

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ТЕЛЕВІЗІЙНОЇ КОЛОРИМЕТРІЇ

МАЗУРКЕВИЧ О. Ф.,
ОНАЗ ім. О.С. Попова, ДП УНДІРТ

ACTUAL PROBLEMS OF TELEVISION COLORIMETRY

MAZURKIEWICH O. F.

Анотація Розглянуто дослідження МакАдама, Брауна, Вишецького та Філдера з оцінювання порогових та надпорогових властивостей зору. Приведено детальне описання лінійних та нелінійних проективних перетворень колірної діаграми (x, y) . Сформульовано основні проблеми телевізійної колориметрії, які потребують вирішення.

Annotation Threshold and supra threshold eye characteristics research by MacAdam, Brown, Wyszecki, Fielder are reviewed. Linear and nonlinear transformations of chromaticity diagram (x, y) are present. Actual problems of television colorimetry are formulated.

ВСТУП

На сьогоднішній день, з огляду на широке впровадження технологій великого екрану та телебачення високої чіткості, більш актуальною стала проблема якості кольоровідтворення зображень. Зазвичай в телебаченні використовують три поняття точності відтворення кольору: фізична точність (відповідність спектральних складів оригіналу та зображення), фізіологічна точність (візуальна нерозрізненість кольорів), психологічна точність (висока суб'єктивна оцінка якості кольоровідтворення). Поняття фізична точність формулює умову відтворення не кольору, а променевого потоку. Тому для відтворення кольору необхідною та достатньою є умова фізіологічної або колориметричної точності, тобто точність кольоровідтворення може бути колориметричною або психологічною [1]. Така точність вимагає об'єктивних та суб'єктивних методів контролю кольоровідтворення відповідно.

Розробка методів оцінки колірних розбіжностей являє собою предмет вищої метрики кольору. Для оцінювання колірних розбіжностей необхідно, щоб відстань в колірному просторі між точками, які відповідають двом кольорам, відповідала візуально рівній відмінності цих кольорів. Але існуючі методики та метрики оцінки якості кольоровідтворення зображень не до кінця враховують специфіку сприйняття зоровим аналізатором людини відмінностей у кольорі. Їх було побудовано на основі експериментальних даних МакАдама з розрізнення ледве помітних колірностей, в яких не враховано порогові властивості зору щодо розрізнення яскравісних відмінностей. Тому існуючі метрики [7] можна назвати рівноконтрастними умовно, оскільки вісь яскравості побудована шляхом послідовного поділення навпіл між максимальною та мінімальною яскравістю.

Експериментальні дані щодо порогового та надпорогового розрізнення кольорів опубліковано в роботах МакАдама [2, 3], Брауна [3, 4], Вишецького [5] та Філдера [6]. Слід зазначити, що ці експериментальні дані є складно відтворюваними через високий ступінь залежності даних від стану спостережачів, навіть за однакових умов спостереження. Методологія проведення експериментів Брауна та МакАдама, Брауна, Вишецького та Філдера базувалась на технології змішування трьох основних кольорів для отримання бажаного кольору для порівняння з фіксованим кольоровим стимулом. Методика, використана МакАдамом, дозволя-

ла спостерігачу змінювати колірність випробувального стимулу тільки вздовж прямих ліній на діаграмі колірності, яскравість випробувального стимулу залишалась незмінною.

1 ЕКСПЕРИМЕНТИ З ПОРОГОВОГО ТА НАДПОРОГОВОГО РОЗРІЗНЕННЯ КОЛЬОРІВ

1.1 ЕКСПЕРИМЕНТ МАКАДАМА

Перше систематичне дослідження з оцінювання порогових властивостей зору на різних ділянках колірних діаграм було проведено МакАдамом у 1942 році [2]. Дослідження включало в себе урівнювання за колірністю двох стимулів – фіксованого та випробувального.

Результатом досліджень стали еліпси різних діаметрів, побудованих навколо 25 точок з фіксованою колірністю (Таблиця 1). Еліпси було побудовано на основі результатів приблизно 20000 експериментів з урівнювання спостерігачем PGN з нормальним кольоровим зором та являють собою геометричне місце точок однаково сприйманих колірностей. Півосі еліпсів дорівнюють середньоквадратичним помилкам встановлення колірних рівностей спостерігачами за однакової яскравості для всіх еліпсів (48 кд/м^2). Довжину півосей приймають за поріг кольоророзрізнення.

Таблиця 1 – Спостережувані та розраховані дані з урівнювання за колірністю на основі нормального розподілу колірних розбіжностей щодо фіксованої колірності (МакАдам, 1945)

Координати центру		Дані спостереження			Розраховані дані		
x_0	y_0	10^3a	10^3b	θ	10^3a	10^3b	θ
0,160	0,057	0,85	0,35	62,5	0,94	0,30	62,3
0,187	0,118	2,20	0,55	77,0	2,31	0,44	74,8
0,253	0,125	2,50	0,50	55,5	2,49	0,49	54,8
0,150	0,680	9,60	2,30	105,0	9,09	2,21	102,9
0,131	0,521	4,70	2,00	112,5	4,67	2,10	110,5
0,212	0,550	5,80	2,30	100,0	5,63	2,30	100,0
0,258	0,450	5,00	2,00	92,0	5,54	2,08	88,5
0,152	0,365	3,80	1,90	110,0	3,81	1,86	111,0
0,280	0,385	4,00	1,50	75,5	4,26	1,46	74,6
0,380	0,498	4,40	1,20	70,0	4,23	1,32	69,4
0,160	0,200	2,10	0,95	104,0	2,08	0,94	95,4
0,228	0,250	3,10	0,90	72,0	3,09	0,82	70,9
0,305	0,323	2,30	0,90	58,0	2,55	0,68	57,2
0,385	0,393	3,80	1,60	65,5	3,70	1,48	65,5
0,472	0,399	3,20	1,40	51,0	3,21	1,30	54,0
0,527	0,350	2,60	1,30	20,0	2,56	1,27	22,8
0,475	0,300	2,90	1,10	28,5	2,89	0,99	29,1
0,510	0,236	2,40	1,20	29,5	2,40	1,15	30,7
0,596	0,283	2,60	1,30	13,0	2,49	1,15	11,1
0,344	0,284	2,30	0,90	60,0	2,24	0,97	33,7
0,390	0,237	2,50	1,00	47,0	2,43	0,98	44,2
0,441	0,198	2,80	0,95	34,5	2,73	0,90	38,6
0,278	0,223	2,40	0,55	54,0	2,34	0,61	60,3
0,300	0,163	2,90	0,95	40,0	3,01	0,60	53,4
0,365	0,153	3,60	0,60	57,5	4,12	0,90	65,7

1.2 ЕКСПЕРИМЕНТИ БРАУНА ТА БРАУНА–МАКАДАМА

У 1949 році Брауном та МакАдамом було проведено дослідження з оцінювання порогового розрізнення кольорових розбіжностей [3]. Випробування проводились для 38 фіксованих стимулів двома спостерігачами (WRJB та DLM). Яскравості порівнюваних стимулів змінювались в діапазоні від 1 кд/м^2 до 34 кд/м^2 . На основі експериментальних даних Брауном та МакАдамом було побудовано 38 еліпсоїдів кольоророзрізнення, на базі яких можна побудувати рівноконтрастний колірний простір з урахуванням даних про пороги розрізнення як колірності, так і яскравості. Детальний опис проведення експерименту Брауна-МакАдама та довжину півосей поперечних перерізів еліпсоїдів для відповідних рівнів яскравості представлено в [7].

У подальших дослідженнях з порогового кольоророзрізнення Брауном у 1957 р. [4] було отримано 22 еліпсоїди з центрами в широкому діапазоні колірностей та яскравістю від $10,3 \text{ кд/м}^2$ до $20,6 \text{ кд/м}^2$, причому експеримент проводився з залученням 12 спостерігачів. Еліпсоїди було побудовано шляхом вагового усереднення експериментальних даних всіх спостерігачів. Поперечні перерізи еліпсоїдів Брауна надано в [7].

1.3 ЕКСПЕРИМЕНТИ ВИШЕЦЬКОГО ТА ФІЛДЕРА

В роботах Вишецького (1965) [5] й Вишецького та Філдера (1971) [6] було представлено дані з урівнювання великих колірних розбіжностей, тобто розбіжностей, в декілька разів більших за поріг кольоророзрізнення. Експеримент проводився з використанням трьох шестикутних полів діаметром 3° кожний, що їх було розташовано у білому оточенні яскравістю 6 кд/м^2 . Спостерігачам (GF, AR та GW) пропонувалося оцінити різницю в кольорі для кожного з шестикутників попарно. Кінцеве урівнювання досягалось за однаково сприйманої яскравості та колірності для трьох шестикутників разом. Експеримент було проведено для 28 фіксованих стимулів яскравістю 12 кд/м^2 . Таким чином, результатом дослідження стали 28 еліпсоїдів розрізнення великих кольорових розбіжностей [7].

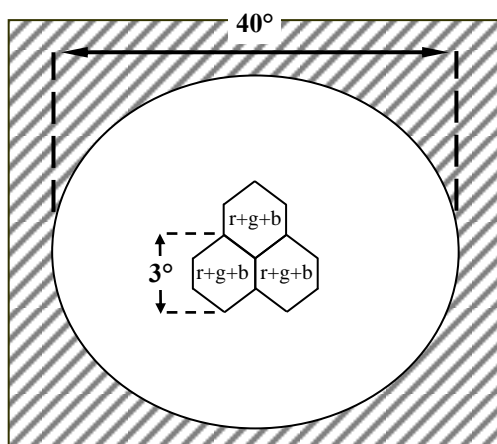


Рисунок 1 - Діаграма проведення експерименту Вишецького та Філдера з урівнювання колірностей

2 ПРОЕКТИВНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ДІАГРАМИ КОЛІРНОСТЕЙ (x, y) НА ОСНОВІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ МАКАДАМА

З робіт МакАдама випливає, що для отримання рівноконтрастної колірної діаграми слід знайти таке проективне перетворення колірної графіку (x, y) , щоб еліпси стали близькі до кіл рівного діаметру. МакАдам провів ретельний аналіз власних експериментальних даних шляхом лінійного та нелінійного перетворення колірної графіку МКО 1931, однак жодним із перетворень йому не вдалося досягти перетворення еліпсів в ідеальні кола рівного діаметру. Нижче наведено їх аналіз, базований на п.8.2 та 8.3 в [8].

2.1 ЛІНІЙНІ ПРОЕКТИВНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ КОЛІРНОЇ ДІАГРАМИ (x, y)

В цілому кожна модифікація колірної діаграми (x, y) до 1960 року являє собою білінійне перетворення двох прямокутних координат:

$$\begin{aligned} u &= \frac{c_1 x + c_2 y + c_3}{c_4 x + c_5 y + c_6}, \\ v &= \frac{c_7 x + c_8 y + c_9}{c_4 x + c_5 y + c_6} \end{aligned} \quad (1)$$

Будь-яка колірна діаграма, визначена за цими формулами, буде являти проективне перетворення діаграми (x, y) .

Кожна вертикальна пряма діаграми (x, y) у результаті перетворення відображається вертикальною прямою на діаграмі (u, v) . Всі паралельні прямі на діаграмі (x, y) у результаті перетворення відображаються на діаграмі (u, v) лініями, що сходяться в одній окремій точці діаграми. Різні сукупності паралельних ліній діаграми (x, y) відображаються точками перетину прямих, які розташовані на окремій прямій лінії діаграми (u, v) . Ця лінія діаграми (u, v) називається лінією, що співвідноситься з нескінченністю, діаграми (x, y) . Рівняння цієї лінії можна отримати, якщо знаменник формули (1) прирівняти до нуля:

$$c_4 x + c_5 y + c_6 = 0 \quad (2)$$

Лінія, що співвідноситься з нескінченністю, таким чином проходить через дві точки $(c_6/c_4, 0)$ та $(0, -c_6/c_5)$.

Для отримання проективного перетворення діаграми, в якій однаково сприйманим колірним розбіжностям відповідають рівні відстані між парами точок, необхідно, щоб розподілення відстаней ледве помітних колірних розбіжностей вздовж прямих ліній на діаграмі (u, v) змінювалось за параболою з вертикальними спрямованими вверх гілками та з вершиною, що має значення нуль. Вершини парабол вздовж різних прямих ліній на діаграмі (x, y) мають розташовуватись на окремій прямій лінії – лінії, що співвідноситься з нескінченністю, проективного перетворення. Розподілення точок ледве помітних колірних розбіжностей вздовж будь-якої лінії на діаграмі (x, y) має бути пропорційним до квадрату відстані найближчої пари точок колірності від перетину цієї лінії з лінією, що співвідноситься з нескінченністю. Більш того, дві дотичні кожної пари еліпсів рівно сприйманих колірностей на діаграмі (x, y) мають перетинатись на лінії, що співвідноситься з нескінченністю.

Жодна з цих вимог зі знаходження лінії, що співвідноситься з нескінченністю, не підтверджується до кінця експериментальними даними з урівнювання колірних розбіжностей. Кожне лінійне проективне перетворення діаграми (x, y) не виражає у явному вигляді зв'язок між однаково сприйманими колірними розбіжностями та експериментальними даними Ма-

кАдама. З цього випливає вирішальна важливість знаходження лінії, що співвідноситься з нескінченністю. Константи $c_1, c_2, c_3, c_6, c_7, c_8$ виразу (1) керують тільки розташуванням, поворотом та відносними масштабами шкал колірної діаграми. Ці константи не впливають на відносне розподілення колірностей вздовж будь-яких окремих ліній на діаграмі. На розташування лінії, що співвідноситься з нескінченністю, тобто на розподілення колірностей вздовж ліній, впливають тільки відношення c_4/c_6 та c_5/c_6 .

МКО у 1960 році було рекомендовано наступні формули проективного перетворення колірної діаграми (x, y) :

$$\begin{aligned} u &= \frac{4c}{\langle 2y - 2x + 3 \rangle} \\ v &= \frac{6y}{\langle 2y - 2x + 3 \rangle} \end{aligned} \quad (3)$$

В цьому випадку лінією, що співвідноситься з нескінченністю, діаграми (x, y) є лінія $u - 4v + 2 = 0$. Лінія, що співвідноситься з нескінченністю, колірної діаграми (u, v) $12y - 2x + 3 = 0$ проходить через точки $x = 1,5, y = 0$ та $x = 0, y = -0,25$.

Всі подальші перегляди колірної діаграми МКО 1960 тільки розтягнули діаграму на 50 % вертикально та не внесли жодних змін у визначення лінії, що співвідноситься з нескінченністю, діаграми (x, y) .

2.2 НЕЛІНІЙНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ КОЛІРНОЇ ДІАГРАМИ (x, y)

Крім лінійного перетворення колірної діаграми було зроблено декілька спроб побудувати діаграму яка б відображала ледве помітні розбіжності кольору однаковими відстанями між точками, причому лінії, вздовж яких координати x та y постійні, можуть бути представлені кривими. Таке перетворення отримало назву нелінійне перетворення колірної діаграми (x, y) .

Колірну діаграму МКО 1960 було поділено на ряд трикутників різної площини. Координати x та y , які відповідають вершинам трикутників було обчислено з наступних рівнянь $x = 1,5u / u - 4v + 2$, $y = v / u - 4v + 2$. Довжина кожної сторони кожного трикутника пропорційна помітності колірних розбіжностей.

Обчислення колірних розбіжностей так, щоб довжина кожної сторони кожного трикутника була однаковою проводять наступним чином:

координати колірності кожної вершини для постійної яскравості $Y=50$ кд для всіх урівнюваних кольорів розраховують як $X = 50x/y$, $Z = 50(1 - x - y)/y$. Потім координати піддають перетворенню:

$$\begin{aligned} P &= 0,724X + 0,382Y - 0,098Z, \\ Q &= -0,48X + 1,37Y + 0,1276Z, \\ S &= 0,686Z. \end{aligned} \quad (4)$$

Середина кожного ребра трикутника обчислюється як

$$P = P_1 - P_2 / 2, Q = Q_1 - Q_2 / 2, S = S_1 - S_2 / 2 \quad (5)$$

та їх різниця

$$\Delta P = P_1 - P_2, \Delta Q = Q_1 - Q_2, \Delta S = S_1 - S_2 \quad (6)$$

З виразів (5) та (6) отримують наступні параметри:

$$\begin{aligned}
 d^2 &= P^2 + Q^2, \\
 a^2 &= 1,73 \times 10^{-5} d^2 \left/ \left[1 + 2,73 P^2 Q^2 / P^4 + Q^4 \right] \right. \\
 b^2 &= 3,098 \times 10^{-4} S^2 + 0,2015 Y^2 \\
 \Delta C_{rg} &= Q \Delta P - P \Delta Q / d \\
 \Delta L &= P \Delta P + Q \Delta Q / d \\
 \Delta C_{yb} &= S \Delta L / d - \Delta S
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Тоді колірні розбіжності в одиницях стандартного відхилення урівнювання спостерега-
чем обчислюють як:

$$\Delta E = \sqrt{0,0778 \Delta L/a^2 + \Delta C_{rg}/a^2 + \Delta C_{yb}/b^2}
 \tag{8}$$

Таким чином отримані трикутники складають в такому ж порядку, як їх було поділено, причому трикутники розташовували якнайближче один до одного на площині. Крім того, їх розташовували за критерієм мінімуму середньоквадратичних відстаней між вершинами трикутників, що відповідають однаковим координатам. Вершини не співпадаючих трикутників обирали за критерієм найближчого можливого представлення на площині. Таким чином, було отримано графік в якому стандартні відхилення урівнювання за колірністю представляються майже рівними відстанями на площині.

За допомогою програмного покрокового розрахунку лінійної регресії МакАдамом було отримано формули для горизонтальної ξ та вертикальної η точок координат:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \end{bmatrix} &= F \left(\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \right), \\
 F \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 3751a_1^2 - 10a_1^4 - 520b_1^2 + 13295b_1^3 + 32327a_1b_1 - \\ 25491a_1^2b_1 - 41672a_1b_1^2 + 10a_1^3b_1 - 5227a_1^{1/2} + 2952a_1^{1/4} \\ 404b_2 - 185b_2^2 + 52b_2^3 + 69a_2 \sqrt{1-b_2^2} - 3a_2^2b_2 + 30a_2b_2^3 \end{bmatrix}, \\
 a_1 &= \frac{10x}{2,4x+34y+1} \quad b_1 = \frac{10y}{2,4x+34y+1} \\
 a_2 &= \frac{10x}{4,2y-x+1} \quad b_2 = \frac{10y}{4,2y-x+1},
 \end{aligned}$$

де x, y – координати колірності МКО-31.

ВИСНОВОК

У зв'язку з вищенаведеним, актуальною постає задача інтеграції даних з порогового та надпорогового сприйняття кольору, що існують в світі. Першим кроком її вирішення може стати побудова порогової моделі кольоророзрізнення, на базі якої може бути побудо-

вано рівноконтрастний колірний простір з урахуванням даних про пороги розрізнення як колірності, так і яскравості.

Література

1. **Певзнер Б. М.** Качество цветных телевизионных изображений – М.: Радио и связь – 1988, с. 222.
2. **MacAdam D.** Visual sensitivities to color differences in daylight, J. Opt. Soc. Am., 32, 247, 1943.
3. **Brown W., MacAdam D.** Visual sensitivities to combined chromaticity and luminance differences, J. Opt. Soc. Am., 39, 808, 1949.
4. **Brown W.** Color discrimination of twelve observers, J. Opt. Soc. Am., 47, 137, 1957.
5. **Wyszecki G.** Matching color differences, J. Opt. Soc. Am., 55, 1319, 1965.
6. **Wyszecki G., Fielder G.** Color-difference matches, J. Opt. Soc. Am., 61, 1501, 1971.
7. **Wyszecki G., Stiles W. S.** Color Science, second edition, Wiley Classics Library Edition, USA, 2000.
8. **MacAdam D.L.** Color Measurement, second revised edition, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo, 1985.