

## Секция 2

### ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 629.113.066.621.32:535

#### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАЛИБРОВКИ ЦИФРОВОЙ КАМЕРЫ ПРИ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ СВЕТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

д-р. физ.-мат. наук, профессор И.Е. Зуйков, ассистент Е.Н. Савкова  
Белорусский национальный технический университет

При сертификационных испытаниях светового оборудования транспортных средств в настоящее время применяются стандартные методы, которые опубликованы в международных, региональных или национальных стандартах, базирующиеся на измерениях освещенности в контрольных точках экрана посредством фоточувствительного элемента (фотометра, люксметра). Однако при разработке и внедрении лабораториями собственных «нестандартных» методов необходимо до их применения обеспечить подтверждение «правдивости» (обоснованности) результатов, что является всегда «равновесием между затратами, рисками и техническими возможностями» [1]. Разработка методики выполнения фотометрических испытаний светового оборудования автомобилей с применением цифровой фотографии предполагает использование современных технических и программных средств, позволяющих регистрировать изображения объектов, извлекать количественную информацию об их характеристиках и автоматизировать процесс измерений и обработки результатов. При этом основное требование, предъявляемое к цифровым изображениям, заключается в достоверности предоставляемых графических данных, обеспечивающих максимально возможное количество градаций яркости. Объектом съемки является световое распределение (градиент яркости) на проекционном экране, полученное в результате освещения его световым прибором (фарой, фонарем). В соответствии с физической моделью объекта измерений [2] каждой контрольной точке экрана соответствует область  $n \cdot m$  элементов на светочувствительной поверхности сенсора

камеры, а освещенность, формируемая на участке матрицы, находится усреднением по области  $n \times m$ . Для извлечения информации о яркостной характеристике каждого пикселя цветного изображения лучше всего подходят аппаратно-независимые цветовые режимы *Lab*, *YIQ*, *YCbCr* [2], с помощью которых снимаемый сигнал, измеряемый в относительных единицах, затем пересчитывается в единицы освещенности. Методика выполнения фотометрических измерений включает перечень процедур, связанных с калибровкой цифровой камеры, регистрацией и обработкой полученных изображений.

**Калибровка цифровой камеры.** В соответствии с СТБ 8014-2000 под калибровкой средств измерений следует понимать «совокупность операций, которые служат для установления при определенных условиях соотношения между показаниями измерительных приборов или измерительных систем или значениями величин, воспроизводимых материальной мерой или стандартным образцом, и соответствующими значениями величин, воспроизводимыми эталоном. Калибровка проводится для определения действительных значений метрологических характеристик и принятия владельцем решения об их применении». В нашем случае цифровая камера не рассматривается как средство измерений, а служит лишь инструментом для оцифровки изображений, однако термин «калибровка» может быть применен в контексте исследования технических параметров (*предварительный этап калибровки*) и установления соотношения между шкалами (*калибровка в процессе регистрации*). В настоящее время сертификация цифровых камер в Республике Беларусь *не является обязательной процедурой*, т. е. результаты и методы калибровки камер являются прерогативой и интеллектуальной собственностью производителей, а также зарубежных научно-исследовательских лабораторий, занимающихся сертификацией. Некоторые производители все же заявляют такие характеристики, как минимальная регистрируемая освещенность объекта, динамический диапазон, карта сбойных пикселей; однако в случаях если информация такого рода не декларируется, и учитывая специфику проведения фотометрических испытаний (условия слабой освещенности), можно решить проблему измерения параметров камеры самостоятельно. В этом случае калибровка осуществляется на этапе подготовки к сертификационным испытаниям светового оборудования транспортных средств и заключается в определении соот-

38

ветствия характеристик камеры требованиям, предъявляемым соответствующими нормативными документами, регламентирующими проведение испытаний [3, 4]:

1) спектральная характеристика должна соответствовать кривой видности дневного зрения стандартного наблюдателя;

2) количество «сбойных» пикселей минимальное (т. е. на светочувствительном поле матрицы не должно быть кластеров технологических дефектов);

3) линейность и ширина динамического диапазона, позволяющие фиксировать освещенность объекта в пределах: от 0,3 лк до 20 лк для фар ближнего света и от 4 лк до 240 лк для фар дальнего света (ГОСТ 3544-75);

4) высокий уровень пространственного разрешения;

5) хорошая светопередача;

6) широкий диапазон выдержек и фокусных расстояний с возможностью ручной настройки;

7) наличие форматов TIFF или RAW.

Методы калибровки (тестирования) камеры основаны на регистрации тест-объектов (испытательных таблиц, сгенерированных на видеотерминале изображений поверхностей, штриховых мир, участков безоблачного сумеречного либо предрассветного неба) с дальнейшей компьютерной обработкой цифровых изображений и сводятся к определению следующих параметров: месторасположения дефектов фоточувствительного поля матрицы (карты «сбойных» пикселей); линейности и ширины динамического диапазона; неравномерности чувствительности по полю изображения; уровня геометрических искажений. При этом используются светочувствительные приборы – фотометры, люксометры, яркомеры, фиксирующие параметры излучения тест-объектов. Для изображений, сгенерированных на видеотерминале, удобны в применении фотодатчики-«пауки», располагающиеся непосредственно на поверхности терминала. Снимая показания с датчиков и фиксируя отсчеты яркости в определенных участках цифровых изображений, строят калибровочные кривые, позволяющие измерить и оценить характеристики камеры. Результаты калибровки позволяют сделать заключение о пригодности камеры для проведения испытаний. Измерения светотехнических параметров источников излучения и калибровка камеры должны производиться в нормальных климатических

условиях в соответствии с ГОСТ 16962-71 и техническими условиями на цифровые камеры конкретного типа.

Второй шаг калибровки осуществляется *автоматически* непосредственно в процессе фотометрических испытаний светового оборудования, а именно: при каждом акте *регистрации*. Сущность метода заключается в том, что в формат кадра, по аналогии с методами цифровой астрономии, вводятся два источника-стандарта с известными фотометрическими характеристиками (например, светодиоды), которые крепятся на проекционном экране, что позволяет при обработке изображений автоматически рассчитывать значения их яркости в единицах цветовой системы *Lab*, повысить степень доверия к измерениям, обеспечить прослеживаемость результатов и произвести соотнесение шкал измерений (снимаемых сигналов с ПЗС-матрицы и световых единиц). Схема установки представлена на рис. 1. При разработке методики калибровки были сделаны некоторые допущения:

а) используемые для измерений изображения удовлетворяют поставленному условию – их яркостные показатели находятся в пределах рабочей области динамического диапазона камеры;

б) между значениями освещенности, создаваемой в контрольных точках экрана, и соответствующими им сигналами яркости, снимаемыми посредством обработки изображений, существует линейная зависимость;

в) поверхность измерительного экрана, на который проецируется световое распределение, соответствует требованиям ОСТ 19-32-83, техническим условиям на экраны конкретного типа и является *диффузно отражающей* (т. е. при фотосъемке условие совмещения положения камеры с осью фотометрического тела в *вертикальном* направлении не является обязательным).

Источники-стандарты должны удовлетворять требованиям соизмеримости с линейными размерами исследуемых областей ( $\leq 60$  мм) [3, 4] либо, если источники точечные (например, светодиоды), необходимо выполнение условия возможности распознавания их местонахождения камерой в соответствии с её пространственным разрешением, соответствия яркости источников линейному участку динамического диапазона ПЗС-матрицы камеры. Если размеры и форма источника все же не позволяют считать его точечным, то его яркость должна быть равномерно распределена по поверхности. В качестве источника сплошного спектра излуче-

ния может быть выбран стандартный источник света с заданной цветовой температурой, для получения монохроматического излучения – светодиод, монохроматоры и др. (ГОСТ 28953-91), при этом могут применяться ослабители. Математическая модель калибровки камеры в процессе регистрации строится на соображениях, что освещенность, формируемая на  $n$ -м участке ПЗС-матрицы находится из соотношения [5]

$$E_n = \frac{1}{4} \cdot \frac{\rho\tau}{F^2} \cdot E_i,$$

где  $\rho$  – коэффициент отражения экрана;

$\tau$  – коэффициент пропускания объектива;

$F$  – параметр, характеризующий отношение фокусного расстояния к апертуре объектива;

$E_i$  – освещенность на  $i$ -м участке проекционного экрана.

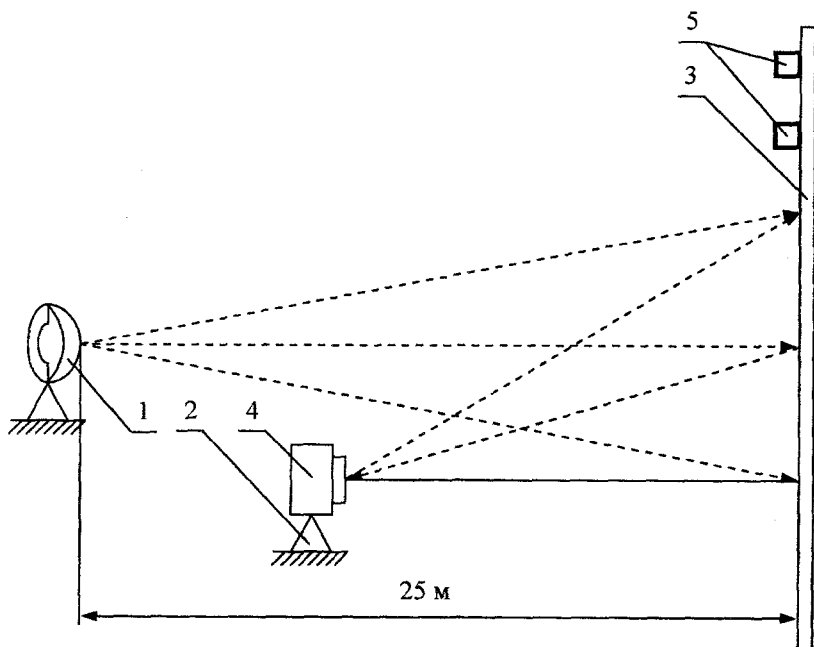


Рис.1. Схема установки для фотометрического контроля автомобильных фар:

1 – источник излучения (фара); 2 – держатели; 3 – проекционный экран; 4 – цифровая фотокамера; 5 – источники-стандарты

Тогда освещенность, создаваемая в  $i$ -й области проекционного экрана, находится по формуле

$$E_i = \frac{4F^2}{\rho\tau} E_n. \quad (1)$$

Очевидно, что сигнал  $L_n$ , снимаемый программными средствами с каждого  $n$ -го участка изображения, соответствующий некоторому числовому значению от 0 до 100 по шкале  $La^*b^*$ , прямо пропорционален  $E_n$ :

$$L_n = \mu \cdot E_n,$$

где  $\mu$  – коэффициент, учитывающий характеристики камеры (время экспозиции) и метод преобразования изображения из аналогового в цифровое; находится экспериментально.

При фотосъемке важным параметром является экспозиция, которая может быть определена как

$$H = E \cdot t,$$

где  $t$  – время облучения ПЗС-матрицы камеры (выдержка).

Если имеются два снимка, выполненные с различными экспозициями  $H_1 = E_1 \cdot \Delta t_1$  и  $H_2 = E_2 \cdot \Delta t_2$ , то  $H_2 = k \cdot H_1$ . Для расчета неизвестного значения освещенности  $E_2$  справедливо выражение, позволяющее рассчитывать параметры снимков, выполненных при различных выдержках.

Установка для крепления камеры должна быть сконструирована таким образом, чтобы при нормальном использовании обеспечивать фиксированное положение камеры в пространстве и исключение вибраций и толчков камеры, которым она может подвергаться при осуществлении съемки. Конструкция измерительной установки должна исключать влияние засветок от посторонних источников света. Калибровка цифровой камеры сводится к определению значений освещенности  $E_n$ , создаваемой на  $n$ -м участке светочувствительного поля сенсора камеры, по величинам снимаемых сигналов яркости  $L_n$  с этого же участка и коэффициента корреляции  $w$  между шкалами  $E_n$  и  $L_n$ . Освещенность на  $n$ -м участке ПЗС-матрицы камеры находится из выражения

$$E_n = (L_n - L_0) \cdot w + E_{01(02)}, \quad (2)$$

где  $L_0$  – отсчет яркости одного из «впечатанных» источников-стандартов в единицах цветовой шкалы  $La^*b^*$ ;

$E_{01(02)}$  – освещенность, создаваемая на ПЗС-матрице одним из впечатанных источников.

Коэффициент  $w$  находится из соотношения

$$w = \frac{E_{01} - E_{02}}{L_{01} - L_{02}}, \quad (3)$$

где  $E_{01}, E_{02}$  – значения освещенности на матрице от первого и второго источников-стандартов соответственно;

$L_{01}, L_{02}$  – значения яркости первого и второго источников-стандартов, измеренные в единицах цветовой шкалы  $La^*b^*$ .

Если при расчетах (3) получается величина с отрицательным знаком, следовательно, освещенность искомой области меньше значения  $E_{01(02)}$  на эту величину. В свою очередь значения освещенности от источников могут быть рассчитаны по формулам:

$$E_{01} = \frac{\tau}{F^2} \cdot \frac{I_{01}}{\cos \alpha_{01}}; \quad E_{02} = \frac{\tau}{F^2} \cdot \frac{I_{02}}{\cos \alpha_{02}}, \quad (4)$$

где  $I_{01}$  и  $I_{02}$  – известные значения силы света первого и второго источников соответственно.

Тогда подставляя (4) в (2), получим

$$E_n = (L_n - L_{01}) \cdot \frac{\frac{\tau}{F^2} \left( \frac{I_{01}}{\cos \alpha_{01}} - \frac{I_{02}}{\cos \alpha_{02}} \right)}{L_{01} - L_{02}} + E_{01}. \quad (5)$$

Подставив (5) в (1), получим математическую модель калибровки камеры в процессе регистрации:

$$E_i = \frac{4F^2}{\rho\tau} \left( (L_n - L_{01}) \frac{\frac{\tau}{F^2} \left( \frac{I_{01}}{\cos \alpha_{01}} - \frac{I_{02}}{\cos \alpha_{02}} \right)}{L_{01} - L_{02}} + \frac{\tau}{F^2} \frac{I_{01}}{\cos \alpha_{01}} \right).$$

Характеристики метода. Представленный метод разработан для внутривлабораторного применения, основывается на сличении с результатами, полученными с помощью других методик (применяющих люксметры и фотометры), и оценке неопределен-

ности результатов на основании объяснения теоретических принципов метода и практического опыта работы с ними. Точность метода в соответствии с СТБ ИСО 5725-1-2002 определяется правильностью и прецизионностью измерений. Правильность касается близости между средним математическим значением большого числа результатов испытаний и источником или принятым эталонным значением. Прецизионность касается близости между результатами испытаний и находится под влиянием четырех основных факторов: времени между двумя последовательными измерениями; калибровки (производилась ли калибровка между двумя измерениями); оператора (один или несколько); оборудования (одно и то же или различное). В зависимости от сочетания и соотношения изменяющихся перечисленных факторов осуществляют их анализ. Для оценки правдивости и приемлемости результатов необходимо выполнить минимум два снимка каждого вида (МИ 2091-90).

В процессе эксперимента было установлено, что не все снимки подлежат цифровой обработке, так как могут не удовлетворять предъявляемым требованиям. Для решения данной проблемы на предварительном этапе необходимо производить их выбраковку, которая сводится к определению некоторых реперных точек, по отношениям значений яркости в которых и будет осуществляться проверка. Так, например, в соответствии с Правилами №1 ЕЭК ООН, в точках экрана 25L и 25R освещенность для фар ближнего света должна быть не менее 2 лк, а в точке 50R – не менее 6, 12, 8 лк для различных типов фар. Данное условие может быть использовано при проверке снимков. Если учесть пропорциональность измеряемых величин  $E_i$  и  $L_n$ , то справедливо выражение

$$\frac{E_{50R}}{E_{25L(R)}} = \frac{L_{n1}}{L_{n2}},$$

где  $E_{50R}$ ,  $E_{25L(R)}$  – значения освещенности в точках 50R и 25L (25R) в соответствии с Правилами ЕЭК ООН;

$L_{n1}$ ,  $L_{n2}$  – значения яркости соответствующих областей на снимках.

Например, если  $\frac{E_{50R}}{E_{25L(R)}} \geq 3$ , то  $\frac{L_{n1}}{L_{n2}} \geq 3$ .

Таким образом, выбраковка снимков на этапе предварительной обработки заключается в проверке каждого изображения на соот-

ветствие условию пропорциональности яркостных характеристик в выбранных реперных точках.

**Выводы.** Использование цифровой фотографии в области фотометрического контроля светового оборудования транспортных средств рассматривается как альтернативный метод проведения сертификационных испытаний для внутрилабораторного применения. Данный метод может быть реализован при условии соответствия технических и программных средств определенным требованиям, регламентированным нормативными документами. В случае если производителями цифровых камер конкретного типа не заявляются технические характеристики, знание которых необходимо для выполнения измерений, камера может быть подвергнута тестированию, осуществляемому на первом этапе калибровки.

Второй этап калибровки, заключающийся в регистрации двух источников-стандартов, «впечатанных» в перспективу снимка, и приведении снимаемых с ПЗС-матрицы камеры сигналов к системе световых единиц в соответствии с предложенной математической моделью, обеспечивает прослеживаемость результатов измерений и степень доверия к ним.

#### **Использованные источники**

1. СТБ ИСО/МЭК 17025-2001. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.
2. Савкова, Е.Н. Метрологические аспекты измерений яркостных характеристик цифровых изображений // Вестник БНТУ. – 2005. – №1. – С. 45.
3. ГОСТ 3544-75 (СТ СЭВ 3045-81, СТ СЭВ 3822-82). Фары дальнего и ближнего света автомобилей.
4. ГОСТ 10984-74 (Правила ЕЭК ООН № 6, 7, 23, 38, 50). Фонари внешние сигнальные и осветительные механических транспортных средств, прицепов и полуприцепов. Световые и цветовые характеристики. Нормы и методы испытаний.
5. Уваров, Н.Е. Секреты высокой чувствительности телевизионных камер // Алгоритм безопасности. – 2002. – №6. – С.28-32.