



УДК 628.987

Н. В. Ершова

Санкт-Петербургский государственный университет кино и телевидения

## Мониторинг городского уличного освещения с борта летательного аппарата с использованием фотокамеры

*Рассмотрены подходы к проведению мониторинга городского уличного освещения с использованием фотокамеры, размещенной на борту летательного аппарата, в частности беспилотного. Основное внимание уделено постановке задачи и оценке возможности применения цифрового зеркального фотоаппарата для измерений нормативных параметров уличного освещения.*

### Уличное освещение, фотокамера, летательный аппарат

Уличное освещение является одной из важнейших составляющих городской инфраструктуры, которая обеспечивает жизнедеятельность, безопасность и комфортность городской среды в темное время суток.

Действующие в настоящее время в нашей стране нормативы для уличного освещения определены в документе [1]. Основными нормируемыми величинами являются средняя горизонтальная освещенность и яркость дорожного покрытия, определенные для всех возможных видов городских территорий. Следует учитывать, что эти нормы базируются на результатах исследований, которые были проведены в середине прошлого века и относились к источникам света, характерным для того времени, – лампам накаливания, дуговым ртутным и натриевым лампам, при этом в основу были положены эксперименты по фотометрии дневного зрения. Сегодня все чаще для освещения улиц применяются светодиодные светильники, спектр излучения которых отличается от спектра всех традиционных источников большим смещением в коротковолновую область [2]. Кроме изменений, происходящих в технологиях освещения, уточняется описание физиологических механизмов зрительного восприятия для повышения адекватности нормативных требований. Международная комиссия по освещению в последние годы проводит работу, целью которой является учет в международных нормах особенностей мезопического (сумеречного) зрения [3], действующего в условиях яркостей 0.1...10 кд/м<sup>2</sup>. Именно такой диапазон яркостей в основном соответствует ус-

ловиям работы зрения, определенным в [1]. Эти факты позволяют полагать, что и отечественные, и международные нормы уличного освещения будут в ближайшем будущем подвергнуты ревизии.

Совокупность осветительных установок уличного освещения – фонарей создает поле освещенности  $E(x, y)$  подстилающей поверхности, которое для  $M$  фонарей может быть рассчитано как

$$E(x, y) = \sum_{m=1}^M E_m(x, y) = \sum_{m=1}^M I_m(x, y) \frac{\cos \Omega_m(x, y)}{r_m^2(x, y)}, \quad (1)$$

где  $E_m(x, y)$  – освещенность в точке с координатами  $x, y$ , создаваемая  $m$ -м фонарем уличного освещения;  $I_m(x, y)$  – сила света от  $m$ -го фонаря в направлении точки с координатами  $x, y$ ;  $\Omega_m(x, y)$  – угол между направлением на  $m$ -й фонарь из точки с координатами  $x, y$  и нормалью к подстилающей поверхности в этой точке;  $r_m(x, y)$  – расстояние между  $m$ -м фонарем и точкой с координатами  $x, y$ . В выражении (1) фонарь уличного освещения рассматривается как точечный источник излучения, поскольку линейный размер излучающей поверхности много меньше высоты над подстилающей поверхностью.

При эксплуатации городского уличного освещения требуется постоянный мониторинг состояния квартального и уличного освещения; освещения магистралей и архитектурно-художественной

подсветки; освещения парков, садов и скверов; для оперативной организации капитального ремонта, эксплуатации и энергоснабжения. Сети уличного освещения в крупных городах насчитывают сотни тысяч осветительных установок [4]. Прямые измерения освещенностей, создаваемых осветительными установками, проводимые традиционно с помощью люксметра, является весьма трудоемкими и не соответствующими современному уровню требований к городскому уличному освещению. Поэтому задача оперативного контроля фактического состояния городского уличного освещения не всегда решается с должным уровнем качества. Надо также принять во внимание, что все уже действующие осветительные установки городов созданы в соответствии с нормами, которые уже сегодня признаны устаревшими и подлежащими пересмотру. Поэтому мониторинг уличного освещения с помощью современных, более производительных технических средств становится весьма актуальным.

В связи с этим представляет несомненный интерес работа в области автоматизации измерений яркости дорожного покрытия, выполненная специалистами Всероссийского научно-исследовательского светотехнического института им. С. И. Вавилова [4]. На основе видеофотометра LMK-5 производства компании "TechnoTeam Bidverarbeitung GmbH" создана мобильная светотехническая лаборатория, позволяющая выполнять измерения светотехнических параметров установок всех видов наружного освещения. Размещение измерительного оборудования на автомобиле предопределяет преимущества и недостатки подхода: с одной стороны, производительность мобильной светотехнической лаборатории намного выше, чем производительность измерений вручную, с другой – она совершенно недостаточна для оперативного контроля уличного освещения большого города.

Примером иного подхода, позволяющего резко снизить трудоемкость контроля уличного освещения, является проведение мониторинга с борта вертолета, которая была предложена компанией "ALTILUM" (Франция) [5].

Сбор данных производится с высоты около 1000 м при облете обследуемой зоны на вертолете, на борту которого размещен цифровой зеркальный фотоаппарат. В процессе облета получают совокупность из  $N$  снимков подстилающей поверхности, которые покрывают всю площадь обследуемой зоны. Результатом проведения измерений является совокупность измеренных значе-

ний яркости светового излучения подстилающей поверхностью  $L_k(x, y, \alpha_k, \beta_k)$ , где  $k = \overline{1, N}$  – номер кадра измерений;  $\alpha_k, \beta_k$  – соответственно, полярный и азимутальный углы между нормалью к наблюдаемому элементу подстилающей поверхности и направлением на фотокамеру для  $k$ -го кадра.

Для полноты описания  $L_k(x, y, \alpha_k, \beta_k)$  требуются координаты приемника и источника, а также углы ориентации фотокамеры, которые получают от бортовой навигационной системы и от датчиков подвеса фотокамеры. Данный способ не позволяет измерить непосредственно значения освещенностей, создаваемых уличным освещением. Измеряемой величиной является яркость  $L_k(x, y, \alpha_k, \beta_k)$ , она является не нормируемой наклонной яркостью, а яркостью излучения подстилающей поверхности в направлении, близком к нормали этой поверхности. Для перехода от измеряемой яркости к нормируемой освещенности необходимо учесть свойства рассеяния покрытия подстилающей поверхности. Для рассматриваемых условий наблюдения подстилающую поверхность, сформированную естественными и искусственными материалами, такими, как асфальт, грунт, песок, бетон, снег, можно считать ламбертовским отражателем [6], для которого падающая освещенность и отраженная яркость связаны между собой соотношением

$$L_k(x, y, \alpha_k, \beta_k) = L_k(x, y) = R(x, y)E(x, y)/\pi, \quad (2)$$

где  $R(x, y)$  – коэффициент яркости подстилающей поверхности в точке с координатами  $x, y$ ;  $L_k(x, y)$  – яркость, отражаемая подстилающей поверхностью в точке с координатами  $x, y$  в направлении  $\alpha_k, \beta_k$ , которая для ламбертовского отражателя не зависит от направления.

Полученные снимки, содержащие результаты измерения яркости, дополняют наземными измерениями освещенности на различных видах подстилающей поверхности (дороги, пешеходные и велодорожки, паркинги и т. д.) и с учетом (2) рассчитывают поле освещенности всей обследованной зоны. Метод практически опробован при обследовании уличного освещения такого крупного города, как Рио-де-Жанейро [7].

На рис. 1 приведен пример результатов измерений с борта вертолета поля яркости городского уличного освещения, выполненных компанией "ALTILUM". На рис. 2 представлен пересчет этих

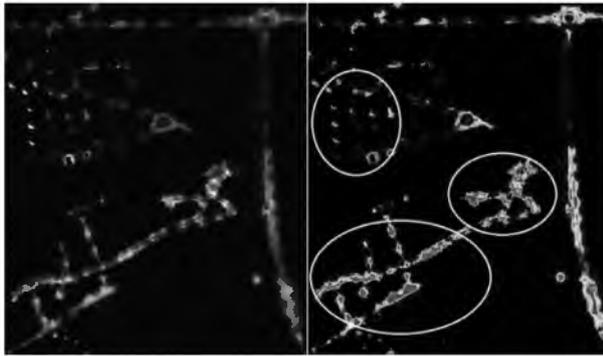


Рис. 1

Рис. 2

результатов в поле освещенности подстилающей поверхности. В пределах трех выделенных областей находятся зоны, в которых освещенность избыточна и доходит до 250 лк. Не менее чем в половине освещенной площади расчетная освещенность превышает 45 лк.

Максимальное значение средней горизонтальной освещенности в соответствии [1] составляет 20 лк и требуется для объектов категории А по освещению – магистральных дорог и магистральных улиц общегородского значения с наибольшей интенсивностью движения в обоих направлениях от 1000 до 3000 единиц в час. Минимальное значение 4 лк предусмотрено для объекта категории В по освещению – улиц и дорог местного значения, характеризующихся проездами одиночных автомобилей. Значения средней горизонтальной освещенности более 20 лк нормами не предусмотрены, они считаются излишними. Таким образом, во всех областях со средней горизонтальной освещенностью выше 20 лк установки уличного освещения работают неэффективно, создавая неоправданно высокий уровень освещенности, называемый "световым загрязнением" [7].

Применимость рассмотренного подхода для обнаружения зон избыточной освещенности подтверждается результатами [5], в то время как возможность проведения измерений средней горизонтальной освещенности на уровне 4...10 лк требует дополнительного изучения.

Рассчитаем в соответствии с (2) яркости для наиболее характерных для уличного освещения ви-

дов подстилающей поверхности, приняв  $R(x, y) = R = \text{const}$  (табл. 1). По результатам расчета изменения яркость изменяется 0.19 до 3.65 кд/м<sup>2</sup>.

Следует обратить внимание, что в выражении (2) высота фотокамеры над подстилающей поверхностью не участвует. Это справедливо для такого диапазона высот, при котором размер неоднородности поля освещенности много больше размера элемента разрешения на местности. Указанное условие легко достижимо. При высоте полета летательного аппарата до 1 км элемент разрешения современных цифровых фотокамер имеет размер на местности, измеряемый долями метра. Размер же неоднородностей поля освещенности составляет единицы метров [4]. Таким образом, измерения полей освещенности могут проводиться и на небольших высотах (10...300 м). Представляет интерес рассмотреть возможность применения для этих целей беспилотных летательных аппаратов.

В последние годы появились общедоступные гражданские роторные беспилотные летательные аппараты, применяемые сегодня в основном для фото- и видеосъемки. Такой летательный аппарат может нести в качестве полезной нагрузки установленную в управляемом подвесе фотокамеру. Он снабжается системой радиуправления, навигации и связи и может находиться в полете 20...30 мин на высоте 10...300 м. Это открывает новые возможности для мониторинга городского уличного освещения даже в небольших городах.

Оценим диапазон яркостей подстилающей поверхности, которые могут быть измерены с помощью цифровой зеркальной фотокамеры. В этом случае представляется целесообразным воспользоваться подходом, описанным в [8] и применяемым для определения номинальной экспозиции фотокамер, в том числе цифровых. Номинальная экспозиция  $H$  в фокальной плоскости для пленки или матрицы зеркальной фотокамеры чувствительностью  $S$  единиц ISO в соответствии с [8] должна составлять  $H = H_0/S$ , где  $H_0 = 10 \text{ лк} = \text{const}$ . Экспозиция  $H = E_{\phi}t$ , где  $E_{\phi}$  – освеще-

Таблица 1

Освещенность $E$ , лк	Вид подстилающей поверхности							
	Асфальт	Травяной покров	Сухая глинистая почва	Травяной покров	Снег			
	$R$							
	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.7	0.9
	Яркость $L$ , кд/м <sup>2</sup>							
4	0.19	0.25	0.32	0.38	0.45	0.51	0.89	1.15
10	0.61	0.81	1.01	1.22	1.42	1.62	2.84	3.65

щенность в фокальной плоскости;  $t$  – время экспозиции. В свою очередь, освещенность  $E_{\text{ф}}$  связана с яркостью  $L$  источника известным соотношением [8]:  $E_{\text{ф}} = qL/n^2$ , где  $q$  – коэффициент световых потерь объектива;  $n$  – диафрагменное число. Тогда

$$L = H_0 n^2 / (qSt). \quad (3)$$

При мониторинге уличного освещения требуется определить, превосходят ли измеряемые значения яркости границу, установленную нормами [1]. Будем считать, что априорные оценки измеряемой яркости отсутствуют, а возможность управления экспозицией находящейся на борту беспилотного летательного аппарата фотокамеры ограничена. В связи с этим важно определить значение минимальной регистрируемой яркости при заданной номинальной экспозиции. Это позволит выбрать такую номинальную экспозицию, которая, с одной стороны, даст возможность уверенно обнаруживать зоны с недостаточной яркостью, с другой – регистрировать значения яркостей, соответствующих установленным в [1] нормам.

Если принять, что динамический диапазон фотокамеры симметричен относительно номинальной экспозиции и составляет девять ступеней [9], каждая из которых вдвое отличается от соседней по уровню регистрируемой яркости, то минимальная регистрируемая яркость будет отличаться от яркости, соответствующей номинальной экспозиции, на четыре ступени, т. е. будет в 256 раз меньше. Выражение для минимальной регистрируемой яркости примет вид

$$L_{\text{min}} = H_0 n^2 / (256qSt).$$

Оценим средние уровни яркости в соответствии с (3) для фотокамер различной чувствительности. Значение ISO 3200 соответствует любительской цифровой фотокамере, 12 800 – зеркальной цифровой фотокамере начального уровня (например, Nikon D3100), 204 800 – фотокамере с наилучшими на момент написания статьи характеристиками чувствительности (Canon EOS-1D X и Nikon D4). При  $q = 0.8$  и  $n = 2.8$  для различных значений  $t$  и  $S$  получим значения регистрируемой яркости, соответствующей зоне номинальной экспозиции (табл. 2).

Таблица 2

Выдержка $t$ , с	Чувствительность ISO			
	100	3200	12 800	204 800
	Яркость $L$ , кд/м <sup>2</sup>			
0.01	98.000	3.063	0.766	0.048
0.05	19.600	0.613	0.153	0.010
0.10	9.800	0.306	0.077	0.005
0.50	1.960	0.061	0.015	0.001

Приведенные расчеты показывают, что решение задачи мониторинга уличного освещения возможно с использованием зеркальной цифровой фотокамеры начального уровня на борту беспилотного летательного аппарата при времени экспозиции 0.01...0.05 с. Это позволило бы решить множество возникающих при эксплуатации городского уличного освещения практических задач, в частности:

1. Выполнить инвентаризацию фонарей уличного освещения, получить единое фотометрическое поле освещенности всего населенного пункта.
2. Получить фотометрические характеристики полей освещенности, создаваемых каждым из фонарей.
3. Определить тип каждой из ламп по спектральным характеристикам создаваемой ею освещенности.
4. Получить исходные данные для улучшения характеристик (снижение светового загрязнения, улучшение равномерности освещения, анализ соответствия измеренной освещенности требованиям стандартов), для ремонта и модернизации уличного освещения.
5. Добиться многократного снижения затрат на проведение обследования по сравнению с традиционными способами наземного обследования.
6. Повысить безопасность дорожного движения, сохранность имущества и здоровья граждан за счет улучшения качества обслуживания.
7. Получить исходные данные для принятия решений о внедрении энергосберегающих мероприятий.

Итак, на основании выполненных оценок показано, что рассматриваемый подход к мониторингу городского уличного освещения с использованием фотокамеры с борта беспилотного летательного аппарата практически реализуем и при дальнейшем своем развитии может иметь широкое практическое применение.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение / Минстрой России. М., 1995. 35 с.
2. Lenk R., Lenk C. Practical Lighting Design With LEDs. New York: IEEE Press, 2011. 240 p.
3. Recommended system for mesopic photometry based on visual performance: CIE 191: 2010. Vienna: CIE central bureau, 2010. 79 p.
4. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю. Б. Айзенберга. М.: Энергоатомиздат, 1983. 472 с.
5. Barré J. C. TCC-Altium: l'entreprise qui traque du ciel les déperditions d'énergie des villes // Le FIGARO. 2014. № 4. P. 489–495.
6. Иванов В. П., Батраков А. С. Трехмерная компьютерная графика. М.: Радио и связь, 1995. 224 с.
7. Barré J. C. L'efficacité énergétique. Vue du ciel // Picardie Information. 2014. Feb.–Mars. P. 22.
8. ГОСТ Р 50679-94. Фотография. Камера. Автоматический контроль экспозиции. М.: Изд-во стандартов, 1994. 35 с.
9. Анцев В. Зонная система при экспонировании // Сов. фото. 1980. № 1. С. 39–40.

N. V. Ershova

*Saint-Petersburg state university of film and television*

### **Monitoring of urban street lighting using the camera on board the aircraft**

*The approaches to the monitoring of urban street lighting using a camera on board the aircraft are discussed. The main attention is paid to the statement of the problem and assessing the possibility of using a digital SLR camera on board of the UAV to measure regulatory parameters of street lighting.*

Street lighting, camera, aircraft

Статья поступила в редакцию 15 октября 2014 г.