

Об одной задаче обработки изображений при формировании компьютерно синтезированных голограмм в натуральных цветах.

В настоящее время компьютерно синтезированные голограммы находят все более широкое применение. Самой широкой областью их современного использования является защита от подделки документов, денежных купюр, пластиковых карточек, компакт-дисков и различных товаров [1]. В этой сфере компьютерно синтезированные голограммы обладают существенными преимуществами по сравнению с голограммами записанными традиционными методами с помощью лазеров. Такими преимуществами являются: различные скрытые изображения [2]; возможность объективного приборного контроля подлинности голограмм [3]; степени защиты, обусловленные более высоким разрешением компьютерно синтезированных голограмм, например, микронадписи с высотой букв в несколько микрон, что допускает экспертный контроль подлинности с помощью оптического микроскопа; некоторые другие степени защиты недостижимые с помощью физической записи.

В тоже время, следует заметить, что иногда компьютерно синтезированные голограммы уступают физически записанным. Это касается в первую очередь визуальных эффектов, таких как объемность изображения; голограмм в которых объект виден в натуральных цветах, т.е. в таких цветах в которые он окрашен в реальности. Поэтому часто для защиты от подделок используются голограммы записанные комбинированными методами. В таких случаях часть поверхности голограммы записывается физически для создания легко наблюдаемого визуального эффекта, а другая часть поверхности является компьютерно синтезированной и несет в себе основные защитные функции. Такой комбинированный метод создания голограмм является неудобным, громоздким, дорогим и имеет множество ограничений. Поэтому представляется интересной задача создания целиком компьютерно синтезированных голограмм с легко наблюдаемым визуальным эффектом. Настоящая статья посвящена задаче расчета рельефа компьютерно синтезированных голограмм с изображением в натуральных цветах.

Рассмотрим задачу о построении компьютерно синтезируемого фазового плоского оптического элемента, расположенного в плоскости $Z=0$, формирующего, при освещении его плоской волной белого света для наблюдателя, находящегося в известной точке плоскости $Z=f$, ощущение априори заданного цвета. В дальнейшем мы будем называть такие оптические элементы голографическими элементами в натуральных цветах.

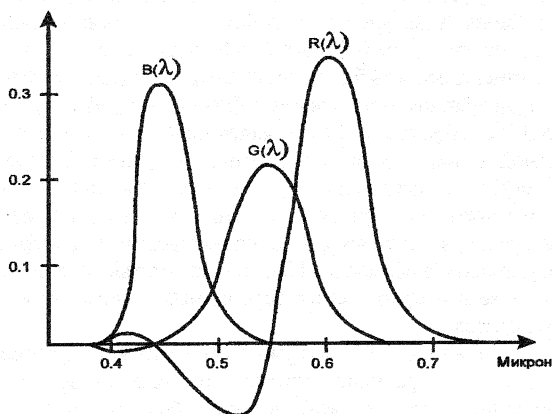
Подобные задачи возникают при проектировании плоских оптических элементов, рельеф которых синтезируется с помощью, например, электронно-лучевой литографии, что требует предварительной проработки рельефа элемента с разрешением намного меньшим, чем длина волны видимого света. До сих пор голографические элементы в натуральных цветах, использующих фотографическое качество передачи цвета, т.е. количество различных оттенков цветов в которых исчисляется тысячами, насколько нам известно, изготавливались аналоговым способом, т.е. с помощью традиционного

голографического подхода для формирования интерференционного рельефа.

В начале необходимо несколько слов сказать о существующей в настоящее время теории цвета. Цвет - это ощущение, возникающее в мозгу человека при освещении сетчатки его глаз светом со спектром, находящимся в видимой области (длина волны примерно от 0.4 до 0.7 микрона). Таким образом, с физической точки зрения, цвет полностью определяется заданием спектрального распределения падающего света.

Сетчатка глаза человека имеет три вида фоторецепторов (колбочек), воспринимающих цвет, которые реагируют на падающий свет, имеющий различный тип спектрального распределения. Четвертый вид фоторецепторов расположенных на сетчатке - палочки эффективны при очень малых величинах светового потока (ночное зрение). Они играют очень большую роль для зрения, однако они никак не помогают различать цвета.

Так как на сетчатке имеется три типа цветных фоторецепторов, то для описания цвета необходимо и достаточно трех числовых компонент, получаемых с использованием подходящих спектральных весовых функций. Это является проблемой специальной науки - колориметрии. В 1931 году специальная комиссия Commission Internationale de L'Eclairage (CIE) [4] утвердила стандартные весовые функции для гипотетического "стандартного наблюдателя".



На рис.1 приведены эти функции для системы RGB, в которой в качестве базовых использованы длины волн: красного - RED (около 0.61 микрона), зеленого - GREEN (около 0.54 микрона) и синего цвета -BLUE (около 0.44 микрона). Эти функции определяют каким образом из заданного спектрального распределения

Рис.1. Удельные координаты системы RGB.

света может быть получены три числа, определяющие цвет [5].

Пусть спектральное распределение падающего света описывается функцией $S(\lambda)$, тогда координаты системы RGB вычисляются как

$$\begin{aligned} R &= \int S(\lambda)R(\lambda)d\lambda \\ G &= \int S(\lambda)G(\lambda)d\lambda \\ B &= \int S(\lambda)B(\lambda)d\lambda \end{aligned} \quad (1)$$

Таким образом, если функция $S(\lambda)=0$ и на сетчатку глаза ничего не

попадает, то $R=G=B=0$ и воспринимаемый цвет - черный, если функция $S(\lambda)$ - спектральное распределение полученное при свечении абсолютно черного тела, нагретого до температуры примерно 6000 градусов Кельвина (хорошее приближение для описания белого света Солнца), то $R=G=B$ и воспринимаемый цвет - белый. Обычно координаты RGB нормируются. Остальные цвета, получаемые с использованием координат RGB - некоторая комбинация координат, например, $R=1, G=1, B=0$ - желтый цвет, $R=1, G=0.78, B=0.68$ - телесный цвет и т.д. Нужно заметить, что координаты RGB описывают не все возможные цвета. Из рисунка 1 видно, что существуют такие функции $S(\lambda)$, что координаты R или B могут быть отрицательными. Также с помощью этой системы невозможно передать пурпурные оттенки, которые являются смешением ультрадлинных и ультракоротких длин волн видимого цвета. Однако, эта система имеет достаточно широкий класс описываемых цветов.

В нашем случае в качестве информации о цвете мы будем использовать координаты цвета, полученные с помощью видео систем типа камеры или сканера, которые при передаче линейных координат RGB переводят их в нелинейные координаты $R_1G_1B_1$ с помощью гамма - коррекции [6]. Например, для координаты R:

$$R_1 = \begin{cases} 4.5R, & R \leq 0.018; \\ 1.099R^{0.45} - 0.099, & 0.018 < R; \end{cases}$$

Такое преобразование координат позволяет с одной стороны минимизировать шумы в видео системах, а с другой - передать гораздо больший диапазон интенсивностей цвета. Таким образом, для того, чтобы получить линейные координаты цвета, необходимо провести обратное преобразование:

$$R = \begin{cases} \frac{R_1}{4.5}, & R_1 \leq 0.081; \\ \left(\frac{R_1 + 0.099}{1.099} \right)^{\frac{1}{0.45}}, & 0.081 < R; \end{cases}$$

Будем считать, что нам в качестве входной информации заданы линейные координаты RGB.

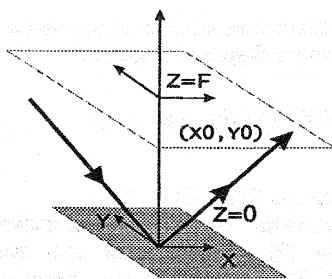


Рис. 2.

И наша задача состоит в том, чтобы сформировать такой фазовый оптический элемент, расположенный в плоскости $Z=0$ и работающий на отражение, что, при освещении его белым светом, наблюдатель рассматривающий его в точке (x_0, y_0) плоскости $Z=F$ увидит цвет, соответствующий заданным координатам. Говоря другими словами, необходимо найти такую функцию $S(\lambda)$, что для нее выполнены соотношения (1) см. Рис.2.

Необходимо заметить, что фиксирование координат RGB задает целый класс

функций $S(\lambda)$, реализующих один и тот же цвет. Из всех возможных функций $S(\lambda)$, предпочтительнее выбрать ту, которая наибольшее количество отраженного света собирает в точке (x_0, y_0, F) .

Для простоты будем рассматривать :

- 1) одномерную задачу, что соответствует протяженному источнику света;
- 2) считать, что на элемент в плоскости $Z=0$ падает плоская волна белого света со спектральным распределением $P(k)$, где $k = 2\pi/\lambda$, под углом θ_0 с осью Z ;
- 3) рельеф фазового элемента описывается функцией $H(x)$, заданной в области D . При этом мы будем считать, что искомый фазовый элемент является плоским и тонким, т.е. $0 \leq H(x) < \lambda/2$;
- 4) будем рассматривать длиннофокусное приближение, т.е. $F \gg \lambda$, в этом случае точку наблюдения удобнее описывать как расположенную под углом θ с осью Z . См Рис 3.
- 5) будем считать, что распространение излучения описывается скалярной волновой моделью в условиях длиннофокусного приближения - интегралом Фурье.

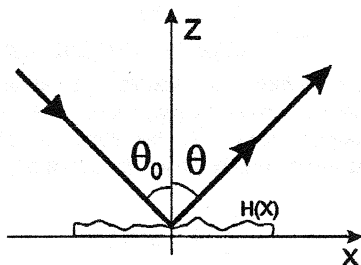


Рис. 3.

Обозначая через $W(\theta, k) = A(\theta, k) \exp(ik\phi(\theta))$ комплексную амплитуду поля имеем [6]:

$$W(\theta, k) = CP(k) \int_D \exp(ikx(\sin \theta_0 - \sin \theta) - 2ikH(x) \cos \theta_0) dx$$

Искомая функция $S(\lambda)$ или $S(k) = A^2(k)$ в Фурье плоскости должна удовлетворять соотношениям (1). Введем функцию $E(H)$ - невязку в Фурье плоскости.

$$E(H) = \left\{ \int_k S(k)r(k)dk - R \right\}^2 + \left\{ \int_k S(k)g(k)dk - G \right\}^2 + \left\{ \int_k S(k)b(k)dk - B \right\}^2$$

где функции $r(k)$, $g(k)$, $b(k)$ - пересчитанные функции $R(\lambda)$, $G(\lambda)$, $B(\lambda)$.

Такая постановка задачи позволяет строить различные достаточно эффективные методы решения см. например [7]. Практически для всех возможных вариантов задания координат цвета RGB удается найти функцию $H(x)$, что невязка $E(H)=0$. Функция $H(x)$ была вычислена для нескольких изображений, в соответствии с ней были изготовлены оригиналы голограмм. Можно утверждать, что синтезированные таким образом голограммы достаточно

точно передают цвета изображения. Однако полученные в результате такого решения задачи голографические элементы имеют ряд существенных недостатков.

1. Конечное фокусное расстояние и достаточная протяженность фазового элемента приводят к тому, что уже нельзя считать, что мы видим все точки элемента под одним и тем же углом θ . В результате этого различные точки фазового элемента кажутся окрашенными в различные цвета.
2. Функция $H(x)$, дающая нам искомую функцию $S(k)$, является непрерывной, т.е. проходит все свои промежуточные значения, что сильно усложняет изготовление такого фазового элемента. Попытка бинаризовать полученный фазовый элемент приводит к фатальным с точки зрения решения обратной задачи последствиям.
3. Никак не учитывается распределение отраженного света по углу θ , что приводит к низкой эффективности полученного фазового элемента в окрестности интересующего нас угла.

Таким образом, для получения приемлемого решения необходимо переходить к решению более сложной задачи и учитывать распределение отраженного света не только по k , но и по θ . Такая постановка задачи является предметом дальнейших исследований. Однако, ряд вышеизложенных недостатков удастся уменьшить поставив задачу несколько иначе.

Разобьем область плоскости $Z=0$, занимаемую фазовым элементом на три равные по площади части. В каждой такой области построим фазовую функцию фокусирующую падающий свет для заданной длины волны ($\lambda_R=0.61$, $\lambda_G=0.54$, $\lambda_B=0.43$) в заданную точку плоскости $Z=F$. Это можно сделать различными способами. Наиболее простой – воспользоваться приближением геометрической оптики, где искомая фазовая функция выписывается аналитически см. например [6]. И будем считать фазовую функцию не нулевой в подобласти, по площади пропорциональной интенсивности цвета R, G, B . В результате, мы получим составной фазовый элемент, каждая точка которого либо пуста, либо отвечает за одну из координат цвета. Такой фазовый элемент допускает бинаризацию, что сильно упрощает изготовление элемента ценой потери 50% его эффективности. Согласно этому методу были изготовлены оригиналы компьютерно синтезированных голограмм для различных изображений. При правильно расположенном источнике света точность передачи цвета в этих голограммах сравнима с изображением на экране монитора. Кроме того, изготовленные голограммы не имеют недостатков, обнаруженных у голограмм, рассчитанных с помощью итерационного метода.

Таким образом, рассмотрено два метода расчета рельефа компьютерно синтезированных голограмм с изображением в натуральных цветах: итерационный расчет рельефа голограммы и расчет рельефа голограммы в приближении геометрической оптики. Были изготовлены голограммы с рельефом, рассчитанным этими двумя методами. Их сравнение показало что приближение геометрической оптики для данной задачи не только применимо, но и обладает существенными преимуществами.

Литература.

1. Optical Document Security. Second Edition. Boston - London 1998. Artech House.
2. Goncharsky A.V. On certain Inverse Problem in Control in Optics. 7-th European Conference on non-destructive testing. Kopenhagen. p386.
3. Goncharsky A.A., Bursuk V.N., Seriojnikov S.U. Automatic control of security holograms authenticity. 2-nd International Conference on Computer Methods and Inverse Problems in Nondestructive Testing and Diagnostics. Minsk october 1998 p497.
4. Publication CIE No 15.2 Colorimetry, Second Edition. Vienna, Austria: central Bureau of the Commission Internationale de L'Eclairage, 1986.
5. LeRoy E., DeMarsh and Edward J. Giorgianni. Color Science for Imaging Systems. Physics Today, September 1989, 44-52.
6. А.В.Гончарский, В.В.Попов, В.В.Степанов. Введение в компьютерную оптику. Москва, изд-во МГУ, 1991г., 312с.
7. F.Wyrowski and O.Bryngdahl, "Iterative Fourier-transform algorithm applied to computer holography," J.Opt.Soc.Am.A 5,1058-1065 (1988).