

УДК 655.024.:655.027:655.3.027.3:680.3:778.18

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЦВЕТА РАСТРОВОГО ОТТИСКА С ПОМОЩЬЮ АНАЛИТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

© Н. Е. Кулишова, к.т.н., доцент, О. А. Иванникова,
Харьковский национальный университет
радиоэлектроники, Харьков, Украина

Досліджено дві аналітичні моделі для прогнозування кольору растрового відбитка — моделі Нейгебауера і Кубелки-Мунка. Знайдено коефіцієнти світлорозсіювання та світлопоглинання, розраховано точність прогнозу в колориметричних одиницях.

Two analytical raster print color forecasting models — Neugebauer model and Kubelka-Munk model — were researched. Reflectance and absorption coefficients were found, forecast precision was calculated in colorimetric units.

Постановка проблемы

Большинство печатающих устройств являются бинарными, реализуя автотипный способ растривания. Они наносят печатные краски определенной плотности на материал основы, или оставляют ее незапечатанной, но не имеют возможности изменять концентрации красителей. Таким образом, исходное непрерывно-тоновое изображение разбивается на красочные точки, размер которых зависит от уровня тона.

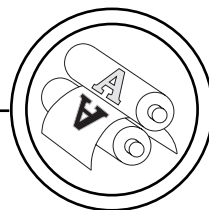
При восприятии растриванных изображений в зрительной системе человека визуальная информация усредняется в пределах области изображения, и создается иллюзия непрерывного тона. Количество красок, которые используются для подобного синтеза цвета, всегда ограничено и мало. Поэтому необходимо правильно определить размеры красочных рас-

тровых точек с учетом свойств красок, характера поверхности основы, особенностей человеческого восприятия, чтобы синтезированный цвет соответствовал заданому с определенной степенью точности. Эта задача решается при подготовке изображений к печати в ходе операции цветоделения. Для ее реализации применяются математические и алгоритмические модели, обеспечивая разную степень точности цветовоспроизведения. Важность получения точного решения возрастает по мере увеличения количества основных красок от четырех до восьми, как это происходит в принтерах.

Анализ последних достижений

В настоящее время ведутся интенсивные исследования в области моделирования и прогнозирования цвета растровых

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ



оттисков, формируемых в печатающих устройствах с количеством красок более четырех [1—5]. Все предлагаемые алгоритмы расчета количества размеров растровых точек базируются на нескольких основных моделях. К ним относят модель Нейгебауэра [6], теорию Кубелки-Мунка [7], уравнения Клаппера-Юла [8], закон Бугера-Бэра [9]. Те или иные теоретические модели применяются также для неаналитических методов описания цвета оттиска в виде профилей устройств [10].

Цель работы

Основная цель данной работы — провести сравнительный анализ математических моделей, которые позволяют рассчитывать размеры красочных точек при полиграфическом синтезе цвета. Для ее решения необходимо оценить точность прогнозирования цвета растрового оттиска с помощью существующих моделей синтеза цвета.

Результаты проведенных исследований

Нюберг [11] и Нейгебауэр [6] предложили формулу, описывающую цвета автотипных наложений в зависимости от площадей растровых элементов трех красок полиграфического синтеза (голубой, пурпурной и желтой) и площадей их комбинаций, включая площадь незапечатанной бумаги. Вероятности появления участков, запечатанных одними красками, и свободных от других, прямо пропорциональны размерам растровых точек красок синтеза [12]:

$$\begin{aligned}\sigma_{\Gamma} &= s_{\Gamma}(1-s_{\Pi})(1-s_{\text{Ж}}); \\ \sigma_{\Pi} &= s_{\Pi}(1-s_{\Gamma})(1-s_{\text{Ж}}); \\ \sigma_{\text{Ж}} &= s_{\text{Ж}}(1-s_{\Pi})(1-s_{\Gamma}); \\ \sigma_{\Gamma\Pi} &= s_{\Gamma}s_{\Pi}(1-s_{\text{Ж}}); \\ \sigma_{\Gamma\text{Ж}} &= s_{\Gamma}s_{\text{Ж}}(1-s_{\Pi}); \\ \sigma_{\Pi\text{Ж}} &= s_{\Pi}s_{\text{Ж}}(1-s_{\Gamma}); \\ \sigma_{\Gamma\Pi\text{Ж}} &= s_{\Gamma}s_{\Pi}s_{\text{Ж}};\end{aligned}\quad (1)$$

$$\sigma_{\text{БУМ}} = (1-s_{\Gamma})(1-s_{\Pi})(1-s_{\text{Ж}}),$$

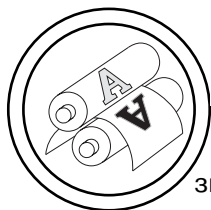
где S_i — относительная площадь каждой красочной составляющей или их комбинации в пределах растровой ячейки, $i = 1 \dots 8$.

Тогда визуальный коэффициент отражения автотипной системы с учетом коэффициентов отражения и площади восьми растровых участков (трех цветов красок, трех цветов двухкрасочных наложений, одного трехкрасочного и цвета бумаги):

$$\rho_{\text{ОТТ}}(\lambda) = \sum_{i=1}^8 \rho_i(\lambda) \sigma_i, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{ОТТ}}(\lambda)$ — спектральный коэффициент отражения, усредненный по площади растровой ячейки оттиска, $\rho_i(\lambda)$ — спектральный коэффициент отражения основного цвета, $i = 1 \dots 8$.

При диффузном рассеянии светового потока в материале бумаги происходит дополнительное поглощение света краской. Данный эффект учитывается с помощью коэффициента n [13]. Поэтому уравнение (2) приобретает вид, который по-



ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ

звolyет прогнозировать спектральное отражение оттиска для произвольного количества основных красок синтеза [14]:

$$[\rho_{\text{ОТТ}}(\lambda)]^{\frac{1}{n}} = \sum_{i=1}^8 [\rho_i(\lambda)]^{\frac{1}{n}} \sigma_i. \quad (3)$$

Кубелка и Мунк [7] установили основные положения теории рассеяния света, которая предполагает, что отражение формируется двумя основными потоками, один из которых i идет вниз через красочный слой, а второй j , отраженный от основы, одновременно идет вверх. Полные изменения этих потоков, проходящих через элементарный слой, описываются двумя уравнениями

$$dj = -(S + K) \cdot j \cdot dx + S \cdot i \cdot dx, \quad (4)$$

$$di = (S + K) \cdot i \cdot dx - S \cdot j \cdot dx, \quad (5)$$

где коэффициент K характеризует часть потока, поглощенного в элементарном слое, а коэффициент S — рассеянную часть.

Точное решение уравнений Кубелки-Мунка в гиперболических функциях дало возможность непосредственно решать задачи, касающиеся связи между отражением и непрозрачностью красочных слоев. Чтобы охарактеризовать оптические свойства результирующего цвета красочного слоя на некоторой основе, используют выражение для функции Кубелки-Мунка [9]:

$$\frac{K}{S} = \frac{\sum_{i=1}^3 C_i K_i}{\sum_{i=1}^3 C_i S_i}, \quad (6)$$

где K_i — коэффициенты поглощения; S_i — коэффициенты рассеяния, C_i — удельные количества голубой, пурпурной и желтой составляющих цвета соответственно. Коэффициенты светорассеяния и светопоглощения можно найти из соотношения для рассеивающей способности, с учетом единичной толщины красочного слоя X :

$$S = \frac{1}{bX} a \coth \frac{1-a\rho_0}{b\rho_0} \quad (7)$$

$$\text{и } K = S(a - 1),$$

где a и b — переменные, определяемые как:

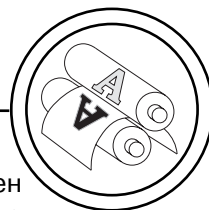
$$a = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\rho_1 - 1}{\rho_0} \right) = \frac{S + K}{S}, \quad (8)$$

$$b = \sqrt{a^2 - 1},$$

и ρ_1 — коэффициент отражения красочного слоя на белом фоне; ρ_0 — коэффициент отражения красочного слоя на черном фоне.

Для проверки точности прогноза цвета оттиска с помощью линейной теории Нейгебауэра, а также теории Кубелки-Мунка была использована тестовая шкала, на которой присутствуют поля плашек основных цветов (СМΥК) различной степени заполнения растровых ячеек от 0 % до 100 % с шагом 5 %, а также поля двухкрасочных наложений в разных комбинациях. С помощью спектрофотометра были измерены спектральные отражения красочных полей $\rho_{\text{изм}}(\lambda)$. На основе этих значений были найдены цветовые координаты $\text{CIE Lab}_{\text{изм}}$ образцов с

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ



использованием метода взвешенных ординат [15]. Затем с использованием коэффициентов отражения плашек основных красок синтеза в соответствии с уравнением Нейгебауэра (1) найдены коэффициенты отражения для однокрасочных растровых полей и вычислены их цветовые координаты CIE-Lab_{расч}.

Между измеренными и рассчитанными цветовыми координатами найдено цветовое различие ΔE [16]:

$$\Delta E = \sqrt{(L_{\text{изм}} - L_{\text{расч}})^2 + (a_{\text{изм}} - a_{\text{расч}})^2 + (b_{\text{изм}} - b_{\text{расч}})^2}, \quad (9)$$

которое является величиной нормативной — цвет оттиска образца нетриадной краски считают соответствующим цвету оттиска контрольного образца краски, если минимальное цветовое различие $\Delta E < 5,0$. В данном случае среднее для полей шкалы $\Delta E = 8,58$, что превышает нормативное значение.

Для определения значения коэффициента Юла-Нильсена исследуется функция ошибки модели в таком виде:

$$\Delta = \sum_{i=1}^8 [\rho_i(\lambda)]^{\frac{1}{n}} s_i - [\rho_{\text{изм}}(\lambda)]^{\frac{1}{n}}. \quad (10)$$

Производная этой функции определяется как

$$\frac{d\Delta}{dn} = \sum_{i=1}^8 \frac{[\rho_i(\lambda)]^{\frac{1}{n}} s_i \cdot \ln \rho_i(\lambda)}{n^2} + \frac{[\rho_{\text{изм}}(\lambda)]^{\frac{1}{n}} \cdot \ln \rho_{\text{изм}}}{n^2}, \quad (11)$$

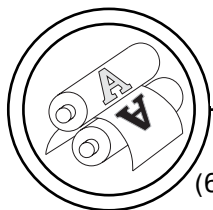
Для этой функции построен график, из которого видно, что производная имеет экстремум при $n = 1,6$, соответствующий минимуму функции ошибки.

С найденным значением коэффициента n рассчитаны коэффициенты отражений, а затем и цветовые координаты растровых однокрасочных полей. В среднем для полей шкалы цветовое различие составило $\Delta E = 3,78$.

Аналогичным образом найдены цветовые координаты растровых полей с двухкрасочными наложениями, для которых среднее цветовое различие равно $\Delta E = 41,93$. Цветовое различие слишком велико, для прогноза цвета необходимо применить уравнения Демишеля (1) и уравнение Нейгебауэра в общей форме (3) с учетом коэффициента Юла-Нильсена, равного 1,6. В этом случае точность прогноза цвета растрового поля составила $\Delta E = 4,51$.

Среднее значение цветового различия уменьшилось до нормы. Однако на практике такое цветовое различие не гарантирует высокой точности цветовоспроизведения. Кроме того, цветовое различие для некоторых полей превысило норму, следовательно, на оттиске возможны области, где цвет будет сильно отличаться от оригинала.

Для исследования возможности прогнозировать цвет оттиска с двухкрасочным наложением при помощи теории Кубелки-Мунка, использованы значения коэффициентов отражения растровых полей $\rho_{\text{изм}}(\lambda)$, полученных с помощью спектрофотометра. На основании формул



ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ

(6-8) найдены значения функций Кубелки-Мунка и построены их графики. Из графиков видно, что для двухкрасочных комбинаций желтой и пурпурной, а также пурпурной и голубой красок значения функции значительно разнятся в интервале длин волн 450-600 нм. При наложении желтой и голубой краски графики близки.

Выводы

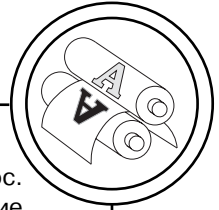
Применение классической модели Нейгебауэра с учетом краевого эффекта и вероятностного подхода Демишеля обеспечивает приемлемую для полиграфии точность прогнозирования цвета растрового оттиска и позволяет применять колориметрические методы сравнения, широко распространенные в полиграфической практике. Однако, такая точность не обеспечивает высококачественного воспроизведения цветов, когда

цветовые различия должны быть менее 4 ΔE.

Простой закон аддитивности и пропорциональности, положенный в основу уравнения Нейгебауэра, не может быть применен к модели Кубелки-Мунка. Кроме того, модель предполагает, что красочный слой на поверхности основы равномерен. Но в растровой печати краска распределена по основе в виде сгустков, не образуя почти нигде сплошных слоев. Еще одним серьезным недостатком модели является то, что для сравнения цветов необходимо перевести полученные значения функций Кубелки-Мунка в координаты аппаратно-независимых цветовых пространств (например, CIE-Lab). На практике это сложно реализовать, так как требуются дополнительные сведения, как правило, не доступные полиграфистам.

1. Balasubramanian R. Colorimetric Modeling of Binary Color Printers / R. Balasubramanian // Proc. of IEEE International Conference on Image Processing. — Washington. — 1995. — vol. 2. — P. 327—330.
2. Emmel P. Towards a color prediction model for printed patches / P. Emmel, R. D. Hersch // IEEE Computer Graphics Appl. — 1999. — № 19(4). — P. 54—60.
3. Amidror I. Neugebauer and Demichel : dependence and independence in n-screen superpositions for colour printing / I. Amidror, R. D. Hersch // Color Res. Appl. — 2000. — № 25(4). — P. 267—277.
4. Agar U. Model Based Color Separation for CMYKcm Printing / U. Agar // IS&T/SID 9 Color Imaging Conference. — 2001.
5. Chen Y. A Multi-Ink Color-Separation Algorithm Maximizing Color Constancy / Y. Chen, R. S. Berns, L. A. Taplin, F. H. Imai, C. F. Carlson // IS&T/SID Eleventh Color Imaging Conference. — 2003. — P. 277—281.
6. Neugebauer H. Die theoretischen Grundlagen des Mehrfarbenbuchdrucks / H. Neugebauer // Zeitschrift fur wissenschaftliche Photographie. — 1937. — № 36(4). — P. 73—89 (in German).
7. Kubelka P. Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche / P. Kubelka, F. Munk // Zeitschrift fur technische Physik. — 1931. — № 12. — P. 593—601 (in German).
8. Clapper F. R. The effect of multiple internal reflections on the densities of half-tone prints on paper / F. R. Clapper, J. A. C. Yule // J. Optical Soc. Am. — 1953. — № 43(7). — P. 600—603.
9. Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике ; пер. с англ. под ред. Л. Ф. Артюшина. — М. : Мир, 1978. — 592 с.
10. Heuberger K. J. Color transforma-

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ



tions and lookup tables / K. J. Heuberger, Z. M. Jing, S. Persiev // Proc. TAGA/ISCC. — 1992. — № 2. — P. 863—881. 11. Нюберг Н. Д. Теоретические основы цветной репродукции / Н. Д. Нюберг. — М. : Сов. наука, 1948. 12. Demichel E. Le Procédé / E. Demichel. — 1924. — № 26(3). — P. 17—21. 13. Yule J. A. C. Principles of Color Reproduction / J. A. C. Yule. — New York : Wiley & Sons, 1967. — 212 p. 14. Tzeng D. Spectral-Based Six-Color Separation Minimizing Metamerism / D. Tzeng, R. S. Berns // Proc. of 8 IS&T/SID Color Imaging Conference. — Scottsdale, 2000. — P. 342—347. 15. Шашлов Б. А. Цвет и цветовоспроизведение / Б. А. Шашлов. — М. : Изд-во МГАП «Мир книги», 1995. — 316 с. 16. CIE Technical Report 116, Industrial Color Difference Evaluation, CIE. — Vienna, 1995.

Надійшла до редакції 09.09.09