

Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В. Келдыша
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Волобой А.Г., Вьюкова Н.И., Галактионов В.А., Ершов С.В.,
Летунов А.А., Потемин И.С.

**Аппаратно-программный комплекс для измерения
светорассеивающих свойств поверхностей**

Москва
2005 г.

Волобой А.Г., Вьюкова Н.И., Галактионов В.А., Ершов С.В.,
Летунов А.А., Потемин И.С.

Аппаратно-программный комплекс для измерения светорассеивающих свойств поверхностей

Аннотация. Данные о светорассеивающих свойствах поверхностей используются в современных средствах машинной графики для построения реалистичных физически аккуратных изображений, а также в системах проектирования сложных оптических устройств. Для получения таких данных необходимы высокоточные оптические измерения. В работе рассматривается разработанный аппаратно-программный комплекс, предназначенный для измерения спектрального и пространственного распределения света, рассеиваемого поверхностями. Прибор основан на оригинальной концепции, обеспечивающей одновременное измерение рассеяния в различных направлениях и высокое пространственное разрешение в критической области вблизи направления зеркального отражения. Для параллельного получения большого объема пространственной информации используется камера на ПЗС-матрице. В настоящее время прибор используется в эксплуатационном режиме, с его помощью проведено большое количество измерений.

Voloboy A.G., V'yukova N.I., Galaktionov V.A., Ershov S.V.,
Letunov A.A., Potemin I.S.

An Installation for Measurement of Light Scattering Properties of Surfaces

Abstract. Data about light scattering properties of surfaces are used in modern computer graphics for creation of realistic, physically accurate images and in computer systems for optical design. Such a data can be obtained by high precision optical measurements. Direct use of traditional optical devices is impossible because of great volume of needed measurements. The paper discusses a new device intended for measurements of spectral and spatial distribution of light scattered by surfaces. An original concept of the device provides simultaneous measurements in numerous directions and high resolution of measured data near the direction of specular reflection. The CCD-based camera is used as a detector, for parallel processing of large volume of spatial information. The complex is fully operational, a great deal of practical measurements were already conducted with it.

Работа была поддержана РФФИ, грант 04-01-00520, а также компанией INTEGRA Inc. (Япония).

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение.....	4
2. Проблема измерений ДФО/ДФП и существующие решения.....	7
3. Описание аппаратной части комплекса для измерения ДФО/ДФП светорассеивающих свойств поверхностей	10
3.1. Концептуальная модель измерений.....	12
3.2. Детальное описание измерительного комплекса	14
3.3. Процесс измерений.....	17
3.4. Технические характеристики	18
4. Программная обработка данных измерений	19
4.1. Вычисление первичных данных ДФО/ДФП.....	19
4.2. Постобработка первичных данных	22
5. Заключение	27
Литература.	30

1. Введение

Большинство современных методов реалистичной визуализации и генерации фотореалистичных изображений базируются на физически аккуратном моделировании распространения света в различных средах. При таком моделировании особенно важным является правильное и физически корректное задание светорассеивающих свойств изображаемых объектов и поверхностей: красок, рефлекторов, элементов жидкокристаллических панелей, образцов тканей, отделочных материалов и др. В большинстве случаев эти свойства материалов неизвестны и получить их можно только непосредственными измерениями.

Наиболее общий способ описания отражающих (светорассеивающих) свойств поверхности – задание *двунаправленных функций отражения/пропускания* (ДФО/ДФП или BRDF/BTDF – Bidirectional Reflection/Transmittance Distribution Function в англоязычной литературе) [1]. ДФО/ДФП, заданная в каждой точке поверхности, определяет какая часть энергии, принятая с направления w_{in} будет рассеяна поверхностью в направлении w_{out} (рис. 1). Таким образом, в общем случае, ДФО/ДФП в каждой точке является функцией двух направлений.

Получение корректной двунаправленной функции отражения/преломления поверхности является непростой задачей. Реально только их физическое измерение можно считать действительно корректным. Представленный в данной работе аппаратно-программный комплекс предназначен для получения данных об отражающих, светорассеивающих свойствах поверхностей. Данные, полученные при помощи описанного комплекса, применяются как в современных системах компьютерной графики, так и в программных средствах для проектирования сложных оптических систем и устройств.

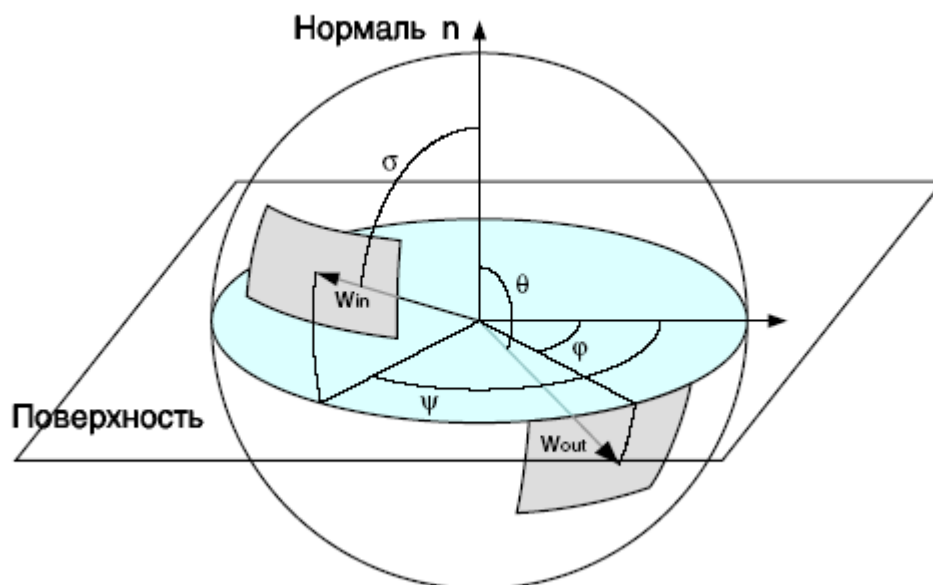


Рис. 1. Задание ДФП в сферической системе координат (система координат, определяющих направления $w_{in}(\sigma, \psi)$ и $w_{out}(\theta, \phi)$).

Неоднородные светорассеивающие свойства могут быть обусловлены микрогеометрической структурой поверхности (фактура ткани, неровность, шероховатость твердой поверхности), либо явлением объемного рассеяния, например, в лакокрасочных покрытиях современных автомобилей, представляющих собой слой прозрачного лака с наполнителями в виде пигментных частиц и частиц со свойствами зеркального отражения (рис. 2, 3).



Рис. 2. Микроструктура шелковой ткани и ее изображение.

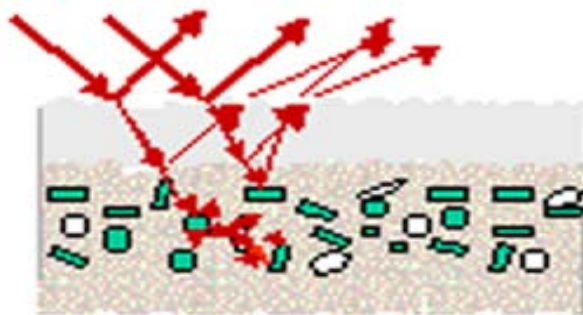


Рис. 3. Объемное рассеяние света в многослойном лакокрасочном покрытии.

В общем случае ДФО/ДФП является функцией от пяти переменных – четырех пространственных и одной спектральной (рис.1):

- ψ , σ – угловые значения, описывающие направление падения света в сферической системе координат;
- φ , θ – угловые значения, описывающие направление рассеяния света в сферической системе координат;
- длина волны поступающего света.

Как правило, в машинной графике применяют табличную форму представления на некоторой равномерной или неравномерной сетке по входным переменным. Применяются также представления на основе линейных комбинаций базовых функций, в качестве которых используют тензорные произведения сферических гармоник, многочлены Zernike и др. [2].

Спецификации ДФО для применения в машинной графике могут быть получены путем математического моделирования светорассеивающих свойств на основе известных микроструктурных свойств поверхности [3]. Однако основным способом ее получения являются непосредственные измерения светорассеивающих свойств поверхностей. Проблема измерения ДФО исследовалась и исследуется во многих институтах и университетах мира [4-8]. В ряде исследовательских центров созданы лаборатории, предоставляющие услуги по проведению подобных измерений [9-11].

Данная работа является продолжением работ [12] и [13]. В них описан разработанный прототип измерительного комплекса, на котором были

опробованы основные концептуальные, технические и программные решения. В настоящее время измерительный комплекс доработан и практически доведен до стадии промышленной эксплуатации.

Дальнейшее изложение построено по следующему плану. В главе 2 дана характеристика основных проблем, связанных с проведением измерений светорассеивающих свойств поверхностей, и рассмотрены подходы, существующие в данной области. В главе 3 представлена разработанная авторами концепция измерений ДФО/ДФП, описана принципиальная модель измерений и дана детальная схема оптической части комплекса. Глава 4 посвящена вопросам программной обработки данных измерений. В заключении приведены выводы по результатам эксплуатации комплекса.

2. Проблема измерений ДФО/ДФП и существующие решения

В самом общем виде схема измерений проста – на образец поверхности под разными углами направляют луч света и проводят измерение отраженного света для различных углов наблюдения. Этот процесс повторяют для заданного множества значений длин волн. Характерные черты сложившихся к настоящему времени подходов в области практических измерений ДФО/ДФП рассмотрим на примере работ [6 - 9].

В статье [6] представлен метод измерения ДФО с помощью точечного источника и ПЗС камеры. Образец представляет собой полуплоскость, вторая половина плоскости должна быть занята эталоном. Линия разграничения, источник и приемник лежат в одной плоскости перпендикулярной к плоскости образца и эталона. За счет одномерного движения источника или приемника в этой плоскости можно реализовать (для разных точек образца) в принципе все наборы пространственных координат ДФО. Спектральную зависимость при этом можно получать из RGB представления ПЗС камеры (или, гипотетически, меняя цвет точечного источника). Данный подход представляется весьма интересным, и мог бы получить дальнейшее развитие.

Однако из-за необходимости использования образца больших размеров, что хорошо подходит для крупномасштабных объектов – стен зданий, дорожных покрытий, газонов, – он мало пригоден для лабораторных измерений образцов.

Сложная проблема, связанная с измерениями светорассеивающих свойств, заключается в том, что в силу многомерного характера ДФО количество измерений, которые необходимо провести, измеряется десятками и сотнями тысяч. Поэтому при разработке реальных измерительных установок стремятся тем или иным образом оптимизировать этот процесс, в частности, распараллелить его, чтобы получать за одно измерение значения ДФО одновременно для некоторого множества значений входных параметров. При этом важно обеспечить достаточно высокую точность измерений.

В приборе Корнельского университета [7] измеряемый образец имеет две степени свободы вращения, и источник света может перемещаться по сфере вокруг образца. Приемник, представляющий собой массив фотодиодов, закреплен неподвижно. При заданном положении образца и лампы этот прибор также позволяет регистрировать множество спектральных компонент в видимом диапазоне длин волн. Сканирование углов производится под управлением программы, которая оптимизирует механические движения лампы и образца для минимизации общего времени измерений.

Концептуально наиболее близок к представленной работе подход, описанный в статье [8]. Здесь образец и объектив ПЗС-камеры помещены в центр зеркальной полупрозрачной сферы. Через поверхность сферы образец освещается коллимированным пучком от источника, перемещающегося по дуге для изменения угла падения. Рассеянный образцом свет, отражаясь от полупрозрачной сферы, попадает в объектив камеры. В результате на ПЗС-матрице фокусируется изображение, отображающее всю пространственную картину ДФО для данного угла падения. Спектральная зависимость обеспечивается за счет получаемого RGB представления света ПЗС-матрицей.

Если же этого недостаточно, полный спектр можно получить путем использования монохромных пучков.

Достоинством прибора [8] является возможность получать за одно измерение данные для всего множества углов рассеяния. Поскольку вся область измерений представлена как изображение, любые изменения сетки могут быть выполнены на уровне программной обработки. В то же время, возможность непрерывного изменения угла падения затрудняет реализацию полноценных спектральных измерений. Существенным недостатком приборов данного типа является большое паразитное рассеяние света, возникающее за счет использования полупрозрачной сферы, что ведет к резкому снижению точности для направлений с низкой интенсивностью рассеяния на образце.

В приборе GCMS-4 фирмы Мураками [9] измерения проводятся следующим образом. Источник – галогеновая лампа – и приемник вращаются вокруг вертикальной оси, проходящей через центр образца. Приемник состоит из спектрального прибора и детектора в виде диодной линейки (не ПЗС). Образец может вращаться вокруг горизонтальной оси. В результате при фиксированном положении источника, приемника и образца одновременно регистрируются все спектральные компоненты (35 точек от 390 до 730 нм с интервалом 10 нм) ДФО для одного набора геометрических переменных. Три упомянутых выше вращения позволяют получить любой набор углов, характеризующих пространственную точку ДФО (для изотропного образца). Сканирование углов производится в определенном порядке, заложенном в управляющей программе прибора.

Практически все схемы, рассмотренные в этой главе трудно (а иногда и невозможно) использовать для измерений ДФП (функции преломления света), что является их существенным недостатком.

3. Описание аппаратной части комплекса для измерения ДФО/ДФП светорассеивающих свойств поверхностей

При разработке измерительного комплекса преследовались две цели – минимизация времени измерений и обеспечение высокой точности результатов. С точки зрения последней цели важно было учесть специфику ДФО/ДФП, используемых в компьютерной графике. Обычно с помощью этих функций задаются свойства таких поверхностей как краски «металлик», ткани. Для этих поверхностей характерны высокий градиент функции в области углов наблюдения в окрестности направления зеркального отражения (для ДФО) и преломления (для ДФП), как показано на рис. 4.



Рис. 4. График типичной функции рассеяния света (сечение).

Поэтому конструкция прибора и методика измерений должны обеспечивать высокое угловое разрешение координатной сетки в указанных областях.

Требование минимизации времени измерений приводит к использованию изображений и их последующей обработке в качестве основного архитектурного решения. С учетом существующих в данное время аппаратных возможностей это выливается в использование цифровой фотокамеры. Таким образом, предлагаемое решение находится на стыке трех

научных направлений – оптические измерения, компьютерная графика и обработка изображений [14].

В установке [7], где используется видеокамера для отображения всех направлений рассеяния, пространство «выворачивается» при помощи отражающей полусферы, камера помещается рядом с образцом и используется широкоугольный объектив типа «рыбий глаз». Это идейно красивое решение приводит, однако, к высокому уровню паразитного рассеяния света, что отрицательно сказывается на надежности и точности результатов. Поэтому в данном проекте было решено поместить камеру отдельно от образца. Рассеянный свет для выделенного направления собирается на объектив камеры с помощью линзовой проектирующей системы, а для остальных направлений – при помощи световодов.

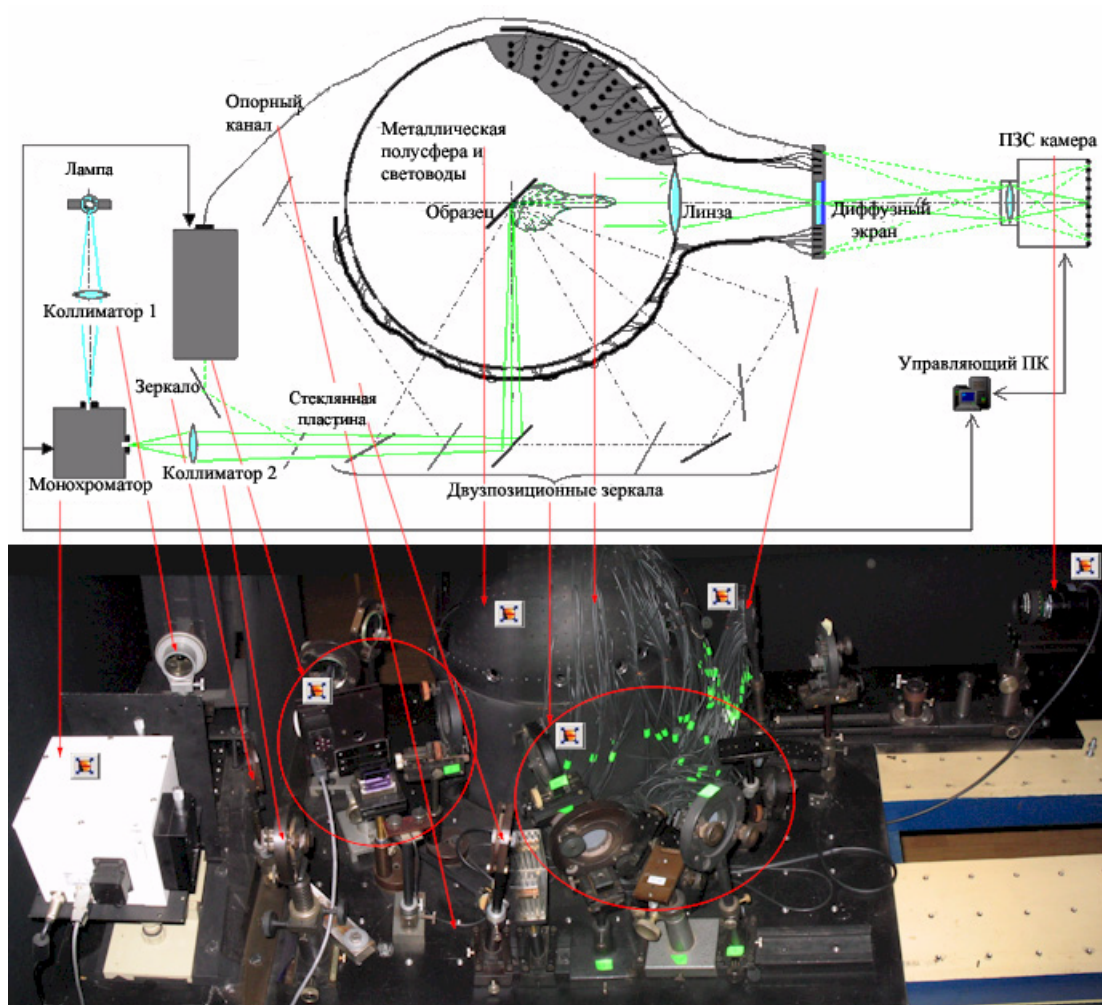


Рис. 5. Схема и общий вид измерительной установки.

На рис. 5. представлен общий вид измерительной установки и ее схема. Стрелками показано соответствие между элементами установки на фотографическом изображении и на схеме. Далее в этой главе представлено подробное описание измерительного комплекса и процесса получения данных о светорассеивающих свойствах поверхности.

3.1. Концептуальная модель измерений

Система координат для измерения светорассеивающих свойств. Рассмотрим, как происходит измерение рассеянного от поверхности света для некоторого угла падения при заданной длине волны. Образец освещают почти

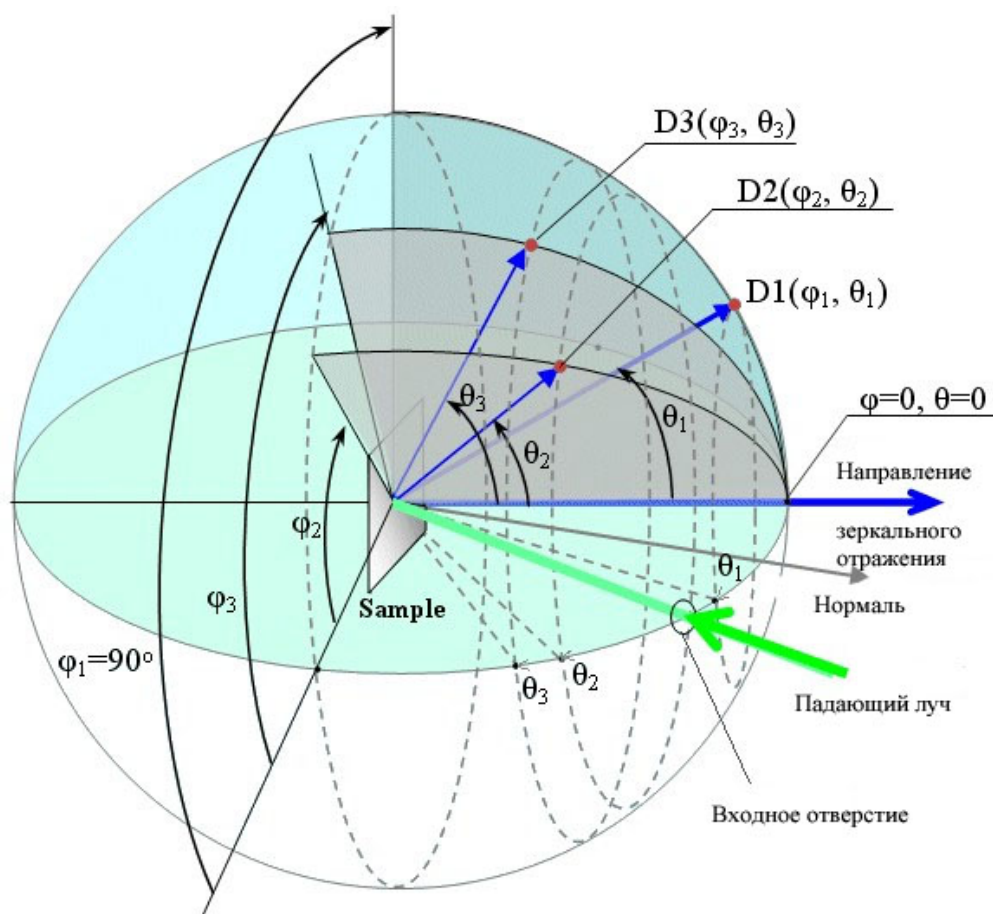


Рис. 6. Сферическая система координат для направлений отраженного света. Направление отраженного света D1 имеет координаты (φ_1, θ_1) , направление D2 - (φ_2, θ_2) и т.д.

параллельным пучком монохромного света. Свет, рассеиваемый образцом, измеряется для множества выходных направлений, которые задаются в сферической системе координат. Ось системы координат совпадает с выделенным направлением зеркального отражения (ДФО) или преломления (ДФП). На рис. 6 показана система координат для измерения ДФО.

Координаты выходных направлений обозначены буквами θ , φ . По аналогии с географическими координатами, координаты θ и φ можно рассматривать как широту и долготу соответственно.

Надо отметить, что данная система координат используется также в разработанных нашим коллективом системах компьютерной графики и моделирования освещенности [15, 16]. Это позволяет легко использовать измеренные функции в качестве входных данных.

Варьирование направления падающего света. Измерительная установка сконструирована таким образом, что направление зеркального отражения (ось выходной системы координат для ДФО) должно оставаться неизменным и направленным на камеру. Это достигается за счет одновременного изменения направления падающего луча и поворота образца (рис. 7).

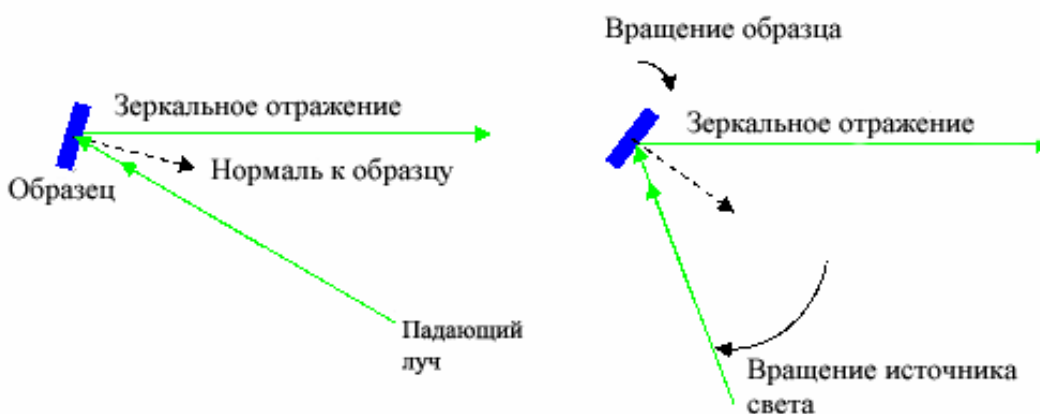


Рис. 7. Изменение направления падающего луча с одновременным вращением образца обеспечивает неизменность направления зеркального отражения.

Изменение направления падающего луча достигается при помощи двухпозиционных зеркал и использования нескольких входных отверстий (см. схему на рис. 5). Это позволяет проводить измерения для углов падения 10° , 20° , 30° , 45° , 60° для ДФО и для любых углов $<90^\circ$ дляДФП. Поддерживаются измерения только для изотропных образцов.

Нормализация распределения рассеянного света. ДФО определяется как отношение энергии света, отраженного в некотором направлении, к энергии падающего света, поэтому необходимо измерять обе эти величины. Для измерения энергии падающего света некоторая фиксированная ее часть (около 8%) ответвляется при помощи стеклянной пластины в опорный канал (см. рис. 5) и измеряется каждый раз напрямую.

3.2. Детальное описание измерительного комплекса

На рис. 5 приведена подробная схема комплекса в положении, соответствующем углу падения $\sigma=45^\circ$. Измерительный комплекс состоит из оптического прибора и управляющего компьютера. Оптический прибор состоит из подсистемы освещения, подсистемы формирования изображения и подсистемы опорного канала.

Подсистема освещения. Источником света является ксеноновая дуговая лампа ДКсШИЛ 150 (в безозоновом исполнении) с эффективным размером дуги 1.0 x 0.3 мм и цветовой температурой 6000К.

Изображение центральной части дуги лампы проектируется с двукратным увеличением входным коллиматором 1 в виде линзы с ирисовой диафрагмой на входную щель монохроматора SP-150, управляемого компьютером [17]. Диафрагма позволяет регулировать угловые размеры направляемого на образец пучка.

Во время измерений монохроматор сканирует видимую область спектра, разбивая ее на 30 каналов с интервалом 10нм, в диапазоне от 400нм до 690нм.

Спектральная ширина каналов может регулироваться при помощи щелей монохроматора. Обычно при измерениях используются два режима с шириной каналов 10нм и 15нм.

В качестве выходного коллиматора использована линза с фокусным расстоянием $F=150\text{мм}$, фокусирующая изображение выходной щели монохроматора на плоскость, близкую к плоскости образца, с увеличением ≈ 10 раз. За линзой находится наклонная плоскопараллельная стеклянная пластинка, отводящая около 8% светового потока в опорный канал. Далее по ходу луча установлено управляемое компьютером колесо с набором нейтральных фильтров, служащее для расширения динамического диапазона прибора.

После этого свет отражается от одного из двухпозиционных зеркал и падает на образец через одно из входных отверстий, расположенных на «экваторе» полусферы.

Подсистема формирования изображения включает собственно измеряемый образец, полусферу с отверстиями, световоды, линзу, экран с пластиной из матированного стекла и выходными концами световодов, а также ПЗС камеру.

Образец помещается в центре полусферы с внутренним радиусом около 200 мм. Входные концы световодов вмонтированы в отверстия, высверленные в полусфере, и направлены к центру полусферы. Отверстия со световодами образуют неравномерную сетку по выходным углам θ , φ .

Линза диаметром 80мм с фокусным расстоянием 150мм собирает свет, рассеиваемый образцом в пределах не более 10° от направления зеркального отражения, и фокусирует его на круглой пластине из матированного стекла, которая находится в центре прямоугольного экрана. Пластина находится в фокальной плоскости линзы и угловое распределение света, отраженного от образца, преобразуется в пространственное, т.е. значения θ преобразуются в соответствующие значения радиуса. Это означает, что свет, отраженный от

любой точки образца под некоторым углом θ будет отражен в одну и ту же точку на пластине (рис. 8).

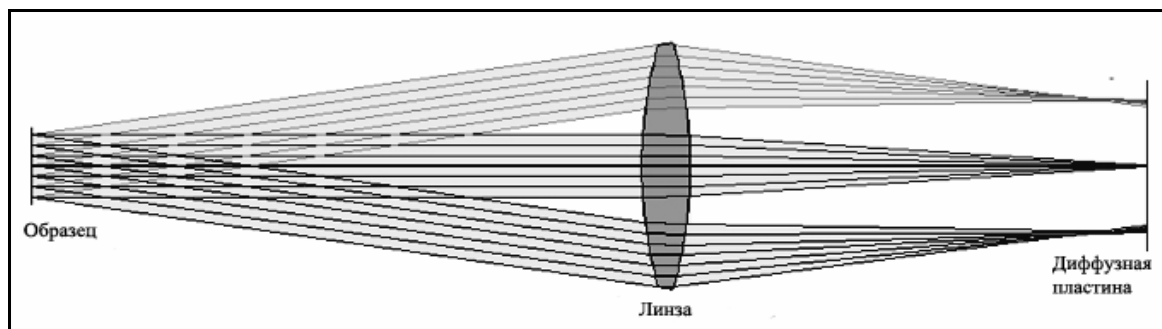


Рис. 8. Преобразование углового распределения в пространственное.

Такой подход позволяет существенно повысить угловое разрешение в области вблизи зеркального отражения, где для большинства образцов ДФО имеет наиболее высокий градиент.

На том же экране смонтированы выходные концы световодов, идущих от полусферы, а также выходной конец опорного канала. В рабочем состоянии экран выглядит как показано на рис. 9. Сторона экрана, обращенная к камере, имеет сферическую форму с центром в объективе камеры. ПЗС камера (ST-5C, производство Santa Barbara Instruments Group, Inc.) формирует изображение экрана с пластиной из матированного стекла и концами световодов.

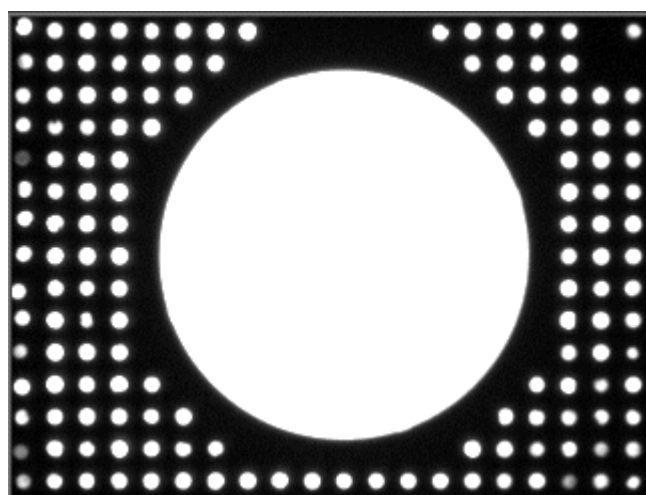


Рис. 9. Экран с выходами световодов и диффузной пластиной.

Подсистема опорного канала начинается с плоскопараллельной стеклянной пластины, которая отделяет часть света от источника и направляет его при помощи вспомогательного зеркала на вход опорного канала (световода). Выходной конец опорного канала вмонтирован в тот же экран, в котором укреплены выходные концы световодов, идущих от полусферы. Таким образом, информация об энергии источника света поступает в управляющий компьютер и может быть использована программой для вычисления первичных данных измерения ДФО/ДФП, как это описано далее в п. 4.1.

Функции управляющего компьютера. Сформированное при помощи ПЗС камеры изображение поступает в управляющий компьютер, который использует программу Video for Windows, а также программы для вычисления первичных данных измерений и их постобработки (см. главу 4). В функции управляющего компьютера входит также управление устройствами комплекса – монохроматором и колесом с фильтрами. Управление внешними устройствами выполняется при помощи специальной программы через последовательные порты полностью автоматически.

3.3. Процесс измерений

Как описано выше, комплекс регистрирует одновременно все предусмотренные конструкцией компоненты ДФО или ДФП для заданной длины волны и при установленном значении угла падения света. Для фиксированного угла падения производится сканирование всей спектральной области измерений при помощи управляемого компьютером монохроматора. Указанные действия составляют основу измерительного цикла для заданного угла падения и проводятся автоматически. Действия, обеспечивающие изменение угла падения, (изменение положений зеркал) производятся вручную. Изменение угла падения для ДФП достигается поворотом образца, а для ДФО еще и синхронным с ним изменением траектории падающего луча.

При измерении ДФО для типичного образца с автомобильной краской время, затрачиваемое на ручные действия, составляет примерно 70 мин. При измерении ДФП, вследствие оптимизации компоновки прибора, на ручные действия приходится порядка 20 мин.

3.4. Технические характеристики

Спектральный диапазон: 390-710 нм с шагом 10 нм.

Динамический диапазон яркости: 0.05 – 2500

Повторяемость полученных результатов: 1-3%

Точность полученных результатов: 4-8%

Угловое разрешение: 0.5° – 1.5° в диапазоне до 10° от направления зеркального отражения, 1.5° – 8° для других направлений, в среднем – около 3° .

Размер светового пятна: 1-2 см (в зависимости от угла падения)

Размер образца (L – длина, Н – высота, Т – толщина):

минимальный: 5 см L x 3 см Н

максимальный: 20 см L x 15 см Н x 1.0 см Т

Кривизна образца. Конструкция измерительного комплекса предназначена для измерения плоских образцов. Кривизна поверхности отрицательно сказывается на точности результатов, однако радиус кривизны 300 см и выше приемлем для измерений.

Типы материалов. Комплекс позволяет проводить измерения только изотропных образцов с симметричным рассеянием (когда $\text{ДФО}(\varphi) = \text{ДФО}(-\varphi)$).

Углы падения света: 10° , 20° , 30° , 45° , 60° для ДФО и любые углы $<90^{\circ}$ для ДФП.

4. Программная обработка данных измерений

4.1. Вычисление первичных данных ДФО/ДФП

Двунаправленная функция отражения/преломления определяется как отношение интенсивности света, отраженного (или пропущенного) образцом в некотором направлении, к световому потоку падающего светового пучка.

Как описано в предыдущем разделе, свет, рассеянный в заданном направлении (φ, θ) , регистрируется на выходном отверстии полусферы. Часть излучаемого лампой света ответвляется при помощи стеклянной пластины и также регистрируется через опорный канал.

Зарегистрированные значения светового потока, отраженного образцом и излучаемого лампой, пропорциональны значениям интенсивности, поэтому соответствующее значение BDF может быть выражено как

$$\text{BDF}(\varphi, \theta) = S(\varphi, \theta) \times L / L' \quad (1)$$

где L и L' – зарегистрированные значения энергии для отраженного образцом и излучаемого лампой света. Коэффициенты пропорциональности $S(\varphi, \theta)$ определяются рядом параметров, а именно геометрией устройства, диафрагмы, чувствительностью датчиков и т.п. Эти коэффициенты могут быть вычислены в результате проведения измерений для эталонного образца с известной ДФО(BRDF). В качестве такого эталона используется паспортизованный образец из молочного стекла БС-10:

$$S(\varphi, \theta) = \text{BRDF}_{\text{etalon}}(\varphi, \theta) / (L / L') \quad (2)$$

Процедура измерения эталонного образца и вычисления коэффициентов $S(\varphi, \theta)$ называется калибровкой. Такой подход предпочтителен практически во всех задачах амплитудного измерения рассеяния [18]. Калибровка должна проводиться регулярно для учета возможных изменений в характеристиках приборов, входящих в состав установки (например, изменений параметров лампы).

Ниже описан способ измерения эталонного образца и метод вычисления коэффициентов S по данным измерений.

Измерение эталонного образца проводится следующим образом. Пучок света поступает через отверстие, обычно используемое при измерении для угла падения σ_{st} (в реальности $\sigma_{st} = 10^\circ$), и ориентирован перпендикулярно образцу (поскольку именно для такого угла падения имеются паспортные данные). Вычислим энергию, отраженную в направлении (ϑ, φ) .

Пусть оси координат выбраны так, что нормаль к образцу выражается формулой

$$\mathbf{n}_{st} = (\sin 2\sigma_{st}, 0, \cos 2\sigma_{st}),$$

направление наблюдения выражается формулой

$$\mathbf{v} = (\sin \vartheta \cos \varphi, \sin \vartheta \sin \varphi, \cos \vartheta),$$

а направление падения света есть

$$\mathbf{v}' = \mathbf{n}_{st}.$$

Энергия, излучаемая образцом, выражается как

$$E_{st} = f_{st}(\vartheta_{st}) \cos \gamma_{st} \times \tau_{st} I_{st} \quad (3)$$

где f_{st} – ДФО эталонного образца для угла падения, совпадающего с нормалью (в таком случае ДФО является функцией только одной угловой координаты), ϑ_{st} – угол между направлением наблюдения и направлением зеркального отражения, γ_{st} – угол между направлением наблюдения и нормалью, I_{st} – интенсивность источника света, τ_{st} – экспозиция камеры. Поскольку угол падения перпендикулярен поверхности, направление зеркального отражения совпадает с нормалью к поверхности, поэтому

$$\vartheta_{st} = \gamma_{st} = \arccos(\mathbf{v}, \mathbf{n}_{st})$$

С другой стороны, энергия, излучаемая при измерении образца, равна

$$E = f(\sigma, \vartheta, \varphi) \cos \gamma \times \tau I \quad (4)$$

где f есть ДФО образца, γ – угол между направлением наблюдения и нормалью к поверхности, I – интенсивность источника, τ – экспозиция камеры.

Объединяя (3) и (4), получаем

$$f(\sigma, \vartheta, \varphi) = (f_{st}(\vartheta_{st}) \cos \vartheta_{st} / \cos \gamma) \times (E / (\tau I) / E_{st} / (\tau_{st} I_{st})) \quad (5)$$

Для определения интенсивности источника света используется опорный канал. В канал поступает постоянная доля q_{cal} света, излучаемого источником, этот свет проходит через фильтр с коэффициентом пропускания T , и камера регистрирует этот свет вместе со светом, отражаемым от образца (см. детальную схему на рис. 5). Энергия, регистрируемая в соответствующем фрагменте изображения (т.е. энергия, поступившая на камеру по опорному каналу), составляет $\tau_{st} T_{st} I_{st}$ при измерении эталона и τI при измерении произвольного образца. Обозначая энергию, поступившую по опорному каналу, через E' , можем переписать (5) как

$$f(\sigma, \vartheta, \varphi) = (f_{st}(\vartheta_{st}) \cos \vartheta_{st} / \cos \gamma) \times ((E / (E' / T)) / ((E_{st} / (E'_{st} / T_{st}))))$$

Энергия E пропорциональна создаваемой ею светимости L , поэтому

$$f(\sigma, \vartheta, \varphi) = (f_{st}(\vartheta_{st}) \cos \vartheta_{st} / \cos \gamma) \times ((L / (L' / T)) / ((L_{st} / (L'_{st} / T_{st}))))$$

где L_{st} и L – значения светимости в точке изображения, соответствующей направлению рассеяния (θ, φ) при измерении эталона и произвольного образца соответственно, а L'_{st} и L' – значения светимости от опорного канала при измерении эталона и произвольного образца.

Фактически мы оперируем не с самими значениями светимости экрана, а с некоторыми значениями пропорциональными им – яркостью точек. В данном случае это корректно, поскольку мы везде используем только отношения этих значений.

Введем масштабирующий множитель, не зависящий от образца:

$$s(\sigma, \vartheta, \varphi) = f_{st}(\vartheta_{st}) \cos \vartheta_{st} / (\cos \gamma / (L_{st} / (L'_{st} / T_{st})))$$

где по определению,

$$\cos \vartheta_{st} = (\mathbf{v}, \mathbf{n}_{st}) = \sin \vartheta \cos \varphi \sin 2\sigma_{st} + \cos \vartheta \cos 2\sigma_{st}$$

$$\cos \gamma = (\mathbf{v}, \mathbf{n}) = \sin \vartheta \cos \varphi \sin \sigma + \cos \vartheta \cos \sigma$$

Полученные множители записываются в профиль устройства, и далее ДФО для произвольного образца вычисляется по формуле

$$f(\sigma, \vartheta, \varphi) = s(\sigma, \vartheta, \varphi) \times L/(L'/T)$$

4.2. Постобработка первичных данных

Первичные данные измеренных ДФО/ДФП представляют собой набор значений $F(\theta_i, \varphi_i)$ для некоторого множества выходных направлений (θ_i, φ_i) . Для некоторых выходных направлений данные могут по тем или иным причинам отсутствовать – например, из-за того, что яркость по данному направлению оказалась вне допустимого диапазона, воспринимаемого камерой. Кроме того, как указано в предыдущем разделе, данные также отсутствуют для некоторых направлений падения. Для таких направлений $F(\theta_i, \varphi_i)=0$. Пример первичных данных BDF, полученных в результате измерений, представлен на рис. 10.

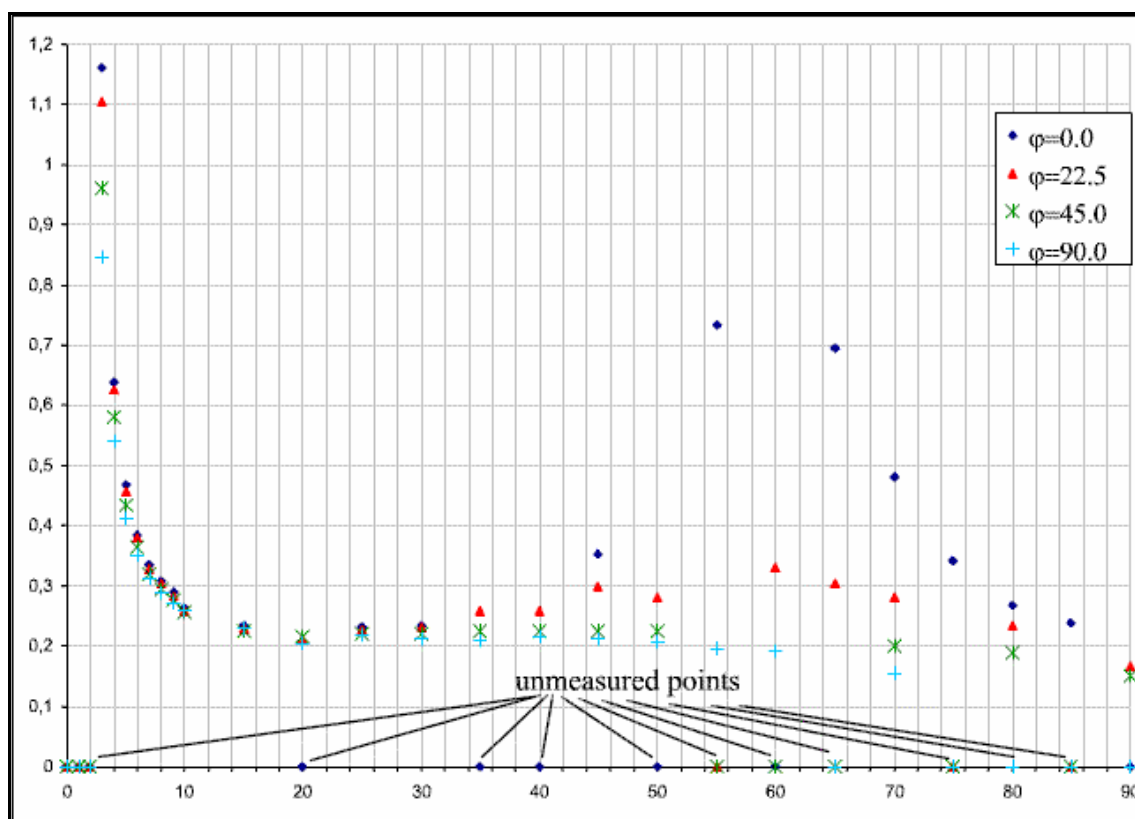


Рис. 10. Пример первичных данных ДФО для $\varphi=0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 90^\circ$.

Приближение первичных данных гладкой кривой. На первом этапе постобработки производится вычисление гладкой кривой, максимально близкой к измеренным данным. Целью данного этапа является избавление от случайного шума и получение данных для всего диапазона угловых координат. Будем искать кривую в представлении

$$F(\vartheta, \varphi) = \sum_l c_l F_l(\vartheta, \varphi) \quad (6)$$

где c_l – неизвестные коэффициенты, а F_l – функции из некоторого базисного набора. Тогда задачу можно сформулировать как задачу поиска кривой по методу наименьших квадратов:

$$\sum_i w_i \times (F(\vartheta_i, \varphi_i) - f(\vartheta_i, \varphi_i))^2 = \min! \quad (7)$$

где w_i – вес i -й точки, в сферических координатах

$$w_i = \sin \theta_i \Delta \theta_i$$

Требование гладкости можно выразить в виде

$$\sum_i w_i \times |(\text{grad } F)(\vartheta_i, \varphi_i)|^2 = \min! \quad (8)$$

где $||$ обозначает длину вектора, а градиент вычисляется для функции на единичной сфере:

$$\text{grad } F = e_\vartheta \frac{\partial F}{\partial \vartheta} + e_\varphi \frac{1}{\sin \vartheta} \frac{\partial F}{\partial \varphi}$$

Требования гладкости и максимальной близости к данным измерения противоречат друг другу. Мы используем подход, заключающийся в поиске минимизации выражения

$$\Delta^2 \equiv \sum_i w_i \times (F(\vartheta_i, \varphi_i) - f(\vartheta_i, \varphi_i))^2 + \varepsilon \sum_i w_i \times |(\text{grad } F)(\vartheta_i, \varphi_i)|^2 = \min! \quad (9)$$

где ε – параметр, регулирующий степень гладкости функции. При $\varepsilon=0$ требование гладкости игнорируется, и кривая проходит максимально близко к измеренным значениям. При больших значениях ε получаем очень гладкую кривую, но отклонение от данных измерения может быть велико. Примеры аппроксимаций при различных значениях параметра ε приведены на рис. 11. Значение ε подбирается экспериментально.

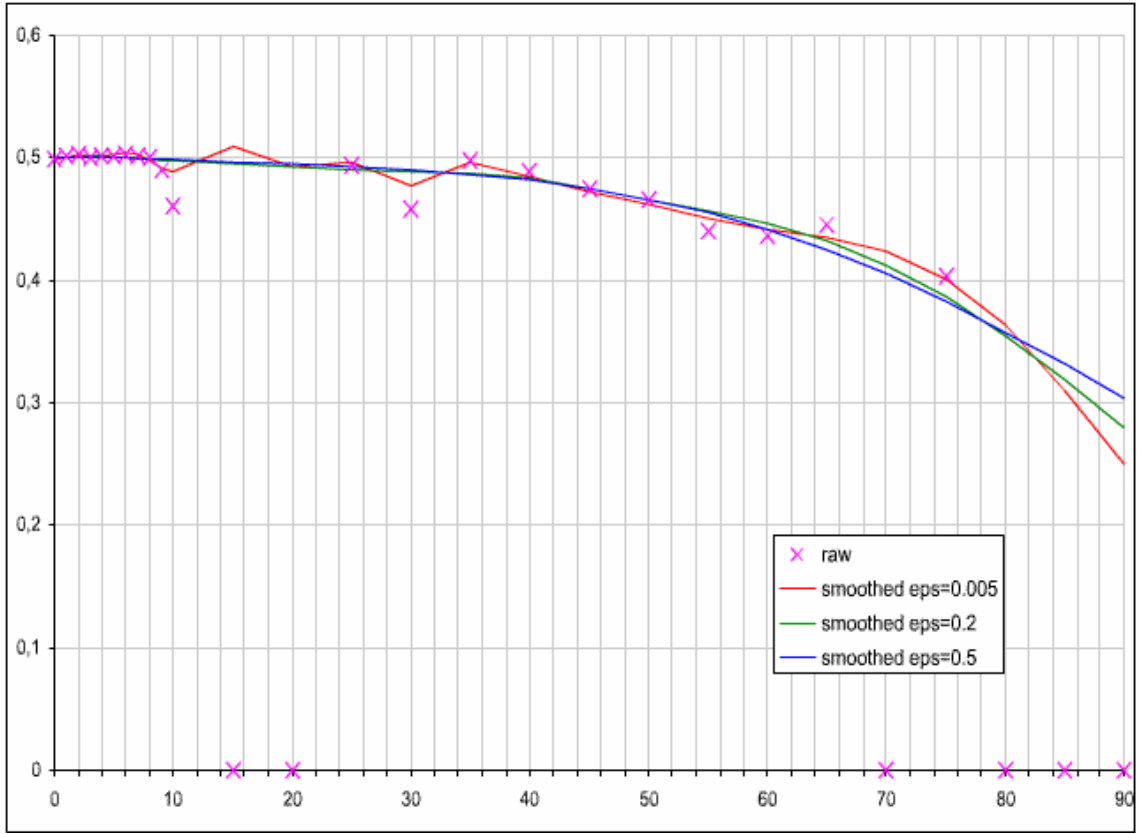


Рис. 11. Аппроксимации первичных данных BDF при различных значениях параметра гладкости ε .

Практически, это соответствует наложению ограничения

$$\sum_i |(\text{grad } F)(\vartheta_i, \varphi_i)|^2 \leq \varepsilon$$

Используя набор M базисных функций, получаем из (9):

$$\Delta^2 = \sum_i w_i \times \left(\sum_{l=0}^{M-1} c_l F_{i,l} - f_i \right)^2 + \varepsilon \sum_i \sum_{l=0}^{M-1} w_i \times \left(\left(c_l \frac{\partial F_{i,l}}{\partial \vartheta} \right)^2 + \left(c_l \frac{1}{\sin \vartheta_i} \frac{\partial F_{i,l}}{\partial \varphi} \right)^2 \right) = \min!$$

где

$$F_{i,l} = F_l(\theta_i, \varphi_i) \text{ и т.д.}$$

минимум достигается когда производные $\frac{\partial \Delta}{\partial c_k} = 0$:

$$\sum_i w_i \times \left(\sum_{l=0}^{M-1} c_l F_{i,l} - f_i \right) F_{i,k} + \varepsilon \sum_i \sum_{l=0}^{M-1} w_i \times \left(c_l \frac{\partial F_{i,l}}{\partial \vartheta} \frac{\partial F_{i,k}}{\partial \vartheta} + c_l \frac{1}{\sin^2 \vartheta_i} \frac{\partial F_{i,l}}{\partial \varphi} \frac{\partial F_{i,k}}{\partial \varphi} \right) = 0$$

то есть

$$\sum_{l=0}^{M-1} c_l \sum_i \left\{ w_i F_{i,l} F_{i,k} + \varepsilon w_i \left(\frac{\partial F_{i,l}}{\partial \vartheta} \frac{\partial F_{i,k}}{\partial \vartheta} + \frac{1}{\sin^2 \vartheta_i} \frac{\partial F_{i,l}}{\partial \varphi} \frac{\partial F_{i,k}}{\partial \varphi} \right) \right\} = \sum_i w_i f_i F_{i,k}$$

Имеем систему алгебраических уравнений

$$\sum_{l=0}^{M-1} A_{kl} c_l = G_k \quad (10)$$

где

$$A_{l,k} \equiv \sum_i w_i F_{i,l} F_{i,k} + \varepsilon \sum_i w_i \frac{\partial F_{i,l}}{\partial \vartheta} \frac{\partial F_{i,k}}{\partial \vartheta} + \varepsilon \sum_i w_i \frac{1}{\sin^2 \vartheta_i} \frac{\partial F_{i,l}}{\partial \varphi} \frac{\partial F_{i,k}}{\partial \varphi} \quad (11)$$

$$G_k \equiv \sum_i w_i f_i F_{i,k}$$

Решая (10), получаем соответствующие коэффициенты и можем теперь вычислить аппроксимирующий ряд (6) на всей области значений аргумента. При вычислении матриц (11) можно использовать свойство симметрии ($A_{k,l} = A_{l,k}$) и вычислять только верхний треугольник.

Аппроксимация производится последовательно для всех направлений падения света.

Базисные функции F могут быть выражены как

$$F_{l,k}(\theta, \varphi) = P_l(\theta) \cos k\varphi, \quad F_{l,k}(\theta, \varphi) = P_l(\theta) \sin k\varphi,$$

где P_l – какие-то функции. При выборе набора функций P_l следует принять во внимание характер ДФО/ДФП, которые обычно имеют большой градиент в окрестности $\theta = 0^\circ$ и довольно пологи в других областях. С учетом этого для эффективной аппроксимации ДФО/ДФП базис должен включать функции с различными градиентами. Для построения такого базисного набора можно взять N функций (например, полиномов) $p_n(x)$ и строить $P_l(\theta)$ следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} P_0(\vartheta) &= p_0(s\vartheta) \\ P_1(\vartheta) &= p_1(s\vartheta) \\ &\dots \\ P_{N-1}(\vartheta) &= p_{N-1}(s\vartheta) \end{aligned} \right\} \quad \left. \begin{aligned} P_N(\vartheta) &= p_0(2s\vartheta) \\ P_{N+1}(\vartheta) &= p_1(2s\vartheta) \\ &\dots \\ P_{2N-1}(\vartheta) &= p_{N-1}(2s\vartheta) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} P_{2N}(\vartheta) &= p_0(4s\vartheta) \\ P_{2N+1}(\vartheta) &= p_1(4s\vartheta) \\ &\dots \\ P_{3N-1}(\vartheta) &= p_{N-1}(4s\vartheta) \end{aligned} \right\}$$

где s масштабирующий множитель. При такой схеме $p_n(x)$ должны быть определены везде. Простейший подход заключается в том, чтобы за пределами некоторого интервала функция $p_n(x)$ гладко обнулялась. В данной реализации выбраны функции $p_n(x)$:

$$p_n(x) = \left(1 + \frac{n}{4}\right)^2 \left(1 + \frac{4}{n}\right)^{n/2} \begin{cases} (1-x^2)^2 x^n & |x| \leq 1 \\ 0 & |x| > 1 \end{cases}$$

Поскольку ДФО измеряются в интервале $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$, $s = 1/90^\circ$, и результирующие функции $P_l(\theta)$ выглядят как показано на рис. 12.

Зависимость от азимутального угла φ естественным образом выражается при помощи тригонометрических функций, так что полный набор базисных функций для приближения ДФО имеет вид:

$$F_{2n,m}(\theta, \varphi) = P_n(\theta) \cos k\varphi, \quad F_{2n+1,m}(\theta, \varphi) = P_n(\theta) \sin k\varphi$$

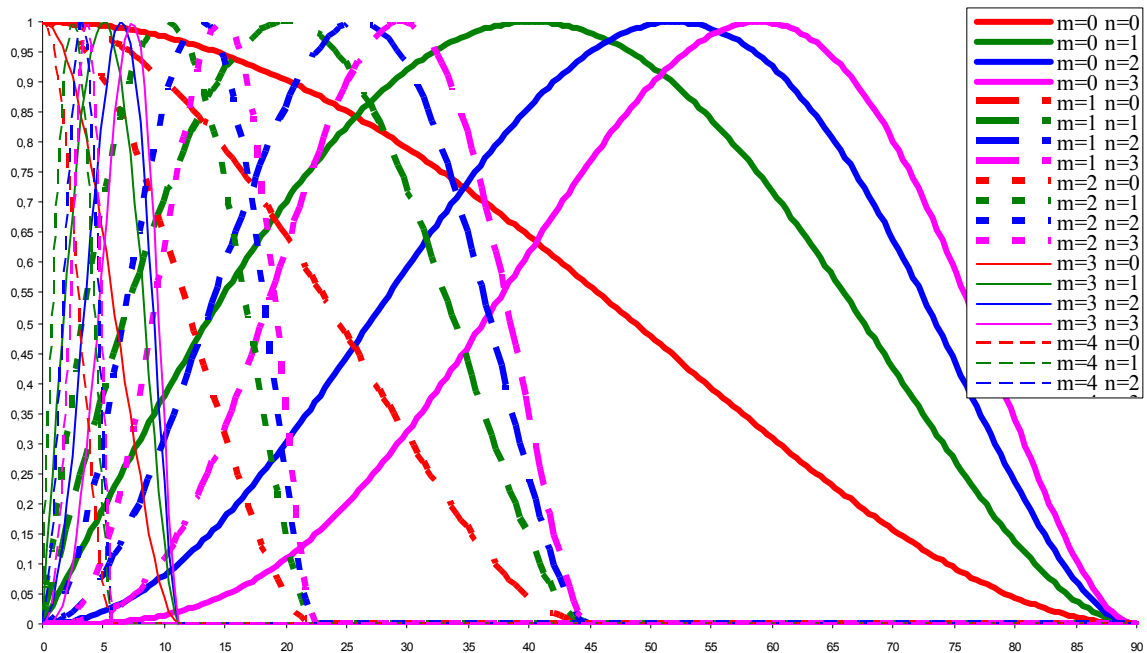


Рис.

12. Базисные функции $P_l(\theta)$.

Восполнение данных для выделенных направлений падения света. На втором этапе постобработки восполняются данные, соответствующие

направлениям падения, для которых измерения не произведены или в принципе не могут быть выполнены ($\sigma = 0^\circ$ для ДФО и $\sigma = 90^\circ$ для ДФО/ДФП).

Для промежуточных значений σ ДФО(σ) вычисляется путем интерполяции. ДФО для $\sigma = 90^\circ$ устанавливается равным ДФО при $\sigma = 60^\circ$, т.е. ДФО для последнего из измеряемых углов падения. ДФО для $\sigma = 0^\circ$ вычисляется экстраполяцией по значениям ДФО при $\sigma = 20^\circ$ и $\sigma = 10^\circ$ с усреднением по всем значениям φ .

Результат постобработки записывается в файл в формате, который может непосредственно использоваться программами машинной графики.

5. Заключение

Основные цели, которые преследовались при проектировании измерительного комплекса, были сформулированы исходя из задач задания физически корректных входных данных для систем моделирования освещенности и генерации реалистичных изображений. Основными целями являлись

- обеспечение высокого углового разрешения в выделенной области, где ДФО/ДФП имеет максимальный градиент;
- достаточно полный охват всего телесного угла, в котором происходит рассеяние света;
- минимизация времени измерений.

Для достижения этих целей была разработана оригинальная концепция оптической схемы измерений, которая предусматривает одновременное использование световодов и области изображения, формируемой линзой, где в качестве пространственных координат выступают непосредственно углы. Использование ПЗС-камеры позволяет одновременно измерять большое число пространственных точек, причем время измерений практически не зависит от числа используемых световодов, т.е. измеряемых пространственных

компонент ДФО/ДФП. Достигнутая точность измерений (4-8%) по оценкам экспертов близка к максимально возможной при данном уровне технологии. Время измерения было доведено до нескольких часов (3-4 часа) для простого образца автомобильной краски. Однако образцы сложных материалов типа полупрозрачных пленок, металлические пластины с микро-насечками могут потребовать большого числа дополнительных измерений и более сложной постобработки полученных первичных данных. В таких случаях время измерения может исчисляться днями (в отдельных случаях до 10 рабочих дней).

За время, прошедшее от создания прототипа устройства ([12], [13]), были доработаны многие технические и программные решения. В настоящее время комплекс функционирует практически в режиме производственной эксплуатации. С его помощью были проведены измерения светорассеивающих свойств большого числа разнообразных материалов. Изначально комплекс разрабатывался для измерения двунаправленной функции отражения, позволяющей с хорошей точностью мерить такие материалы как сложные краски и ткани. Однако благодаря дальнейшему развитию аппаратной и программной частей комплекса стало возможным измерять такие необычные и нестандартные образцы как металлические поверхности с микрорельефом, пластиковые поверхности с микробороздками, материалы со светорассеивающими свойствами, не имеющими осевой симметрии, «толстые» образцы с отражающей поверхностью, находящейся под слоем прозрачного пластика или стекла, и др.

Спецификации ДФО и ДФП, полученные в результате измерений, напрямую используются в системах компьютерной графики для создания изображений фотореалистического качества, таких как система синтеза реалистичных изображений в реальном времени [15], система Интернет сервиса для моделирования освещенности и синтеза реалистичных изображений [16]. Также благодаря использованию измеренных данных в системах конструирования и моделирования осветительных оптических

устройств, основанных на расчете распространения света методом Монте-Карло [19], нам удалось получить результаты, дающие ошибку порядка 5-10% по сравнению с измеренными выходными характеристиками реальных устройств.

Версия статьи с цветными иллюстрациями размещена по адресу http://www.keldysh.ru/pages/cgraph/publications/cgd_publ.htm.

Литература.

- [1] Хорн Б.К.П. Зрение роботов: Пер. с англ.- М.:Мир, 1989.
- [2] Szymon Rusinkiewicz, A Survey of BRDF Representation for Computer Graphics.
<http://www.cs.princeton.edu/~smr/cs348c-97/surveypaper.html>
- [3] NIST Appearance Research Home Page.
<http://slp.nist.gov/appearance/appmain.html>
- [4] Murray-Coleman J.F., Smith A.M., The Automated Measurement of BRDFs and their Application to Luminaire Modeling. Journal of the Illuminating Engineering Society, Winter 1990
- [5] Pattanaik S.N., Ferwerda J.A., Torrance K.E., Greenberg D., Validation of Global Illumination Simulations through CCD Camera Measurements. Cornell University, Ithaca, NY-14853, USA
<http://www.graphics.cornell.edu/research/measure/>
- [6] Karner K.F., Mayer H., Gervautz M., An Image based Measurement System for Anisotropic Reflection. Eurographics'96, Computer Graphics Forum, 15(3), pp. 119-128.
- [7] Foo S.C., A Gonioreflectometer for Measuring Bidirectional Reflectance of Material for Use in Illumination Computation. Cornell University, Thesis, 1997.
- [8] Ward G.J., Measuring and Modeling Anisotropic Reflection. Computer Graphics, Volume 26, Number 2, July 1992.
- [9] MURACAMI, Operation Manual. GCMS-4. No. 8951-9.
- [10] Scattering Measurements. O++.
http://www.oplusplus.com/english/services/mesures_de_diffusion.php
- [11] Measurements Services. Surface Optics Corporation.
<http://www.surfaceoptics.com/Products/Measurements.htm>
- [12] Летунов А.А., Барладян Б.Х., Зуева Е.Ю., Вежневцев В.П., Солдатов С.А., Прибор для измерения BDF на основе ПЗС-камеры для использования в

компьютерной графике. The 9th International Conference on Computer Graphics & Vision. Russia, Moscow, 1999, pp.129-135.

[13] Летунов А.А., Галактионов В.А., Барладян Б.Х., Зуева Е.Ю., Вежневцев В.П., Солдатов С.А., Измерительный комплекс на основе видеокамеры для определения светорассеивающих свойств поверхностей, используемый в компьютерной графике. – М.: ИПИМ им. М.В. Кедыша РАН, препринт № 71, 2000 г.

[14] Barladian B.H., Kugushev E.I., and Zueva E.Yu., Scene Reconstruction from Multiple Photos with Aid of Parametric 3D Models. The 5th International Conference on Computer Graphics & Vision. Moscow, Russia, St. Petersburg, 1995, vol. 1, pp. 190-192.

[15] Ignatenko A., Barladian B., Dmitriev K., Ershov S., Galaktionov V., Valiev I., Voloboy A., A Real-Time 3D Rendering System with BRDF Materials and Natural Lighting. The 14-th International Conference on Computer Graphics and Vision GraphiCon-2004, Moscow, September 6-11, 2004. Conference Proceedings, pp. 159-162.

[16] Барладян Б.Х., Волобой А.Г., Вьюкова Н.И., Галактионов В.А., Дерябин Н.Б., Моделирование освещенности и синтез фотореалистичных изображений с использованием Интернет технологий. "Программирование", № 5, 2005.

[17] SpectraPro Series. Automated Scanning Monochromators and Flat Field Imaging Spectrographs. Acton Research Corporation ARC.

[18] Богомолов Г.Д., Летунов А.А., Амплитудная калибровка систем лазерной диагностики плазмы по вращательному комбинационному рассеянию в водороде и дейтерии. Физика плазмы, № 5, 1979, с. 1380.

[19] Волобой А.Г., Галактионов В.А., Дмитриев К.А., Копылов Э.А. Двухнаправленная трассировка лучей для интегрирования освещенности методом квази- Монте Карло. "Программирование", № 5, 2004, стр. 25-34.