшения качества их зрительного восприятия и обработку в устройствах автоматического анализа.

В обоих случаях обработка изображений направлена на улучшение их качества [2, с. 32]. Однако термин «улучшение качества» в каждом из случаев имеет свой смысл. Так, при приведении цифрового изображения к виду, наиболее «удобному» для визуального восприятия пользователя (просмотр рентгеновских снимков, технологии компьютерного дизайна, фотоиндустрии, геодезии), часть данных может быть утеряна, так как в этом случае сохранение второстепенных свойств оригинального изображения желательно, но не обязательно.

При подготовке изображений к визуальному анализу выделяют два этапа:

- предварительная обработка (в координатной или частотной области с учетом или без сохранения изображения и использованием линейных либо нелинейных алгоритмов);
- выделение определенных признаков, которые несут наибольшую информационную нагрузку (коррекции геометрических искажений, преобразования системы координат, масштабирования, видеоинтерполяции).

Если обработка изображений осуществляется с целью автоматического анализа его параметров, то на первый план выдвигаются задачи выделения исследуемых признаков и формирования данных об их количественных характеристиках. Методы обработки в этом случае должны учитывать закономерности взаимодействия электромагнитного излучения с отдельными участками изучаемой сцены. Целью же является извлечение количественной информации об исследуемом объекте. При осуществлении автоматического анализа выделяют этапы:

- запись регистрируемого изображения в память устройства;
- обработку снимков с задержкой во времени и определение значимых параметров (признаковое описание).

Если при обработке изображений учитывать метрологический аспект, а именно уровень адекватности отображения свойств реальных объектов их цифровыми изображениями, то разработчику необходимо решать следующие задачи:

- выбора цветового режима в используемой программе;
- построения физической модели объекта измерений;
- определения критериев качества изображений;
- проведения измерений параметров изображений.

В данной работе предлагается метод, использующий доступные аппаратные средства для измерений яркости локальных участков цифровых изображений на примере исследования снимков проекционного экрана, полученных при сертификационных испытаниях светового оборудования транспортных средств. Применение цифровой фотографии рассматривается как один из путей усовершенствования существующих методик проведения фотометрического контроля светового оборудования: фик-

сация изображения на ПЗС-матрице цифровой фотокамеры происходит в момент съемки, а обработка полученных снимков используется для выделения и анализа количественных признаков (яркости и цветности) объекта.

Результаты анализа цифровых снимков измерительного экрана со светораспределениями от источников (сигнального огня, фары) позволяют делать заключение о соответствии их фотометрических характеристик (яркости, пересчитываемой в единицы силы света) требуемым значениям.

В ОСТ 37.003.038–74, ГОСТ 9242–59, ГОСТ 3544–75, регламентирующих проведение фотометрического контроля, оговаривается, что «при проведении измерений допускается применять средства измерений, отличные от указанных, но не уступающие им по метрологическим характеристикам, влияющим на результат и точность измерений». Это дает основание полагать, что разрабатываемая методика проведения измерений яркости с использованием цифровой фотографии сможет найти применение в светотехнике.

Цифровые изображения как объект исследования в системе Matlab. В настоящее время наиболее распространенной и часто используемой для работы с графическими данными программой является Photoshop в различных версиях. Она имеет удобный интерфейс для пользователей различного уровня, множество установок в ней сделано авторами «по умолчанию», что в значительной степени облегчает работу операторов. Имеющийся набор фильтров и опций позволяет добиваться нужных эффектов на снимках, использование цветовых режимов дает возможность с определенной точностью оценить яркостные и цветовые характеристики изображений. Однако, с метрологической точки зрения, использование программы Matlab (MATrix LABoratory) позволяет получить более точное и корректное математическое описание свойств изображений. Работа в Matlab осуществляется в интерактивном режиме из командной строки: оператор должен четко представлять свою задачу с тем, чтобы в большей степени корректно производить необходимые преобразования и измерения видеоданных.

Пакет расширения Image Processing Toolbox 2.2.2 предназначен для работы в составе матричной системы Matlab 6.0 и насчитывает свыше 100 функций, обеспечивающих как осуществление рутинных математических расчетов, так и разработку собственных программных продуктов для работы с цифровыми изображениями.

При работе с графическими объектами необходимо установить тип изображения и выбрать координатную систему. В Image Processing применяются бинарные, полутоновые, цветные палитровые, полноцветные изображения, а также растровые и пространственные координатные системы [3]. При решении поставленной задачи мы имеем дело с полноцветными изображениями, которые удобно рассматривать в растровой координатной системе.

При проведении фотометрических измерений локальных участков изображений важной задачей является выбор цветового пространства, наиболее удобного для выделения яркостной составляющей излучения. В Matlab используется четыре цветовых режима: *RGB*, *HSV*, *YIQ*, *YCbCr*.

Система *RGB* (*red*, *green*, *blue*) имеет три компонента, каждый из которых несет информацию о яркости пиксела. Режим *HSV* (*hue* – цветовой тон, *saturation* – насыщенность, *value* – яркость) соответствует особенностям человеческого глаза в большей степени, чем *RGB*, однако описывает яркостную составляющую лишь «приблизительно», отвечает подбору цветов, которые используются художниками. Режим *YIQ* (*Y* – яркостная составляющая; *I* – цветовой тон; *Q* – насыщенность) является стандартом в США, Японии и многих других странах, использующих телевизионную систему NTSC. Цветовая система *YCbCr* (*Y* – яркость; *Cb* и *Cr* – цветоразностные составляющие) часто используется в цифровом видео и близка к системе SECAM, распространенной в России, странах СНГ, Франции и др.

Для проведения фотометрических измерений целесообразно использовать режим *YIQ* и/или *YCbCr*, позволяющий выделить информацию о яркости. Преобразования *RGB*–*YIQ* и *RGB*–*YCbCr* имеют вид [4]:

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ 0,596 & -0,274 & -0,322 \\ 0,211 & -0,522 & 0,311 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 65,481 & 125,553 & 24,966 \\ -37,797 & -74,203 & 112,0 \\ 112,0 & -96,786 & -18,214 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) позволяют рассчитать яркость каждого пиксела, принадлежащего выделенному участку изображения, с тем, чтобы на основании полученных данных производить дальнейшую обработку результатов.

Физическая модель объекта измерений. Рассмотрим процесс измерения яркости элементов полноцветного цифрового изображения. Пусть имеется снимок, произведенный цифровой фотокамерой. На нем представлено светораспределение от источника (например, сигнального огня или фары автомобиля), отображаемое на проекционном экране (рис. 1). Съемка должна производиться в условиях, отвечающих метрологическим требованиям ЕЭК.

В данном случае в качестве объекта измерений выступает не собственно проекционный экран, а его изображение, полученное на ПЗС-матрице камеры. Представим регистрируемую фотокамерой сцену как совокупность элементарных участков, самостоятельно излучающих и отражающих световые потоки энергии, падающие от других участков. Тогда энергию излучения элемента сцены можно выразить как функцию от собственной излучательности участка, коэффициента отражения и энергии излучения другим элементом сцены. Если на наблюдаемой сцене выделить «зону интереса», разбить ее на $N \cdot M$ фрагментов A_i , $i = 1, 2, 3; n - 1$, то получим так называемое n -мерное подпространство пространства излучательности i -го фрагмента. Следовательно, при выбранном масштабе W каждому выбранному участку зоны будет соответствовать определенный пиксел изображения. Полученная совокупность отсчетов яркости изображения и соответствующие им пространственные координаты точек образуют пространство образов, описывающее свойства реального объекта, находящегося в «зоне интереса». При проведении фотометрических измерений фар и фонарей объектом, помещенным в зону интереса, является образующийся на экране градиент яркости.

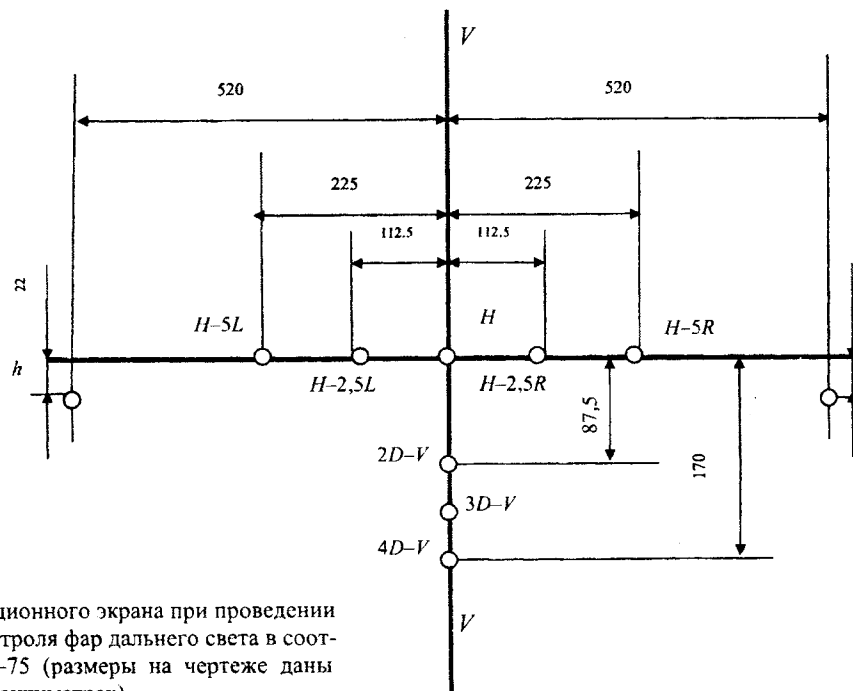


Рис. 1. Разметка проекционного экрана при проведении фотометрического контроля фар дальнего света в соответствии с ГОСТ 3544-75 (размеры на чертеже даны в сантиметрах)

Физическая модель объекта строится на следующих положениях:

- каждая контрольная точка экрана ($\varnothing 60$ мм) на изображении представляет собой некую ограниченную область с числом $N \cdot M$ элементов (пикселей);

- любой пиксел, принадлежащий выделенной области $N \cdot M$, обладает свойствами, аналогичными свойствам других элементов данного массива;

- в пределах выделенной области яркость и цветность представляют собой многократно воспроизводимые физические величины, т. е. каждую исследуемую область можно считать равнорным излучателем с определенными цветовыми характеристиками.

Критерии качества изображений. Качество изображения определяется большим количеством технических характеристик измерительной системы: соотношением сигнал/шум, статистическими характеристиками шума, градиционными, спектральными (цветовыми) параметрами, интервалами дискретизации; погрешностями метода, оператора и условий. Традиционный подход к качеству видеосистемы состоит в определении ее способности разрешать изображение штриховых миш с различными пространственными частотами (при идентичных условиях по контрасту и уровню освещенности приемника). Согласно критерию Джонсона [2, с. 99], одной из оценок качества изображений является область расстояний возможной идентификации объектов, которая рассчитывается из соотношения

$$R = \frac{f}{l} p, \quad (3)$$

где f – фокусное расстояние линзы; l – длина 13 элементов разложения матрицы ПЗС; p – размер области, в которой возможна идентификация объекта.

Применительно к системам цифровой регистрации изображений под качеством можно понимать количество достоверной информации, содержащейся в каждом отдельном кадре [5]. Специфика проведения фотометрических испытаний автомобильных фар и фонарей такова, что съемку измерительного экрана необходимо осуществлять в условиях низкой освещенности и с больших расстояний (для фар $\approx 10 \dots 30$ м), что значительно увеличивает уровень шумов на получаемых изображениях. Поэтому важными требованиями, предъявляемыми к качеству получаемых снимков, являются, во-первых, возможность выделения определенных признаков объектов (установление области расстояний R); во-вторых, «принадлежность» значений яркостных составляющих рабочей

области динамического диапазона матричного фотоприемника.

Нижняя граница параметра R определяется как минимальное расстояние от камеры до экрана, при съемке с которого в перспективу снимка попадает вся плоскость экрана. Верхняя граница определяется расстоянием, при котором измерения яркостных характеристик областей экрана еще возможны. На основании экспериментальных данных, для фар $R \approx 10 \dots 15$ м.

Для оценки и измерения динамического диапазона цифровых камер обычно осуществляют съемку серой шкалы при различных уровнях чувствительности и, варьируя диафрагму и освещение таблицы, получают начало потери светлого квадрата шкалы яркости в светлой части изображения с одновременным началом потерь элементов в темной части изображения. Если диапазона, предоставляемого таблицей, недостаточно для насыщения выходного сигнала, в схему эксперимента добавляют фильтр, затемняющий половину изображения, и крышку объектива с вырезанным отверстием [6].

Для оценки уровня шумов можно воспользоваться гистограммой. Методы исследования гистограмм опираются на то, что оптимальное, с точки зрения субъективного восприятия, изображение имеет нормальное распределение яркостей его элементов, и для удобства дальнейших расчетов применяется критерий нормального распределения значений яркости пикселей. По степени отклонения реального распределения яркостей от нормального проводится оценка качества изображения. Кроме количественной оценки качества изображения, данный метод позволяет получить информацию о наличии и весовом соотношении яркостных градаций изображения [6, 7].

Таким образом, критериями качества изображений были выбраны область расстояний и линейная зависимость измеряемого выходного сигнала от освещенности ПЗС-матрицы камеры. Так как при проведении испытаний светотехнического оборудования съемка осуществляется из одной и той же точки пространства (камера крепится на штативе), проблема обеспечения нужного масштаба и заданных значений параметра R решается автоматически. Рабочая область динамического диапазона оценивается для каждого конкретного вида фото- или видеокамеры.

Для оценки точности, например, расчета яркостных характеристик изображений может использоваться один из критериев, предлагаемых на сайте Консультационного центра Matlab <http://www.matlab.ru/imageprocess/book2/2.asp>, например:

- среднеквадратичная погрешность (mean square error)

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f(x, y) - \hat{f}(x, y)]^2, \quad (4)$$

где M, N – количество пикселей по горизонтали и вертикали исследуемого участка изображения; $f(x, y)$ – яркость i -го пиксела, принадлежащего выделенной области; $\hat{f}(x, y)$ – значение медианы;

- отношение сигнал/шум:

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{\left[\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f(x, y)]^2 \right]}{\left[\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f(x, y) - \hat{f}(x, y)]^2 \right]}. \quad (5)$$

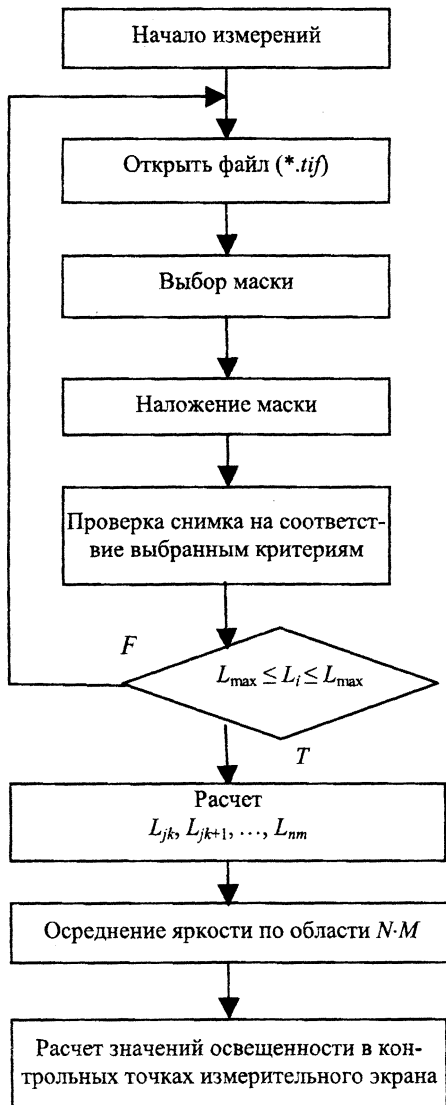


Рис. 2. Алгоритм проведения измерений

В программе Matlab предусмотрена функция подавления шумов изображений с помощью различных фильтров и применения вейвлет-технологии [4], однако возможность применения таких алгоритмов должна быть дополнительно обоснована.

Последовательность действий при измерениях яркости участков изображений приведена в виде алгоритма (рис. 2).

ВЫВОДЫ

1. Пакет расширения Image Processing Toolbox 2.2.2 системы Matlab благодаря разнообразию своих функций и возможностей является мощным средством исследования параметров цифровых изображений и может применяться для измерений их яркостных и цветовых характеристик. Алгоритмы, основанные на принципах дискретной геометрии, обеспечивают точность результатов измерений, превосходящую указанную в ГОСТ.

2. Рассмотрена возможность использования программы Matlab для решения задачи обработки цифровых снимков измерительного экрана при проведении фотометрического контроля светотехнического оборудования транспортных средств. Установлено, что математический аппарат Matlab в данном случае является эффективным инструментом, так как позволяет автоматизировать процесс измерений и обеспечивает необходимую точность результатов.

3. Критериями качества цифровых изображений в данном случае служат, во-первых, требования, обеспечивающие пригодность снимков для дальнейшей обработки, во-вторых, аналитические оценки погрешностей осреднения яркостных характеристик изображений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абламейко С. В., Лагуновский Д. М. Обработка изображений: Технология, методы применения. – Мн., 1999.
2. Системы технического зрения / А. Н. Писаревский, А. Ф. Чернявский, Г. К. Афанасьев и др. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 424 с.
3. Дьяконов В. MATLAB. Обработка сигналов и изображений: Спец. справ. – СПб., 2002. – 608 с.
4. Рудаков П. И., Сафонов В. И. Обработка сигналов и изображений: MATLAB 5x. – М., 1998. – 503 с.
5. Лебедев В. И., Золотой С. А. Оценка влияния разрешения сканера на точность определения координат объектов при дешифровании аэро- и космоснимков // Цифровая обработка изображений. – Мн., 2001. – Вып. 5. – С. 7–12.
6. Гуров А. А., Порфирьева Н. Н. Вопросы оценки контрастности сюжетных изображений // Труды ГОИ им. С. И. Вавилова. – Т. 44, вып. 178. – Л., 1979. – С. 31–34.
7. Цифровое преобразование изображений: Учеб. пособие для вузов / Р. Е. Быков, Р. Фрайер, К. В. Иванов, А. А. Манцетов. – М., 2003. – 228 с.