

зависимость их отношения. При этом обеспечить достаточную яркость изображения, чтобы восприятие цвета происходило с минимальными искажениями, например, чтобы не наблюдался эффект Пуркунье (известно, что при малой яркости цвета теряют насыщенность, например, оранжевый и желтый цвета воспринимаются как коричневые), а также, чтобы разрешающая способность и контрастная чувствительность глаза были высоки.

В телевидении, как известно, элементы изображения воспроизводятся на экране телеприемника последовательно во времени, что может привести к мерцанию яркости и цветности. Замечено, что глаз человека гораздо чувствительнее к мерцанию яркости цвета, чем к мерцанию цветности. Поэтому детали равной яркости, но различной цветности могут быть крупнее, чем неокрашенные детали различной яркости при той же самой максимальной яркости и заметность их мелькания будет при этом такой же, как и для неокрашенных деталей [53].

Профессор Н.Д. Ньюберг предложил в 1948 г. использовать три понятия точности воспроизведения цвета [2]:

1. физическая точность воспроизведения цвета, когда спектральные составы излучения оригинала и изображения совпадают;
2. физиологическая точность воспроизведения, когда ощущения цветов оригинала и его изображения одинаковы;
3. психологическая точность воспроизведения, когда изображение оценивается наблюдателем как высококачественное, хотя физиологическая точность не удовлетворительна.

На практике физическая точность воспроизведения цвета не выполнима, поскольку спектральное распределение энергии излучения основных цветов экрана телеприемника, в процессе воспроизведения, не меняется (меняется только амплитуда всего спектра излучения каждого из основных цветов экрана). Поэтому цвета оригинала и его изображения являются метамерами.

К физиологической точности надо стремиться, и при этом психологическая точность цветовоспроизведения должна выполняться обязательно.

В цветном телевидении принято пользоваться следующими оценками точности воспроизведения цветов [54]:

1. Колориметрическая точность цветности изображения – для оценки искажения координат цветности x , y системы МКО 1931 г (или u , v системы МКО 1860) в изображении относительно оригинала;
2. Психологическое качество (психологическая точность) цветного изображения – для качественной оценки допустимости искажений цвета, относительно оригинала при визуальном сравнении изображения с оригиналом (что далеко не всегда возможно для телезрителя, сравнение происходит, в этом случае, по памяти).

При психологической точности воспроизведения цвета следует учитывать, что восприятие цветности знакомых предметов (цвет лица, воды, неба, травы и т.д.) является более критичным, чем воспроизведение цветности мало-знакомых или совсем не знакомых предметов. Кроме того,

если данная цветность имеет какое-то важное смысловое значение, то искажения ее не должно быть большим.

При воспроизведении цветного изображения следует учитывать влияние цветовой адаптации. Цветовая адаптация наблюдателя в студии зависит от средней освещенности сцены, которая обычно изменяется в процессе наблюдения, а цветовая адаптация телевизионного наблюдателя (зрителя) зависит от условий освещения помещения, которое мало меняется и длительное время сохраняется без изменений.

Для получения хорошего цветового восприятия в цветном телевидении, необходимо, чтобы при воспроизведении объектов с одинаковым коэффициентом спектрального отражения по всему оптическому спектру (например, снег, белая бумага и т.д.) глаз воспринимал изображения этих объектов, как белые, не зависимо от спектрального состава источников освещения оригиналов этих объектов. Для достижения этой задачи, обычно выбирают некоторую малонасыщенную цветность C_k . Эту цветность называют контрольной цветностью или опорной, и добиваются, чтобы передача этой опорной цветности происходила без искажений.

Выбор контрольной цветности производится с учетом требований телезрителей, окружающего освещения и технических возможностей. В цветном телевидении в качестве опорного белого выбирают цветность стандартных источников белого света C или $D6500K$.

Искажения отдельных цветностей часто менее заметны, если имеют место искажения и других цветностей, так

чтобы между всеми воспроизводимыми цветностями имелись правильные интервалы [54].

На восприятие цвета в большей степени влияет характер наблюдаемой поверхности передаваемого объекта, в частности ее размеры и форма, гляцевитость и блескость, матовость и т.п. Различие этих параметров иногда не позволяет достигнуть согласование цветов.

Для построения аппаратуры, воспроизводящей цвет (телеприемники), пользуются понятием колориметрической точности. Изображение считается колориметрически точным, если координаты его цветности x_u, y_u равны координатам цветности оригинала x_o, y_o при измерении объективным колориметром. Этот метод оценки качества цветовоспроизведения позволяет делать колориметрические расчеты технических средств и количественно оценивать цветовые ошибки воспроизведения цвета. Принято считать, что эти ошибки (различие между координатами цветности x_o и x_u , y_o и y_u) не должны превышать нескольких порогов цветоразличения (в главе 4 о порогах цветоразличения сказано подробнее).

При одновременном наблюдении изображения и оригинала в одинаковых условиях следует стремиться к получению высокой колориметрической точности изображения. Однако телезритель в основном не видит оригинала, а оценивает качество цветов путем сравнения их друг с другом, с цветами предметов, находящихся в его окружении, с цветами, сохранившимися в памяти. Это может привести к тому, что колориметрически точные цвета будут оценены зрителем менее благоприятно, чем при наблюдении изображения, содержащего колориметрические ошибки. Оче-

180

видно, для хорошего цветовоспроизведения колориметрически точная цветопередача не является обязательной, если есть возможность создать более благоприятные ощущения цветов (психологическая точность) относительно опорного белого цвета. Для достижения этого необходимо иметь данные о том, как влияет цветовая адаптация на восприятие цветности [55].

9.2. Колориметрически правильная цветопередача

Цветовоспроизводящее устройство, например, цветной телевизор, имеет три источника света, создающие основные цвета приемника. Яркость каждого основного цвета должна управляться так, чтобы пропорции смеси основных цветов могли изменяться в широких пределах для получения гаммы цветов. В качестве основных цветов аддитивного воспроизводящего устройства (телеприемника) выбираются красный, зеленый и синий цвета, которые можно обозначить $R_{П}$, $G_{П}$ и $B_{П}$ соответственно. На диаграмме цветности, например, XYZ (рис. 9.1.), (или в любой другой системе) эти основные цвета образуют цветовой треугольник, называемый треугольник цветового охвата. Очевидно, что воспроизводящее устройство может создать только те цветности, которые на диаграмме цветности находятся внутри треугольника цветов $R_{П}$, $G_{П}$, $B_{П}$. Воспроизведение цветов, лежащих вне этого треугольника, невозможно. Цвета оригинала, лежащие за пределами треугольника, будут воспроизводиться с искажениями насыщенно-

сти и цветового тона. Для колориметрически правильного цвета оригинала, находящегося на хроматической диаграмме внутри треугольника цветового охвата, необходимо, что бы основные цвета отвечали следующими требованиями: имели правильные относительные количества (пропорции смеси) для создания необходимой цветности изображения; имели правильные абсолютные количества (яркости) для создания необходимой яркости изображения.

Пусть имеется следующая линейная зависимость для каждого элемента передаваемого изображения (оригинала) и его изображения:

$$X_O = k_1 X_{И}; \quad Y_O = k_2 Y_{И}; \quad Z_O = k_3 Z_{И}, \quad (9.1)$$

где k_1, k_2, k_3 – константы; индекс «O» означает оригинал, а индекс «И» - изображение. Тогда координаты цветности будут равны:

$$\left. \begin{aligned} x_O &= \frac{X_O}{X_O+Y_O+Z_O} = \frac{k_1 \cdot X_{И}}{k_1 \cdot X_{И}+k_2 \cdot Y_{И}+k_3 \cdot Z_{И}}, \\ y_O &= \frac{Y_O}{X_O+Y_O+Z_O} = \frac{k_2 \cdot Y_{И}}{k_1 \cdot X_{И}+k_2 \cdot Y_{И}+k_3 \cdot Z_{И}}, \\ z_O &= \frac{Z_O}{X_O+Y_O+Z_O} = \frac{k_3 \cdot Z_{И}}{k_1 \cdot X_{И}+k_2 \cdot Y_{И}+k_3 \cdot Z_{И}}. \end{aligned} \right\} \quad (9.2)$$

$$\text{Если} \quad k_1 = k_2 = k_3 = k, \quad (9.3)$$

то из (9.2) получим:

$$x_O = x_{И}; \quad y_O = y_{И}; \quad z_O = z_{И}. \quad (9.4)$$

Итак, при выполнении (9.1) и (9.3) цветности передаваемого объекта и его изображение на экране телеприемника колориметрически тождественны. Так как яркости (в абсолютных или относительных величинах) передаваемой сцены и изображения равны соответственно:

$$L_O = Y_O; \quad L_{И} = Y_{И}, \quad (9.5)$$

То, подставляя (9.5) в (9.1), получим:

$$L_O = k_2 \cdot L_{И}. \quad (9.6)$$

Это есть следствие из первого условия колориметрически точной цветопередачи (9.1).

Зависимость между L_O и $L_{И}$ обычно в телевидении выражается в виде:

$$L_{И} = C \cdot L_O^\Gamma, \quad (9.7)$$

где C – константа, Γ – градиент передачи яркости.

Функция $\lg(L_{И}) = \lg(C) + \Gamma \cdot \lg(L_O)$ является линейной в логарифмическом масштабе.

Следовательно, для выполнения условия (9.6) необходимо иметь:

$$\Gamma = 1, \quad (9.8)$$

В этом случае градации яркости воспроизводятся без искажений.

В телевизионной системе $\Gamma = \gamma \cdot \gamma_Z$, где γ – градиент яркости передающего тракта, включая датчик телевизионного сигнала (передающая камера), γ_Z – градиент преобразователя сигнал-свет (экран телеприемника) вместе с трактом приемника.

Для выполнения условия (9.8) необходимо иметь:

$$\gamma = \gamma_Z^{-1}. \quad (9.9)$$

Это условие обычно достигается с помощью гамма-корректора, и удовлетворительна работа которого возможно только тогда, когда величина γ_Z постоянна во всем диапазоне яркостей изображения (для всех трех основных цветов экрана телеприемника) и величина γ постоянна во

всем диапазоне яркостей передаваемого объекта для трех передаваемых основных цветов.

На рис. 9.2 показано влияние значения гаммы на искажение воспроизведение цветности.

Согласно [54] отклонения величины γ_Z в цветном телевидении должна быть не более $\pm 4\%$ от номинальной величины как для трех цветовых каналов одного экрана телеприемника, так и для всех экранов отдельных приемников. На рис. 9.3. показана схема преобразования свет в сигнал и сигнал в свет в цветном телевидении для случая, когда экран телеприемника является линейным прибором (т.е. величина γ_Z для его модуляционной характеристики равна единице). Такой приемник называется линейный.

Передающая камера содержит светрасщепляющую оптику СРО, разделяющую световой поток F_0 от передаваемой сцены на три световых потока – красный F_{R0} , зеленый F_{G0} и синий F_{B0} . Эти световые потоки попадают на преобразователи свет-сигнал, соответственно красного, зеленого и синего каналов (ПСС_R, ПСС_G и ПСС_B).

Далее, электрические сигналы E_i , где $i = R, G$ и B (эти индексы будут сохранены и далее) поступают на соответствующие видеоусилители ВУ_{*i*}, имеющие коэффициенты передачи b_1, b_2 и b_3 соответственно. Усиленные сигналы поступают на экран телеприемника и излучающий световые потоки $F_{и}$. При аддитивном сложении эти световые потоки создают количества основных цветов экрана, равных $R_{пи}, G_{пи}$ и $B_{пи}$, смесь которых воспроизводит цветность передаваемой сцены. Эти количества должны быть равны (или пропорциональны) координатам цвета $R_{по}, G_{по}$ и $B_{по}$ передаваемой сцены. Последние можно определить как:

$$\begin{aligned}
 R_{\Pi 0} &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{r}_{\Pi} P_{\lambda} \partial \lambda; \\
 G_{\Pi 0} &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{g}_{\Pi} P_{\lambda} \partial \lambda; \\
 B_{\Pi 0} &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{b}_{\Pi} P_{\lambda} \partial \lambda,
 \end{aligned}
 \tag{9.10}$$

где \bar{r}_{Π} , \bar{g}_{Π} , \bar{b}_{Π} - удельные координаты спектральных цветов в системе $R_{\Pi}G_{\Pi}B_{\Pi}$; P_{λ} —спектральная плотность энергии, излучаемой передаваемой сценой.

Но, с другой стороны, сигналы E_R , E_G , E_B на выходе видеоусилителей передающей камеры равны:

$$\begin{aligned}
 E_R &= a'_R \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_R \cdot P_{\lambda} \partial \lambda; \\
 E_G &= a'_G \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_G \cdot P_{\lambda} \partial \lambda; \\
 E_B &= a'_B \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_B \cdot P_{\lambda} \partial \lambda,
 \end{aligned}
 \tag{9.11}$$

где S_R , S_G , S_B - спектральные характеристики чувствительности камеры, мкА/Вт; a'_R , a'_G , a'_B - масштабные коэффициенты для перехода от микроампер к вольтам. Если

$$S_R = \bar{r}_{\Pi}; \quad S_G = \bar{g}_{\Pi}; \quad S_B = \bar{b}_{\Pi},
 \tag{9.12}$$

то из (2.11) и (2.10) можно получить:

$$E_R = a'_R \cdot R_{\Pi 0}; \quad E_G = a'_G \cdot G_{\Pi 0}; \quad E_B = a'_B \cdot B_{\Pi 0}.
 \tag{9.13}$$

Эти сигналы можно назвать линейными и должны быть широкополосными, чтобы в телеприемниках черно-белого и цветного телевидения изображения имели полную четкость независимо от цвета.

Для передаваемой сцены и ее изображения имеем по определению координат цвета:

$$R_{\Pi 0} = \frac{L_{RO}}{L_{[RO]}}; \quad G_{\Pi 0} = \frac{L_{GO}}{L_{[GO]}}; \quad B_{\Pi 0} = \frac{L_{BO}}{L_{[BO]}},
 \tag{9.14}$$

$$R_{\text{ПИ}} = \frac{L_{\text{РИ}}}{L_{[\text{РИ}]}}; \quad G_{\text{ПИ}} = \frac{L_{\text{ГИ}}}{L_{[\text{ГИ}]}}; \quad B_{\text{ПИ}} = \frac{L_{\text{ВИ}}}{L_{[\text{ВИ}]}}. \quad (9.15)$$

где $L_{\text{РО}}, L_{\text{ГО}}, L_{\text{ВО}}, L_{\text{РИ}}, L_{\text{ГИ}}, L_{\text{ВИ}}$ - яркости основных цветов приемника $R_{\text{П}}, G_{\text{П}}, B_{\text{П}}$, необходимые для согласования с цветом передаваемой сцены и с цветом изображения соответственно; $L_{[\text{РО}]}, L_{[\text{ГО}]}, L_{[\text{ВО}]}, L_{[\text{РИ}]}, L_{[\text{ГИ}]}, L_{[\text{ВИ}]}$ - яркости единичных количеств основных цветов $R_{\text{П}}, G_{\text{П}}, B_{\text{П}}$ в системе $R_{\text{П}}G_{\text{П}}B_{\text{П}}$, установленные на одной и той же равностимульной цветности U_p .

Условия неискаженного воспроизведения цветности в телеприемнике (9.1) и (9.3) означает необходимость выполнить следующие равенства:

$$R_{\text{ПИ}} = k \cdot R_{\text{ПО}}; \quad G_{\text{ПИ}} = k \cdot G_{\text{ПО}}; \quad B_{\text{ПИ}} = k \cdot B_{\text{ПО}}. \quad (9.16)$$

Условие (9.16) выполняется, если (9.12) справедливо, а также если

$$R_{\text{ПИ}} = a_1 \cdot E_R; \quad G_{\text{ПИ}} = a_1 \cdot E_G; \quad B_{\text{ПИ}} = a_1 \cdot E_B, \quad (9.17)$$

$$a'_R = a'_G = a'_B = a_0. \quad (9.18)$$

Действительно, подставив (9.13) в (9.17), получим (9.16), если $a_1 \cdot a_0 = k$. Здесь a_l и k - постоянные коэффициенты. Подставим (9.14) в (9.16) и получим при правильной цветопередаче:

$$\left. \begin{aligned} L_{\text{РИ}} &= k \cdot \frac{L_{[\text{РИ}]}}{L_{[\text{РО}]}} \cdot L_{\text{РО}}; \\ L_{\text{ГИ}} &= k \cdot \frac{L_{[\text{ГИ}]}}{L_{[\text{ГО}]}} \cdot L_{\text{ГО}}; \\ L_{\text{ВИ}} &= k \cdot \frac{L_{[\text{ВИ}]}}{L_{[\text{ВО}]}} \cdot L_{\text{ВО}}. \end{aligned} \right\} \quad (9.19)$$

Вследствие выбора одной и той же равностимульной цветности C_p для оригинала и изображения справедливо следующее:

$$\frac{L_{[RI]}}{L_{[RO]}} = \frac{L_{[GI]}}{L_{[GO]}} = \frac{L_{[BI]}}{L_{[BO]}} = a, \quad (9.20)$$

где a – постоянная величина.

Обозначив полную яркость изображения L_M и полную яркость передаваемой сцены L_O , можно записать:

$$L_M = L_{RI} + L_{GI} + L_{BI}; \quad L_O = L_{RO} + L_{GO} + L_{BO}. \quad (9.21)$$

Подставив (9.19) в (9.21) и учитывая (9.20), получим:

$$L_M = a \cdot k \cdot L_O, \quad (9.21)$$

что соответствует (9.8).

И так, для колориметрически верной цветопередачи необходимо соблюдать условие (9.16), для чего должны выполняться условия (9.12), (9.17) и (9.18) и при этом обеспечивается линейная зависимость между яркостью передаваемой сцены и яркостью изображения – выполняется условие (9.8).

Условие (9.12) означает, что спектральные характеристики чувствительности датчиков телевизионного сигнала представляют собой кривые зависимости от длины удельных коэффициентов $\bar{r}_П, \bar{g}_П, \bar{b}_П$ в системе определения цвета, в которой за основные цвета приняты основные цвета приемника $R_П, G_П, B_П$ или является линейно независимыми преобразования этих кривых.

В заключении данного параграфа необходимо сделать следующее замечание. В первых цветных телеприемниках в качестве телевизионного экрана применялся трехлучевой масочный цветной кинескоп, который имеет гамму, равной около 3, причем это значения гаммы-характеристики раз-

лично для каждого из основных цветов. Для обеспечения линейности канала «от света до света» в аппаратуре телецентра устанавливаются гамма-корректоры, имеющие нелинейный коэффициент передачи (обратно пропорциональный закон от величины гаммы для каждого канала R , G , B) в зависимости от величины видеосигнала. С появлением линейных экранов, например, жидкокристаллические панели, имеющие значения гаммы ≈ 1 , необходимость в гамма-корректорах отпадает, но при этом нарушится цветопередача в телеприемниках старого образца (на кинескопах). Что бы качество цветопередачи, как на старые телеприемники, так и на новые оставалась на одном уровне, в новых телеприемниках устанавливаются нелинейные видеоусилители.

9.3. Оптические характеристики датчиков видеосигналов

В камерах цветного телевидения необходимо одновременно проектировать цветоделенные изображения на светочувствительные поверхности нескольких датчиков видеосигнала. Для этого использую довольно сложные оптические системы, которые выполняют как минимум две функции. Первая -фокусировка передаваемого изображения, и вторая – цветоделение, т.е. из оптического спектра, передаваемой сцены, выделяются соответственно красный, зеленый и синий области спектра. Эти цветоделенные изображения передаваемой сцены поступают на светочувст-

вительную поверхность датчиков видеосигнала. На заре появления цветного вещательного телевидения в качестве этих датчиков видеосигнала использовались передающие трубки (видиконы, плюмбиконы, суперортиканы и др.). В настоящее время преимущественно используют приборы с зарядовой связью (ПЗС). Для получения качественной цветной картинки на экране телеприемника, необходимо обеспечить на аппаратно-техническом уровне высококачественные характеристики видеосигнала. На качество цветных видеосигналов в первую очередь влияют спектральные характеристики датчиков и возможность механической коррекции цвета непосредственно в камерном канале телецентра.

9.3.1. Спектральные характеристики чувствительности датчиков видеосигналов

Идеальные спектральные характеристики чувствительности $r_{П}$, $g_{П}$, $b_{П}$ камер цветного телевидения (оптическая система с датчиком) обычно рассчитываются для случая, когда в приемнике применяются основные теоретические цвета NTSC (треугольник основных цветов NTSC) с координатами цветности: красный ($R_{П}$) $x=0,67$, $y=0,33$; зеленый ($G_{П}$) $x=0,21$, $y=0,71$; синий ($B_{П}$) $x=0,14$, $y=0,08$ (на рис. 9.1 показаны реальные треугольники основных цветов современных экранов телеприемника) – и в качестве эталонного и равносигнального цвета (равностимульного в системе основных цветов $R_{П}$, $G_{П}$, $B_{П}$) выбран стандартный белый

цвет С с координатами цветности $x=0,310$, $y=0,316$ [54, 567]. Эти характеристики, описываемые уравнениями (9.23) обеспечивают верное воспроизведение цветов, лежащих в пределах треугольника основных цветов NTSC (рис. 9.4).

$$\left. \begin{aligned} \bar{r}_{\Pi}(\lambda) &= 1,910 \cdot \bar{x}(\lambda) - 0,532 \cdot \bar{y}(\lambda) - 0,288 \cdot \bar{z}(\lambda), \\ \bar{g}_{\Pi}(\lambda) &= -0,985 \cdot \bar{x}(\lambda) + 1,999 \cdot \bar{y}(\lambda) - 0,028 \cdot \bar{z}(\lambda), \\ \bar{b}_{\Pi}(\lambda) &= 0,058 \cdot \bar{x}(\lambda) - 0,118 \cdot \bar{y}(\lambda) + 0,898 \cdot \bar{z}(\lambda). \end{aligned} \right\} (2.23)$$

Где $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ - удельные координаты спектральных цветов.

В Европейском стандарте, утвержденном в 1970 г. [57], рекомендуется производить выбор спектральных характеристик чувствительности передающих устройств, исходя из реального треугольника основных цветов приемника с координатами: красный (R_{Π}) $x=0,640$, $y=0,330$; зеленый (G_{Π}) $x=0,290$, $y=0,600$; синий (B_{Π}) $x=0,150$, $y=0,060$ при эталонном белом цвете D_{6500} на входе кодирующего устройства должно быть $E'_R = E'_G = E'_B$, в полном сигнале на его выходе цветоразностные сигналы равны нулю и на экране телеприемника воспроизводится белый цвет D_{6500} . Таким образом, этот белый цвет является эталонным равносигнальным цветом. Тогда спектральные характеристики чувствительности описываются следующим образом [54]:

$$\begin{aligned} r_{\Pi}(\lambda) &= 7,2630 \cdot x(\lambda) - 3,3036 \cdot y(\lambda) - 1,128 \cdot z(\lambda), \\ g_{\Pi}(\lambda) &= -1,3104 \cdot x(\lambda) + 2,5363 \cdot y(\lambda) + 0,0562 \cdot z(\lambda), \\ b_{\Pi}(\lambda) &= 0,0910 \cdot x(\lambda) - 0,3070 \cdot y(\lambda) + 1,4350 \cdot z(\lambda). \end{aligned}$$

где удельные координаты $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ умножены на 100.

На рис. 9.5 показаны идеальные спектральные характеристики чувствительности, рассчитанные по (9.24).

Как видно из этого рисунка, идеальные спектральные характеристики чувствительности камеры имеют отрицательные участки и вторичный максимум (красный канал R), что практически не представляется возможности их реализации в аппаратуре оптическим способом. Это обстоятельство, приводит на практике к отказу от обеспечения теоретических идеальных кривых. Осуществляется либо только положительные (главные) ветви кривых полностью (рис. 9.6б), либо они сужались в целях компенсации отброшенных отрицательных участков. В обеих случаях имеют место небольшие ошибки в цветопередаче, а колориметрически верная цветопередача выполняется лишь для эталонного цвета на передающей и приемной сторонах. На рис. 9.6а, для сравнения, приведены спектральные трихроматические кривые зрительной системы.

Для практической реализации спектральных характеристик чувствительности телевизионной камеры применяют специальную цветоделительную оптику. Поскольку профессиональные телевизионные камера в настоящее время строятся в основном по двум схемам: с тремя и с четырьмя датчиками телевизионного сигнала, то и их схемы, также разделяются между собой. На рис. 9.7 изображена схема устройства телекамера с тремя датчиками телесигнала, а на рис. 9.8 – схема цветоделительной оптики для телевизионной камеры на четырех датчиках телевизионного сигнала.

Уменьшить ошибки в цветовоспроизведении можно применением специальных схем цветокоррекции, которые и разберем в следующем параграфе.

9.3.2. Цветокоррекция в камерном канале

Цветовые искажения, вызванные реальными спектральными характеристиками чувствительности датчиков телевизионного сигнала, можно использовать электронную коррекцию видеосигналов с матричной схемой, действие которой описывается следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} E'_{RO} &= a_{11} \cdot E'_R + a_{12} \cdot E'_G + a_{13} \cdot E'_B; \\ E'_{GO} &= a_{21} \cdot E'_R + a_{22} \cdot E'_G + a_{23} \cdot E'_B; \\ E'_{BO} &= a_{31} \cdot E'_R + a_{32} \cdot E'_G + a_{33} \cdot E'_B, \end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

где E'_{RO} , E'_{GO} , E'_{BO} - выходные сигналы цветокорректора; E'_R , E'_G , и E'_B - входные сигналы, коэффициенты a_{ij} ($i, j=1-3$) называются коэффициентами маскирования.

На выходе такого корректора получают характеристики, близкие по форме к идеальным спектральным характеристикам чувствительности (рис. 9.4). Величины двух коэффициентов матрицирования должны быть малыми в сравнении с третьим, в противном случае происходит ухудшение отношения сигнал/шум и увеличение заметности цветных окантовок при неточном совмещении сигналов во времени. Кроме того, возникают заметные искажения цвета в зонах переходных процессов сигналов E'_R и E'_B .

Члены с коэффициентами a_{11} , a_{22} и a_{33} представляют собой основные видеосигналы. Остальные члены (9.25) образуют сигнал «маски». Процесс линейной цветокоррек-

ции состоит в подборе величин всех девяти коэффициентов. Для создания баланса белого (неискаженной передачи опорного белого цвета) при изменении коэффициентов маскирования с целью коррекции цвета необходимо выполнить:

$$\begin{aligned} a_{11} + a_{12} + a_{13} &= 1; \\ a_{21} + a_{22} + a_{23} &= 1; \\ a_{31} + a_{32} + a_{33} &= 1. \end{aligned} \quad (9.26)$$

Подставив a_{11} , a_{22} , a_{33} из (9.26) в (9.25) получим:

$$\left. \begin{aligned} E'_{RO} &= E'_R + a_{12} \cdot (E'_G - E'_R) + a_{13} \cdot (E'_B - E'_R); \\ E'_{GO} &= E'_G + a_{21} \cdot (E'_R - E'_G) + a_{23} \cdot (E'_B - E'_G); \\ E'_{BO} &= E'_B + a_{31} \cdot (E'_R - E'_B) + a_{32} \cdot (E'_G - E'_B). \end{aligned} \right\} \quad (9.27)$$

Тогда, согласно (9.27), в цветокорректорах установку выходных видеосигналов можно выполнить шестью независимыми регуляторами. Структурная схема электронного цветокорректора, выполняющего указанные регулировки показана на рис. 9.9.

Для отдельного регулирования цветового тона и насыщенности цвета при сохранении баланса белого используют другие схемы цветокорректора. На рис. 9.10 приведена структурная схема электронного цветокорректора, предложенная Кингом. В этой схеме цветовые сигналы подаются на входы парафазных усилителей 1, 2, 3, на выходах которых появляются разнополярные сигналы. Регуляторы цветового тона 4 и насыщенности цвета 5 включены попарно так, что вращение их ручек не меняет размах видеосигналов при передаче изображения белых объектов.

9.3.3. Принципы построения системы SECAM

Разработка системы SECAM была начата во Франции в 1953 г. инженером Анри де Франсом. Дальнейшие работы, проводимые во Франции, а с 1965г. совместные работы французских и советских специалистов были направлены на доработку системы и оптимизацию ее параметров. В результате была создана система цветного телевидения SECAM, параметры которой в 1974г. были в СССР стандартизированы (ГОСТ 19432 – 74 "Телевидение цветное. Основные параметры системы телевизионного вещания"). Цветное телевизионное вещание по системе SECAM началось в СССР 1 октября 1976г. Кроме СССР и Франции, система SECAM принята для вещания в ГДР, ЧССР, НБР, ВНР, в ряде стран Северной Африки. Название системы SECAM произошло от французских слов Sequence de Coleurs Avec Memoire – поочередность цветов с памятью.

Возможность поочередной передачи цветовых сигналов основывается на особенностях зрительного аппарата человека, позволяющего воспринимать полосу частот сигнала цветности приблизительно до 1,5 МГц. Так как наименьшие по размеру детали передаются сигналами с граничными частотами спектра, составляющими 6-6,5 МГц (сигнал EY), то окрашенные детали будут иметь размер вдоль строки (6МГц/1,5 МГц), в 4 раза больший, чем самые мелкие черно-белые детали. Аналогично можно считать допустимым увеличение в 3-4 раза размера окрашенных мелких деталей в вертикальном направлении. На этом основан принцип поочередной передачи цветоразностных

сигналов в системе SECAM. В системе SECAM из сигналов, поступающих с цветной телевизионной камеры, ER, EG и EB формируются сигналы EY, ER-Y и EB-Y. Эти сигналы формируются непрерывно кодирующей матрицей, т.е. существуют одновременно. Сигнал EY передается непрерывно, как в черно-белом телевидении, а сигналы ER-Y и EB-Y передаются поочередно: в течении одной строки – сигнал ER-Y, в течении следующей – EB-Y и т.д. Таким образом, для передачи используется только часть информации, выдаваемой цветной камерой. Половина строк растра представлена в цветовом сигнале компонентой ER-Y и половина – EB-Y. Иными словами, для сигналов цветности развертка в полном кадре будет содержать вдвое меньше число строк, что приведет к соответствующему увеличению размеров окрашенных деталей по вертикали. Однако общая четкость изображения в вертикальном направлении сохранится, так как сигнал EY передается в полном спектре. В приемнике цветного изображения на модуляторы кинескопа необходимо подавать одновременно три сигнала ER-Y, EB-Y и EG-Y. Для получения непрерывной последовательности сигналов ER-Y и EB-Y и формирования с помощью матрицы третьего цветоразностного сигнала EG-Y в приемнике SECAM, используется ячейка памяти – линия задержки со временем задержки на одну строку $t_{\text{зад}} = T_{\text{стр}} = 64 \text{ мкс}$. При воспроизведении цветного изображения каждый сигнал цветности используется дважды: один раз он берется со входа линии задержки, а другой – с ее выхода. Процесс формирования непрерывных сигналов ER-Y и EB-Y с помощью линии задержки поясняется рис. 9.11. Так как сигналы цветности передаются поочередно

через одну строку, а задержка линии равна длительности одной строки, сигналы цветности на входе и выходе линии оказываются разными, т.е. если в данный момент на входе имеется сигнал ER-Y, то на выходе EB-Y. Таким образом, линия задержки дает возможность всегда иметь одновременно оба сигнала цветности. При этом, однако, предполагается, что в пропущенных строках цветовой сигнал практически не отличается от сигнала соседних. После восстановления непрерывности сигналов ER-Y и EB-Y можно получить с помощью матрицы сигнал EG-Y. Как видно из рис. 9.11, сигналы ER-Y и EB-Y и на входе и на выходе линии задержки периодически меняются местами. Отсюда возникает необходимость соответствующего переключения сигналов так, чтобы на вход канала обработки сигнала R-Y всегда поступал сигнал ER-Y, а на вход канала B-Y – сигнал EB-Y. Для переключения сигналов в приемнике SECAM используется электронный коммутатор. Принцип построения системы SECAM в упрощенном виде поясняется структурными схемами передающей и приемной части, показанными на рис. 9.12. Сигналы ER, EG и EB, полученные с помощью трех передающих трубок в камере, усиливаются и поступают на матрицу, где формируются сигналы EY, ER-Y и EB-Y. С помощью электронного коммутатора, переключающегося после каждой строки, формируется последовательность чередующихся цветоразностных сигналов. Сигналы ER-Y и EB-Y по очереди управляют частотой генератора поднесущей. Полученный ЧМ сигнал в блоке сложения смешивается с сигналом EY и образуется полный цветовой сигнал. В телевизоре необходимо из принятого цветового сигнала сформировать цвето-

разностные сигналы ER-Y, EB-Y и EG-Y. Полный сигнал, содержащий информацию о яркости, и сигнала цветности, передаваемые с помощью поднесущей, имеются на выходе видеоусилителя (рис. 9.12б). С выхода видеоусилителя через полосовой фильтр этот сигнал поступает на вход линии задержки и на электронный коммутатор.

Электронный коммутатор имеет четыре входа и два выхода. Сигнал с выхода линии задержки подается на входные зажимы (1 и 4), а сигнал со входа линии – на зажимы (2 и 3). Если с видеоусилителя поступает сигнал EB-Y, то переключатели находятся в верхнем положении, как показано на рис. 9.12 б).

В этом случае сигнал EB-Y поступает со входа (3) на выходной зажим (6) и детектор B-Y. Сигнал ER-Y, передаваемый в течении предыдущей строки, берется с выхода линии задержки и поступает на детектор R-Y со входа (1). В течении следующей строки переключатели коммутатора находятся в нижнем положении, т.е. в замкнутом состоянии находятся контакты 2-5 и 4-6. В этом случае сигналы на детекторы B-Y и R-Y поступают следующим образом. Сигнал ER-Y, который теперь имеется на выходе видеоусилителя (т.е. на входе линии задержки), через замкнутые контакты 2-5 поступает на детектор R-Y. Сигнал EB-Y берется с выхода линии задержки и поступает на соответствующий детектор через контакты 4-6. С выхода детекторов сигналы поступают на матрицу, формирующую третий цветоразностный сигнал EG-Y. Для управления электронным коммутатором используются импульсы прямоугольной формы. Полный цикл коммутации осуществляется за время двух строк (в течение одной строки переключатели

находятся в верхнем положении, в течении другой – в нижнем), поэтому частота коммутирующих импульсов равна $f_{стр}/2$. Нормальная работа приемного устройства возможна лишь в том случае, когда порядок переключения коммутатора соответствует очередности поступления цветоразностных сигналов. Это возможно лишь тогда, когда электронный коммутатор в телевизионном приемнике работает синфазно с электронным коммутатором кодирующего устройства. Для обеспечения указанной синфазности в приемник вместе с основным набором сигналов необходимо передавать дополнительный сигнал, с помощью которого можно установить правильную фазу работы электронного коммутатора. Следует отметить, что синхронизация электронного коммутатора необходима для правильного приема цветных сигналов. Синхронизация генераторов строчной и кадровой разверток в цветном телевизоре осуществляется с помощью строчных и кадровых синхроимпульсов так же, как в приемнике черно-белого телевидения. Сигнал, устанавливающий фазу работы электронного коммутатора, называется сигналом цветовой синхронизации.

9.3.4. Визуализация телеизображений

Первые телевизионные системы основывались на базе механических или оптических устройств (рис. 9.13), дробивших изображение на серии строк и при визуальном наблюдении на экране телеприемника использовали аналогичные механические устройства. С изобретением

иконоскопа и появлением телевидения приемлимой четкости потребовался способ скоростной развертки изображения. Способ был найден, стала применяться электронно-лучевая трубка (кинескоп), принцип которой заключается в том, что световое излучение возникает за счет возбуждения слоя люминизирующего вещества электронным лучем, быстро скользящего по поверхности этого слоя.

Репродукционные характеристики реальных электронно-лучевых трубок (кинескопов) таковы, что светоотдача люминофоров примерно пропорциональна функции, лежащей между квадратом и кубом эффективного напряжения сигнала. Следовательно, если логарифм светоотдачи взять как функцию от логарифма эффективного напряжения сигнала, то получится прямая линия. Тангенс угла наклона этой прямой (гамма) будет равен $2,8 \pm 0,3$, что в 1969 г. было принято в качестве единого стандарта цветного телевидения.

Динамический диапазон кинескопа при отсутствии паразитной (внешней) подсветки зависит от величины так называемого «светоизбытка» в самой трубке. Последний может привести к тому, что кинескоп окажется не в состоянии обеспечить диапазон яркостей воспроизводимых стимулов даже 100:1. Однако на практике внешнее просмотровое освещение осветляет черную область изображения до уровня, при котором динамический диапазон снижается до 50:1.

Если величина паразитной внешней подсветки и внутреннего светоизбытка в сумме составляют примерно 5%, то динамический диапазон кинескопа падает до 20:1.

Итак, реализация принципа электронно-лучевой трубки в сфере цветного телевидения потребовала очень серьезных технологических усилий, и, чтобы запустить в серию недорогие бытовые телеприемники, понадобилась колоссальная изобретательность конструкторов.

Уйти от сложностей в обеспечении должной точности проводки воспроизводящих изображений в триноскопе [58], а также уменьшить габариты устройств можно за счет применения кинескопа с теневой маской (рис. 9.14), в котором три электронные пушки помещены в общую электронно-лучевую трубку.

Описанная конструкция существенно облегчает положение, однако при этом возникает множество мелких сложностей, вызванных тем фактом, что три электронных пучка берут начало из разных пространственных положений, они несколько по-разному воспроизводят трихроматические изображения, к примеру: когда пучки выполняют развертку изображения в углах экрана кинескопа, им приходится проходить больший путь, нежели когда они разворачивают центр. Следовательно, точного сведения пучков лишь по центру экрана недостаточно и оно должно оставаться таким же и по углам.

Перед тем как попасть на люминофоры электронные пучки сталкиваются с металлической пластиной, отстоящей примерно на 18 мм от слоя люминофора и содержащей примерно 400000 мельчайших отверстий. Люминофоры нанесены в виде точек (рис. 9.15), и при этом направлении электронных пучков, позиции отверстий и позиции люминофоров должны быть такими, чтобы «красный» люминофор подвергался воздействию пучка только той пуш-

ки, что управляется «красным» трихроматическим сигналом и так для остальных двух основных цветов кинескопа.

Однако, ряды точек не должны лежать на строках изображения, поскольку в этом случае они создают так называемый муаровый паттерн (систему муаровых полос), образуемый промежутками между строками, и так называемый точечный паттерн со строго заданными углами между точками: муаровая картина легко заметна, когда углы меняются в диапазоне $\mp 30^\circ$ и практически незаметны при 0° (поэтому строки изображения должны быть более или менее параллельны рядам точек).

Основной недостаток масочного цветного кинескопа – это необходимость сведения трех хроматических изображений в плоскости экрана, причем точность сведения играет большую роль на качество изображения. Для некоторого упрощения этой проблемы был разработан компланарный цветной кинескоп (рис. 9.16). Свое название этот тип кинескопа получил из того, что электронные пушки располагаются в колбе кинескопа компланарно, т.е. горизонтально и параллельно друг другу.

Для воспроизведения цветного телевизионного изображения в свое время был разработан трехлучевой хроматрон. Основные проблемы любого масочного кинескопа - потеря части электронов на маске, в результате чего понижается яркость свечения. Этот недостаток практически полностью устранен в трех- и однолучевых хроматронах и индексных кинескопах. В трехлучевом хроматроне (рис. 9.17) лучи отклоняются тонкой фокусирующей сеткой.

Одной триаде из RGB полосок люминофора соответствует одна проволока фокусирующей сетки.

Для поддержания высокой чистоты цвета требуется пять электромагнитных катушек:

- один охватывает весь экран,
- четыре - по углам экрана.

Яркость хроматрона выше, чем у любого масочного кинескопа

Недостатки: сложная система поддержания чистоты цвета, меньшее разрешение, требуется высокая стабилизация питания.

Несколько более простую конструкцию по сравнению с трехлучевым хроматроном имеет однолучевой хроматрон (рис. 9.18). Но как видно из рисунка требуется втрое более скоростная система управления отклоняющими напряжениями на сетке.

Все остальные конструктивные особенности, достоинства и недостатки у однолучевого хроматрона соответствуют таковым для трехлучевого.

Наиболее точное управление лучом обеспечивается в индексном кинескопе (рис. 9.19).

На внутреннюю поверхность экрана колбы (рис. 9.19) нанесены вертикальные полоски триад люминофора, разделенные индексными полосками, излучающими в ультрафиолетовом диапазоне внутрь колбы. Излучение принимается датчиком. Таким образом точно известно положение луча по горизонтали.

В зависимости от положения луча его ток модулируется напряжением для красного, зеленого или синего цветов (U_R , U_G или U_B).

Недостатки индексного кинескопа следующие:

- сложность поэлементной коммутации цветов,
- высокая линейность строчной развертки,
- более низкие яркость, контрастность, четкость.

За последние несколько лет телевизионный экран изменился очень сильно. Тем более появились совершенно иные технологии воспроизведения цветного изображения: на ряду еще применяемых в настоящее время экранов телеприемника выполненных на кинескопах, которые все более заменяются жидкокристаллическими (LCD) и плазменными (PDP) панелями. Последние, значительно отличаются по светотехническим и колориметрическим параметрам от цветных кинескопов. Более того, по литературным данным [58 – 63] появились сообщения о разработке SED панелей (рис. 9.20) и на основе углеродных нанотрубок FED панели (рис. 9.21), которые, по прогнозам в ближайшее время вытеснят LCD и PDP экраны.

На рис. 9.22 показано устройство LCD панели.

Как, видно, природа воспроизведения цветного изображения на экранах цветного телевидения различна, поскольку как колориметрические, так и светотехнические характеристики зависят от типа экрана. Для примера, на рис. 9.23 приведены спектральные характеристики пропускания жидких кристаллов (на рис. 9.22 – ЖК-молекула). Тогда спектр результирующего излучения будет зависит еще от спектра излучения лампы подсветки, роль которой обычно выполняет люминесцентная лампа. В дешевых LCD DVD проигрывателях в место люминесцентных используют светодиоды, излучающие белый свет, на рис. 9.24

показана спектральная характеристика излучения такого светодиода (черная кривая).

Современные технологии позволяют изготовить сверхъяркие светодиоды основных цветов, которые можно вместе или по отдельности использовать для подсветки ЖК-панелей. На рис. 9.24 цветными линиями отображены спектральные характеристики красного, зеленого и синего светодиодов. Для получения белого цвета в одном корпусе размещают три кристалла светодиодов основных цветов. Такие сборки называют полноцветными светодиодными модулями, они позволяют получить белый свет с любой цветовой температурой. Цветовой охват ЖК-дисплеев с такой подсветкой показан на рис. 10.25 в виде зеленого треугольника.

Технологии светодиодной подсветки пока находятся на начальной стадии, идет поиск оптимальных решений. Samsung в своем 52-дюймовом ЖК-телевизоре LE-52F96BD использует матрицу из 1152 полноцветных светодиодных модулей малой мощности. Каждый из них управляется отдельно, что дает возможность получить высочайшую контрастность и глубокий черный цвет.

9.4. Цветовые искажения в тракте «от света до света»

В наше время невозможно представить жизнь человека, который бы не пользовался услугами цветного телевидения (ЦТ). В связи с этим все большее значение приобретают вопросы качества передачи ТВ изображений телецентрами. В [64, 65] показаны интегральные оценки качества

воспроизведения изображения в цветном телевидении. Как известно, датчиками сигналов цветных ТВ изображений (кроме специальных измерительных генераторов) являются студийные (и внестудийные) камеры. К настоящему времени преимущественно все цветные телекамеры построены на ПЗС. Одной из важнейших характеристик этих датчиков являются сквозные спектральные характеристики, которые можно описать следующим образом:

$$\delta_i(\lambda) = \sum_{i=R,G,B,Y} c_{ij} \cdot \tau_j(\lambda) \cdot \xi_j(\lambda), \quad (9.28)$$

где c_{ij} - элементы матрицы цветокоррекции;

$\tau_j(\lambda)$ - спектральные характеристики пропускания оптических узлов датчика;

$\xi_j(\lambda)$ - спектральные характеристики чувствительности фотопреобразователя датчика.

Измерение спектральных сквозных характеристик датчиков ЦТ сигналов телецентра необходимо для того, чтобы установить отличие этих характеристик от заданных по [66], определить вариации их во время работы фотопреобразователя датчика и в зависимости от изменений режимов работы получить исходные данные для расчетов по определению верности передачи и воспроизведения цвета в системе ЦТ. Последнее особенно полезно для сравнения с результатами непосредственного объективного колориметрирования цветного образца в студии и его изображения на экране монитора телецентра или на экране телеприемника у зрителя.

Сигналы на выходе датчика ЦТ можно представить как:

$$U_i = K_i \int_{380}^{780} E(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \delta_i(\lambda) d\lambda, \quad (9.29)$$

где K_i - коэффициент передачи цветного канала датчика;

$E(\lambda)$ - спектральное распределение энергии источника освещения;

$\rho(\lambda)$ - спектральная характеристика отражения объекта.

Измерение сигналов на выходе ЦТ датчика в зависимости от длины волны света дает сквозную спектральную характеристику датчика с точностью до поправочного коэффициента.

Этот поправочный коэффициент будет равен обратной величине произведения $E(\lambda) \cdot \rho(\lambda)$:

$$\delta_i(\lambda) = \frac{1}{K_i} \cdot \rho(\lambda) \cdot U_i(\lambda), \quad (9.30)$$

где $\delta_i(\lambda)$ - поправочный коэффициент.

Известны некоторые методики измерения сквозных спектральных характеристик датчиков ЦТ [2].

При выборе методики и аппаратуры измерений сквозных характеристик необходимо иметь ввиду, что они должны быть определены без введения каких либо дополнительных изменений в существующую аппаратуру телецентра, а также без ее разукomплектования. В [67, 68] приведены несколько методик и результатов измерения.

Некоторые замечания следует сделать по поводу спектральных характеристик, определенных [66]. Эти характеристики в ГОСТе заданы не в явном виде (таблицы, графи-

ки), а в косвенном, и подразумевается расчет таких характеристик по некоторым формулам по исходным данным, указанным в [69]. Формулы не указаны в ГОСТе, но имеются в технической литературе по цветному ТВ [70, 71]. Они ведут свое начало от работ по цветному воспроизведению, фотографии и кинематографии, опубликованных в 1937 г. [72] и повторенных применительно к ТВ в 1953 г. [71]. Формулы выведены по идеализированной математической модели системы ЦТ «от света до света» и устанавливают строгую «колориметричность» спектральных характеристик ЦТ датчика:

$$\begin{bmatrix} \delta_R(\lambda) \\ \delta_G(\lambda) \\ \delta_B(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix}, \quad (9.31)$$

где

$\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ — кривые сложения колориметрической системы МКО 1941 г. (x , y),

$a_1 \cdots a_9$ — коэффициенты, являющиеся алгебраическими функциями координат цветности треугольника основных цветов эталонного экрана монитора и опорного белого цвета.

Физический смысл характеристик (9.31) состоит в том, что их ординаты для каждой длины волны света указывают количества, в которых нужно смешать первичные цвета эталонного экрана монитора, чтобы получить цвет передаваемого объекта, который предполагается в виде монохроматического источника на той же длине волны. Как показывают расчеты, проведенные по (9.31), на характеристи-

ках нет ни одной длины волны, где не было бы ординат с отрицательными значениями каких-либо кривых $\delta_i(\lambda)$. Это и понятно: нельзя получить насыщенный цвет монохроматического источника, смешивая световые потоки широкополосных излучателей (основных цветов экрана монитора). В подобном случае в классических визуальных колориметрах необходимо «разбавлять» монохроматическое излучение одним из широкополосных.

Понятно, что никакие реальные ЦТ датчики не могут реализовать спектральные характеристики (9.31), во первых, из-за наличия отрицательных участков, а во-вторых, из-за вариаций формы сквозных спектральных характеристик. Следует отметить, что характеристики (9.31) предполагают наличие одного и того же опорного белого цвета на приемной и передающей сторонах. Практически камеры настраивают на «студийный» или «внестудийный» опорный белый цвет. В тоже время цветные видеоконтрольные устройства (или телеприемник) настраивают на эталонный опорный белый цвет (например, D6500).

К неравенству опорного белого цвета приводит также процесс расстройки ЦТ камер, когда регулируются уровни черного и коэффициенты передачи цветовых каналов, а на приемной стороне – уровень яркости и контрастности.

Наиболее распространенной математической моделью для оценки цветовых искажений является матрица перехода от сигналов датчика (9.29) к цветовым координатам МКО 1960, в которой и происходит оценка цветовых искажений. Эта матрица имеет следующий вид: