

2.1. Особенности представления и восприятия изображений

Понятие изображения

2

- Распределение энергии источника светового излучения, отражённого объектом

$$0 \leq L(x_1, x_2, \lambda) \leq L_{max}$$

$$-M_1 \leq x_1 \leq M_1, \quad -M_2 \leq x_2 \leq M_2$$

- Непрерывное изображение

$$L(x_1, x_2) = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} L(x_1, x_2, \lambda) s(\lambda) d\lambda.$$

- Дискретное изображение

$$L(n_1\Delta_1, n_2\Delta_2) = L(x_1, x_2)|_{x_1=n_1\Delta_1, x_2=n_2\Delta_2}$$

$$L(n_1\Delta_1, n_2\Delta_2) \equiv L(n_1, n_2)$$

$$N_1 = \left\lceil 2M_1/\Delta_1 \right\rceil, \quad N_2 = \left\lceil 2M_2/\Delta_2 \right\rceil$$

- Квантование изображения

Понятие о цвете

- CIE - международный комитет по освещению (фр. Commission Internationale de l'Eclairage)
- *Цвет (согласно CIE)* – это результат восприятия действия света видимого спектрального диапазона с длиной волны от 400 нм до 700 нм, попадающего на сетчатку глаза.
- В 1931 году было доказано, что для правильного отображения цвета достаточно трёх компонент.
- *Яркость (согласно CIE)* – это атрибут визуального восприятия световой области глазом человека.

Спектральная чувствительность

4

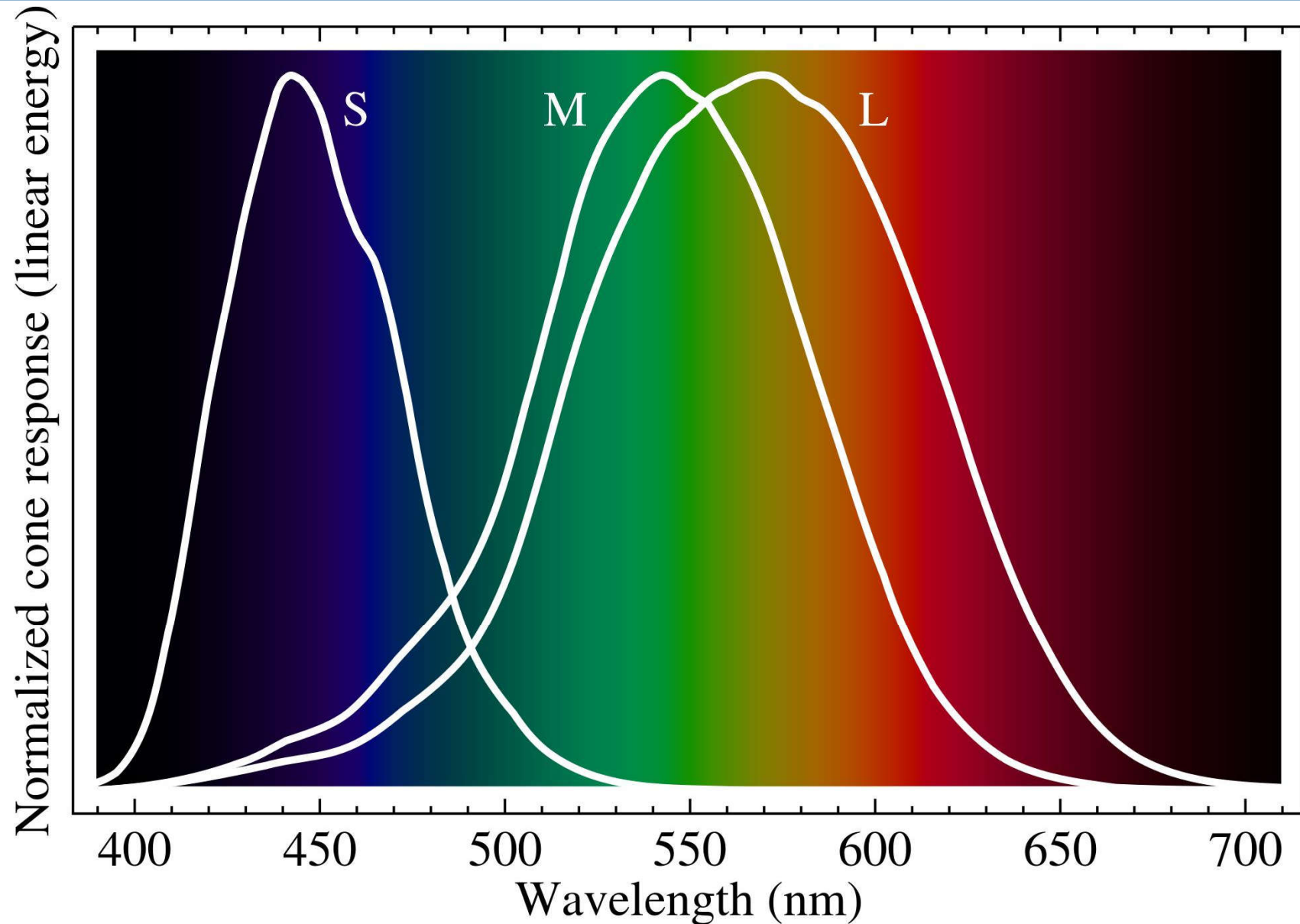
- $s(\lambda)$ в определении изображения – спектральная чувствительность
- Человеческий глаз обладает чувствительностью к свету в диапазоне волн приблизительно от $\lambda_{min} = 0,35$ мкм до $\lambda_{max} = 0,78$ мкм
- 2 типа светочувствительных элементов: палочки и колбочки (трёх видов)

Области чувствительности трёх типов колбочек

| Тип колбочек | Воспринимаемые длины волн | Максимум чувствительности |
|--------------|---------------------------|---------------------------|
| S | 400—500 нм | 420—440 нм |
| M | 450—630 нм | 534—545 нм |
| L | 500—700 нм | 564—580 нм |

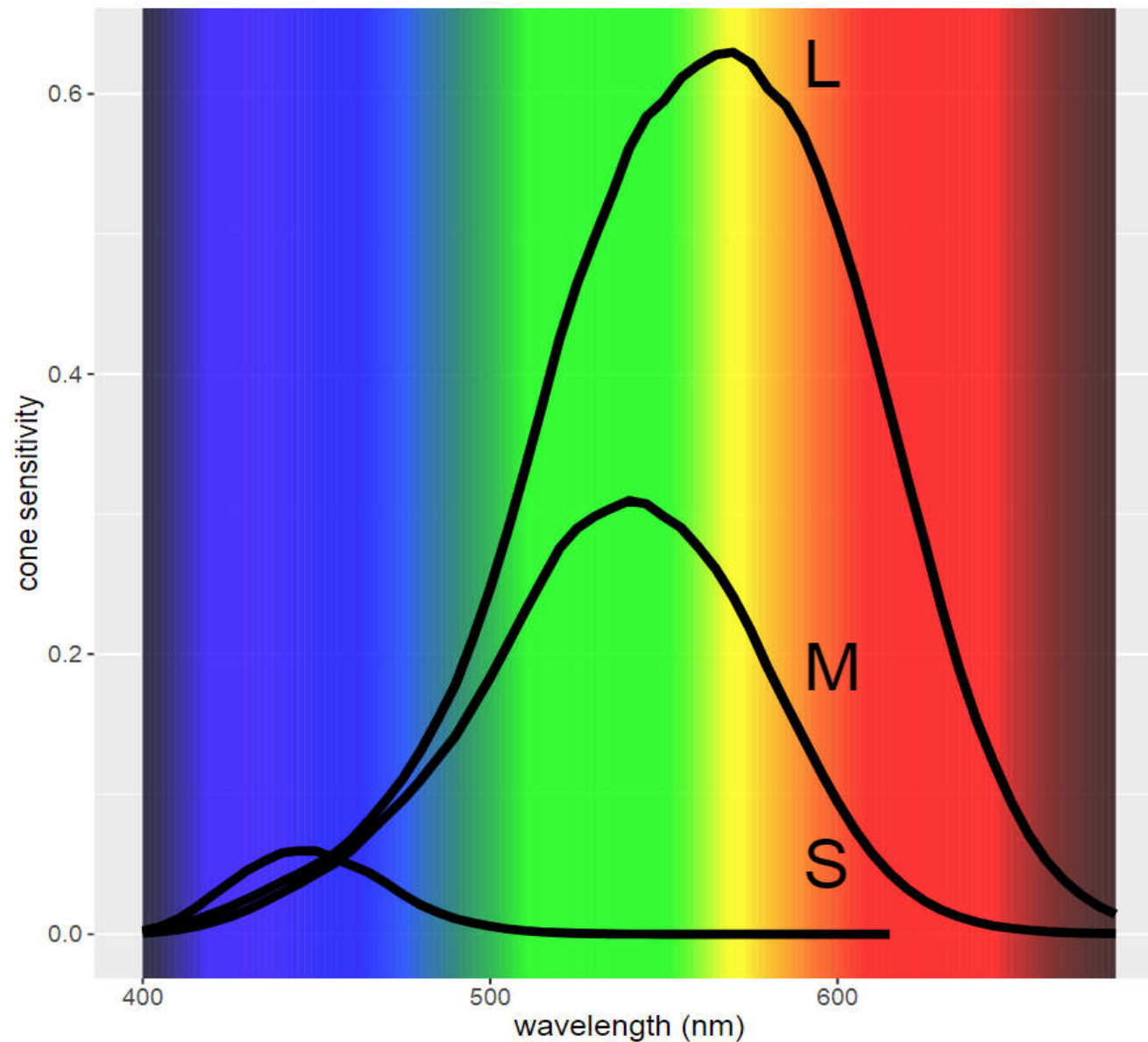
Нормализованная спектральная чувствительность колбочек

5



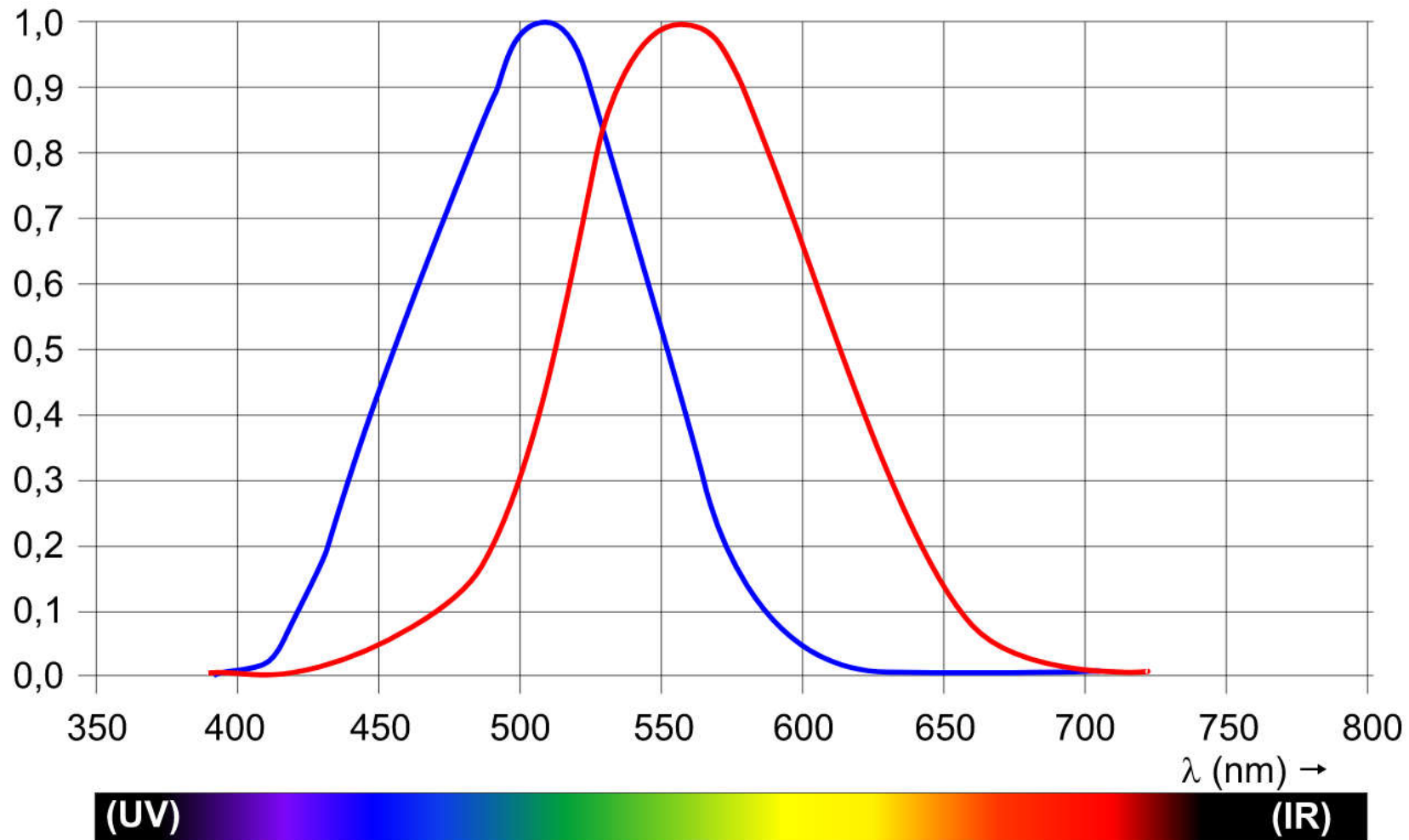
Количественно-взвешенная спектральная чувствительность

6



Спектральная чувствительность дневного и ночного зрения

7



Цветовые пространства

8

1. XYZ (CIE 1931 XYZ)
2. RGB
3. CMY

$$c = 1 - r,$$

$$m = 1 - g,$$

$$y = 1 - b.$$

4. HSV
 - Hue — цветовой тон (0—360°)
 - Saturation — насыщенность (0—1)
 - Value — яркость (0—255).

Цветовые пространства

9

4. HSV

$$h = \begin{cases} 0, & c_{\min} = c_{\max}, \\ 60 \frac{g - b}{c_{\max} - c_{\min}}, & c_{\max} = r \text{ и } g \geq b, \\ 60 \frac{g - b}{c_{\max} - c_{\min}} + 360, & c_{\max} = r \text{ и } g < b, \\ 60 \frac{b - r}{c_{\max} - c_{\min}} + 120, & c_{\max} = g, \\ 60 \frac{r - g}{c_{\max} - c_{\min}} + 240, & c_{\max} = b, \end{cases}$$
$$s = \begin{cases} 0, & v = 0, \\ 1 - \frac{c_{\min}}{c_{\max}}, & v \neq 0, \end{cases}$$
$$v = c_{\max},$$

где $c_{\min} = \min(r, g, b)$, $c_{\max} = \max(r, g, b)$.

5. YCbCr

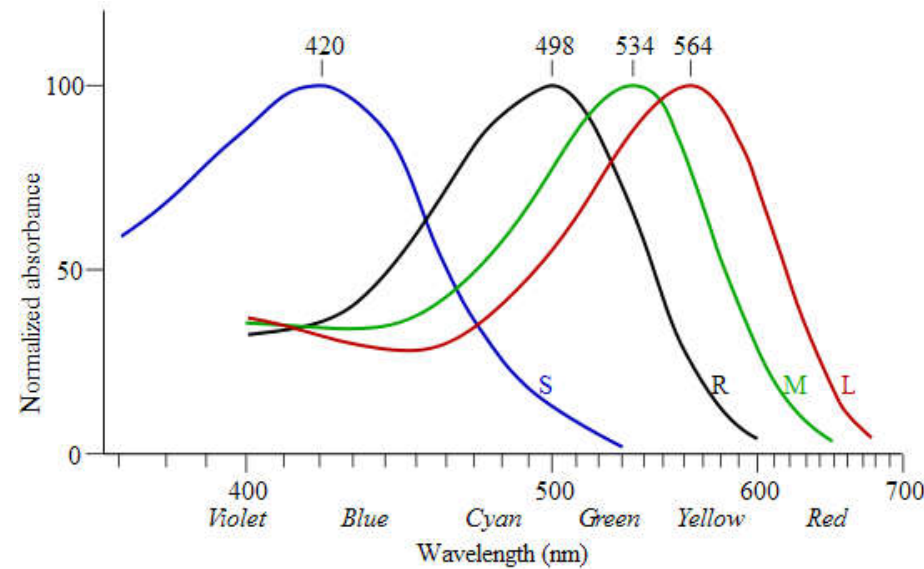
$$y = \frac{77}{256}r + \frac{150}{256}g + \frac{29}{256}b,$$

$$Cb = b - y,$$

$$Cy = r - y.$$

Спектральная чувствительность

10

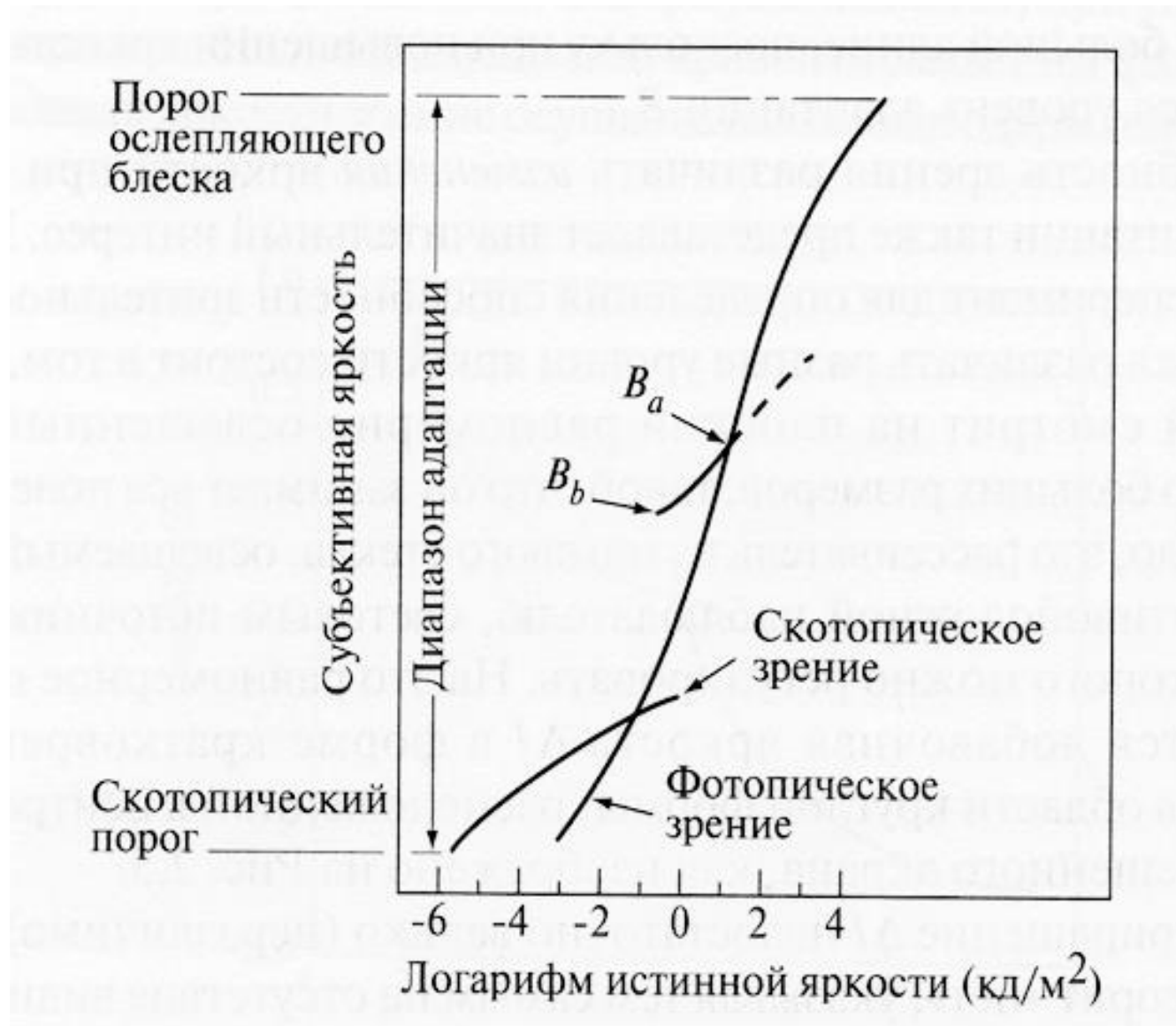


Диапазоны длин волн основных цветов видимого диапазона

| Название цвета | Границы спектрального диапазона в нм |
|----------------|--------------------------------------|
| Красный | 620-780 |
| Оранжевый | 585-620 |
| Желтый | 575-585 |
| Желто-зелёный | 550-575 |
| Зелёный | 510-550 |
| Голубой | 480-510 |
| Синий | 450-480 |

Диапазон воспринимаемой яркости и конкретный уровень адаптации

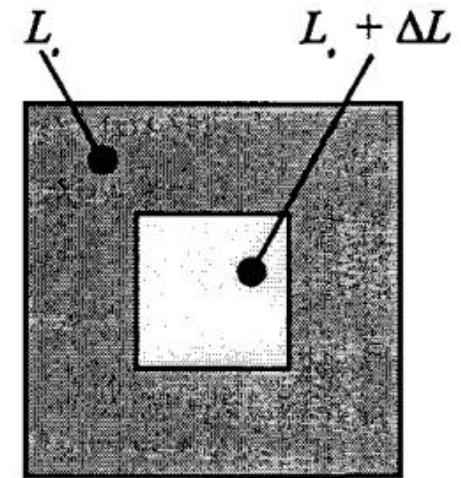
11



Эксперимент 1 (Вебера, XIX век)

12

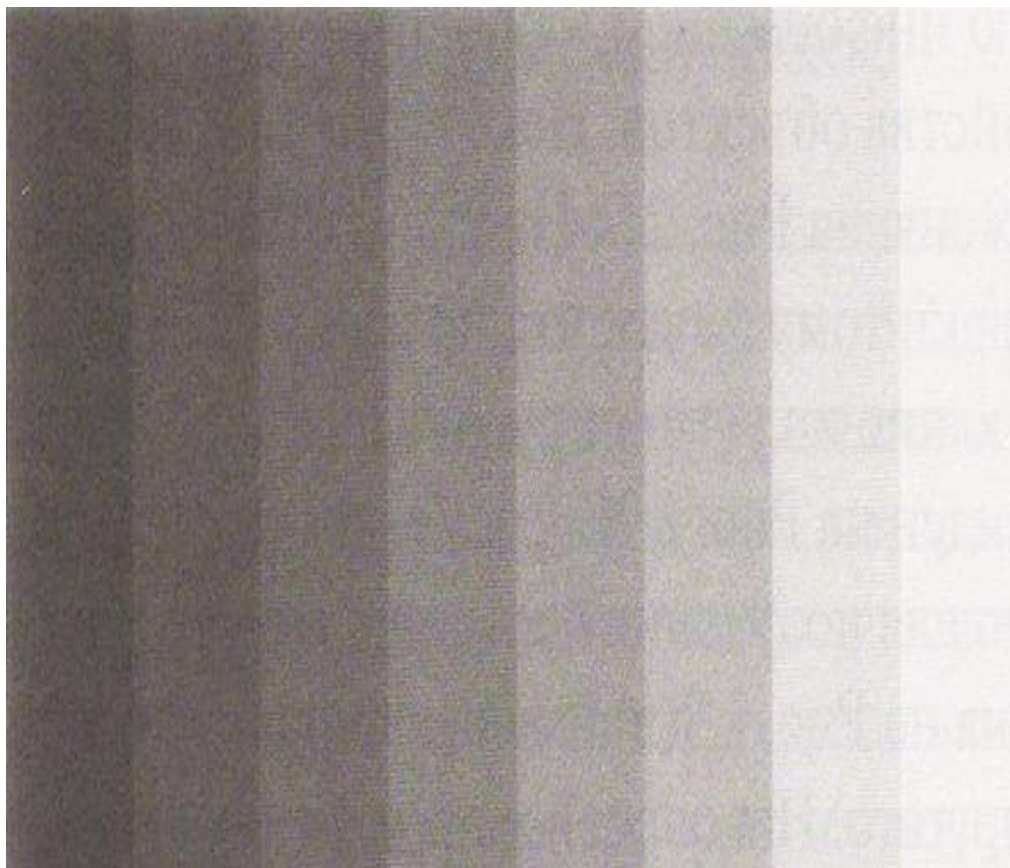
- Испытуемый смотрит на плоский равномерно освещённый экран, занимающий все поле зрения и имеющий яркость L_0 .
- На экран наложена маленькая добавочная яркость ΔL в границах небольшого объекта.
- Испытуемый говорит, при каких ΔL он начинает воспринимать объект яркости $L_0 + \Delta L$.
- ΔL_{jn} – едва различимая разница (добавочная яркость, различимая в 50% экспериментов)
- Величина $C_{jn} = \frac{\Delta L_{jn}}{L_0}$ - едва различимый контраст
- Закон Вебера: *чем выше яркость фона, тем большей должна быть разница между фоном и сигналом, чтобы последний был воспринят*



$$\frac{\Delta L_{jn}}{L_0} \approx \text{const}$$

Полосы Маха

13



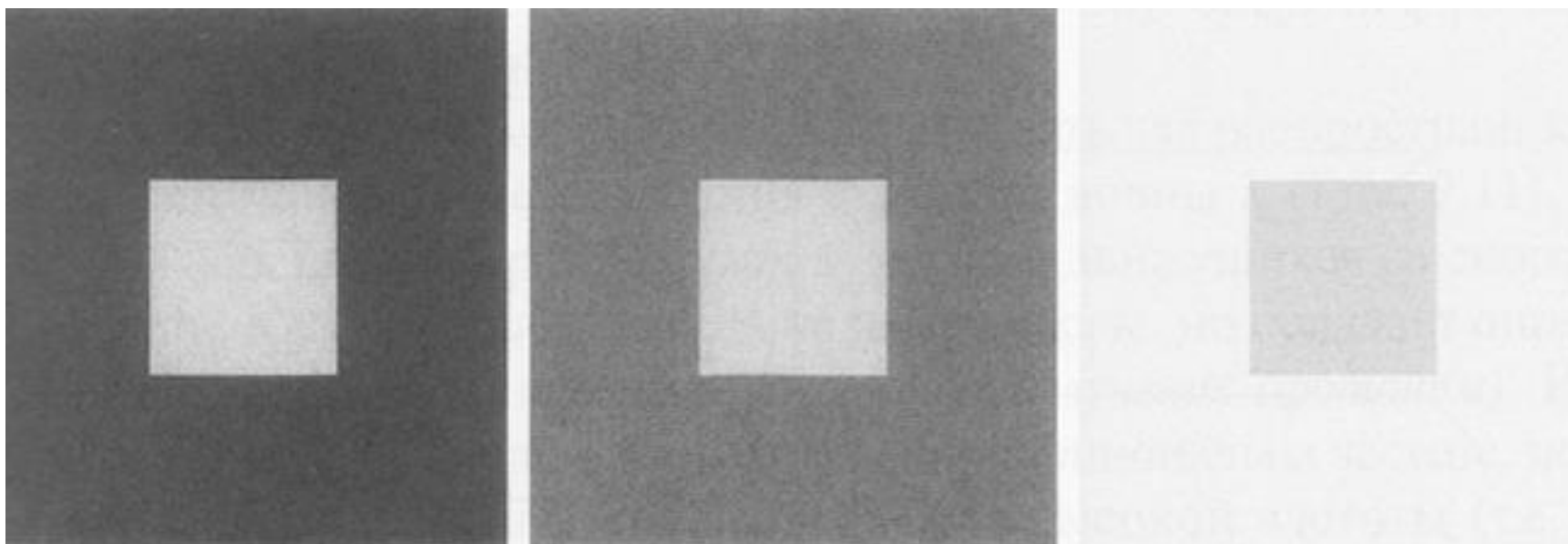
Полосы Маха: восприятие

14



Одновременный контраст

15



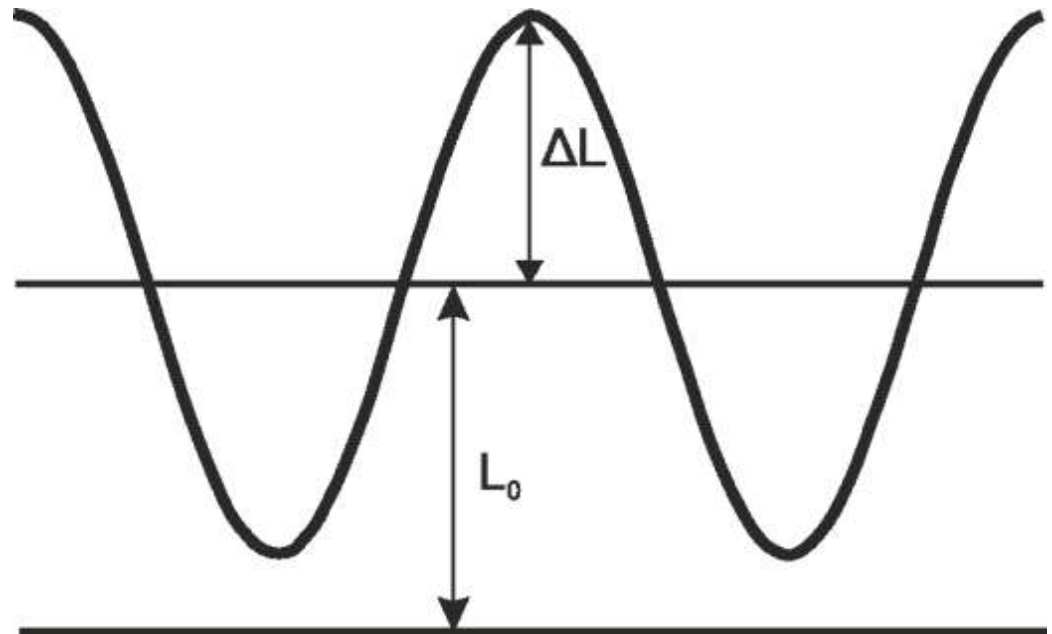
Эксперимент 2: контрастная чувствительность при восприятии синусоидального сигнала

16

$$L(x_1, x_2) = L_0 + \Delta L \cos[2\pi\nu(x_1 \cos \theta + x_2 \sin \theta)],$$

- θ — угол поворота синусоиды относительно горизонтали,
- ΔL — амплитуда синусоиды,
- L_0 — постоянная (опорная) яркость,
- ν — пространственная частота [цикл/м].

ΔL такая, что синусоидальное изменение яркости различимо для 50 % наблюдателей — участников эксперимента, называется **едва различимым порогом видимости** и обозначается ΔL_{jn}



Эксперимент 2: переход угловым параметрам

17

- $1/\omega$ – угол наблюдения синусоиды,
- d – расстояние от глаза наблюдателя до изобр
- $1/v$ – период синусоиды в метрах

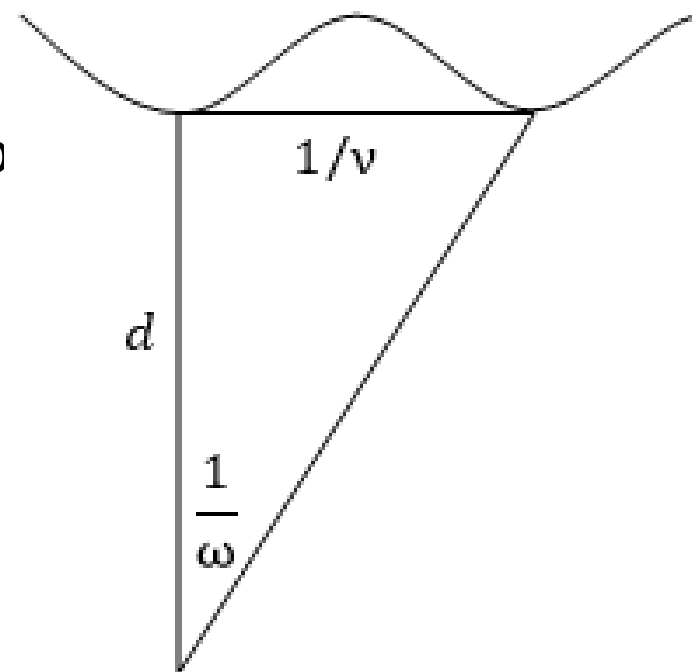
$$\operatorname{tg} \frac{1}{\omega} = \frac{1}{vd}.$$

При малых углах

$$\frac{1}{\omega} \approx \frac{1}{vd} \Rightarrow \omega \approx vd.$$

$\omega \left[\frac{\text{цикл}}{\text{рад}} \right]$ – угловая частота в радианах

$$f = \frac{\pi\omega}{180} \approx \frac{\pi vd}{180} - \text{угловая частота в градусах} \left[\frac{\text{цикл}}{\text{градус}} \right]$$



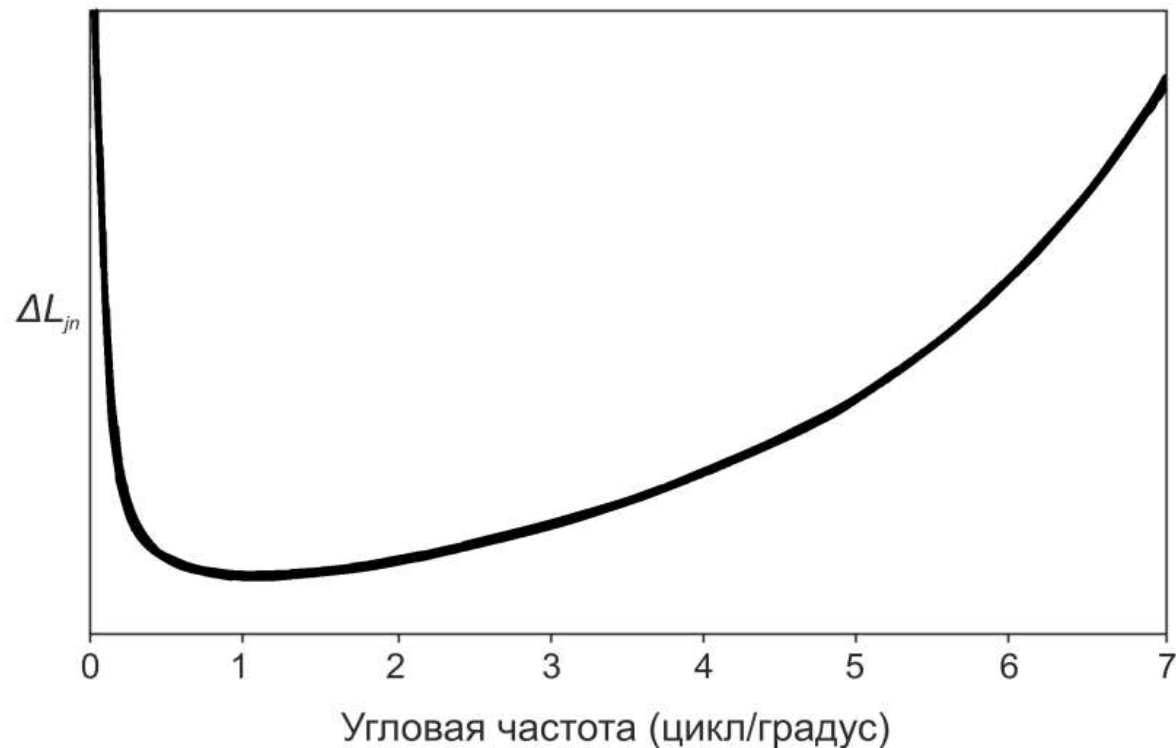
Едва различимый порог видимости

18

$$\Delta L_{jn} = \Delta L_{jn}(L_0, \theta, f, W),$$

где W — угол обзора, отношение корня квадратного из площади экрана к расстоянию между экраном и наблюдателем d

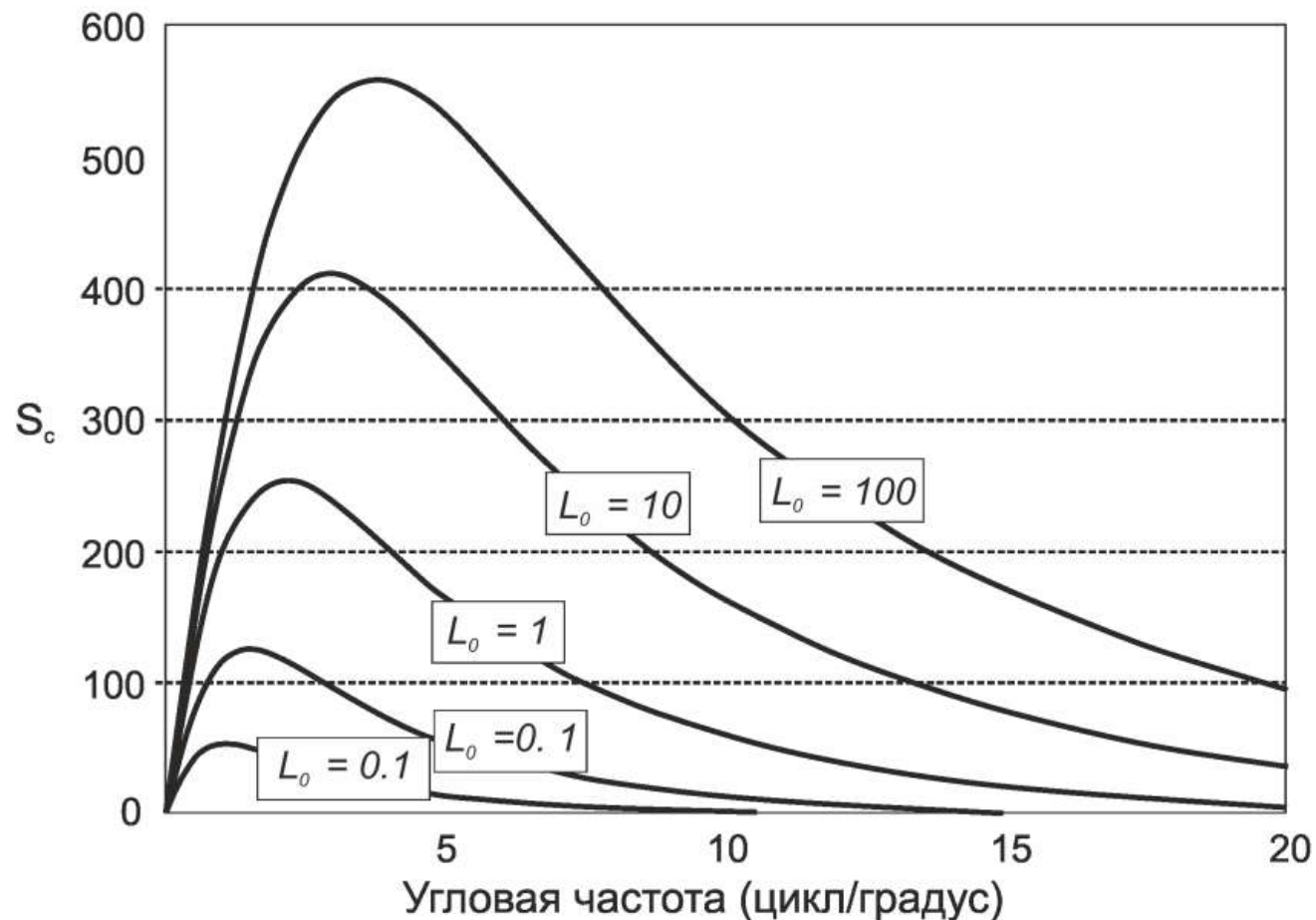
$C_{jn} = \frac{\Delta L_{jn}}{L_0} = C_{jn}(L_0, \theta, W, f)$ - едва различимый контраст



Функция контрастной чувствительности при разных значениях фоновой яркости

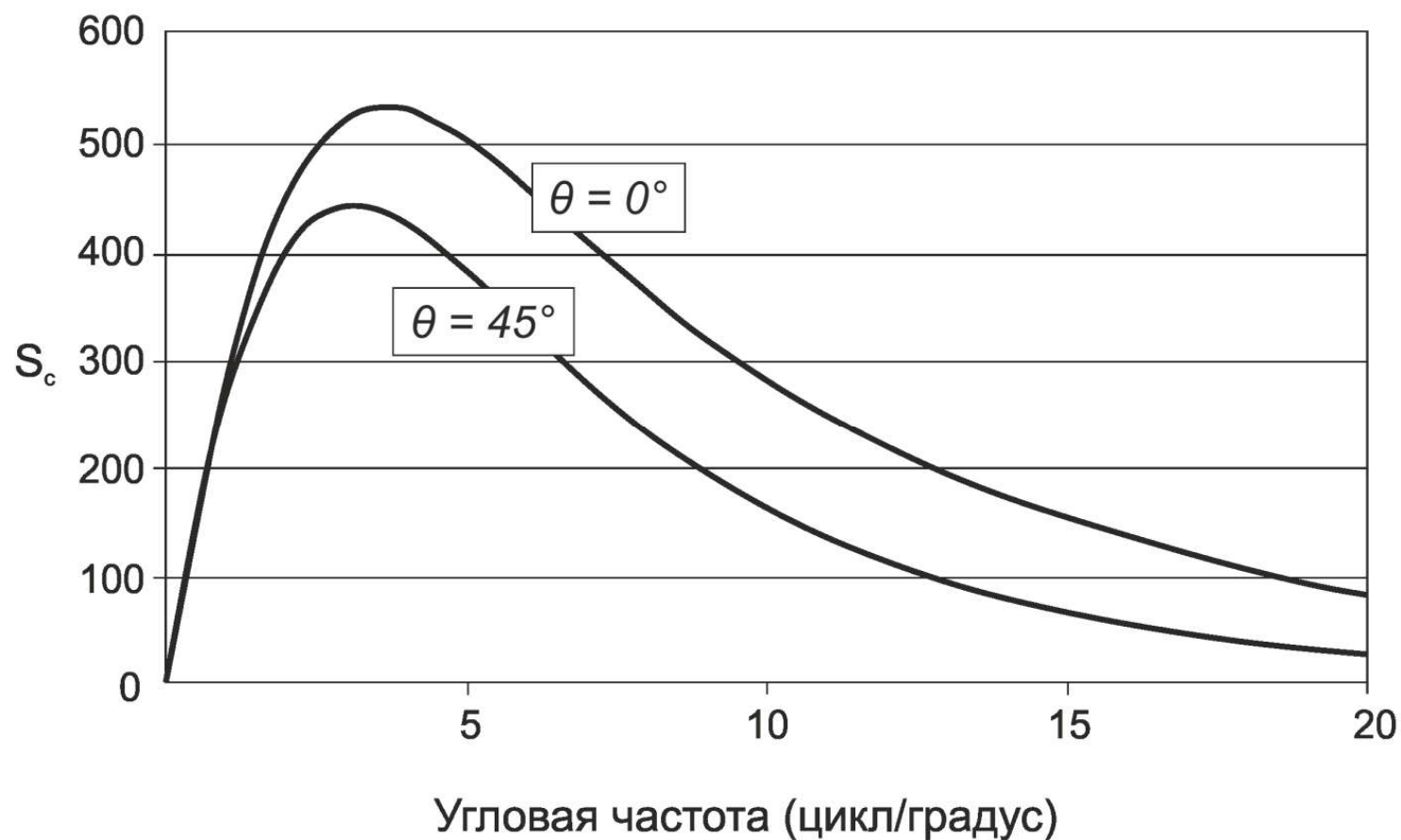
19

$S_c = \frac{1}{C_{jn}} = \frac{L_0}{\Delta L_{jn}}$ – функция контрастной чувствительности
(contrast sensitivity function, CSF)



Функция контрастной чувствительности при разных значениях ориентации синусоиды

20



Эксперимент 3: эффект маскировки при восприятии синусоидального сигнала

21

Модель изображения:

- постоянный фон – L_0
- двумерную синусоиду – модель маскируемого сигнала, параметры $\Delta L, \theta, f$
- двумерную синусоиду – модель маскирующего сигнала, параметры $\Delta L_m, \theta_m, f_m$

$$L(x_1, x_2) = L_0 + \Delta L_m \cos[2\pi f_m(x_1 \cos \theta_m + x_2 \sin \theta_m)] + \Delta L \cos[2\pi f(x_1 \cos \theta + x_2 \sin \theta)].$$

[Упрощение - f вместо ν]

Случай 1: $f_m = f$ и $\theta_m = \theta$

Существование маскирующего сигнала повышает значение едва различимого контраста

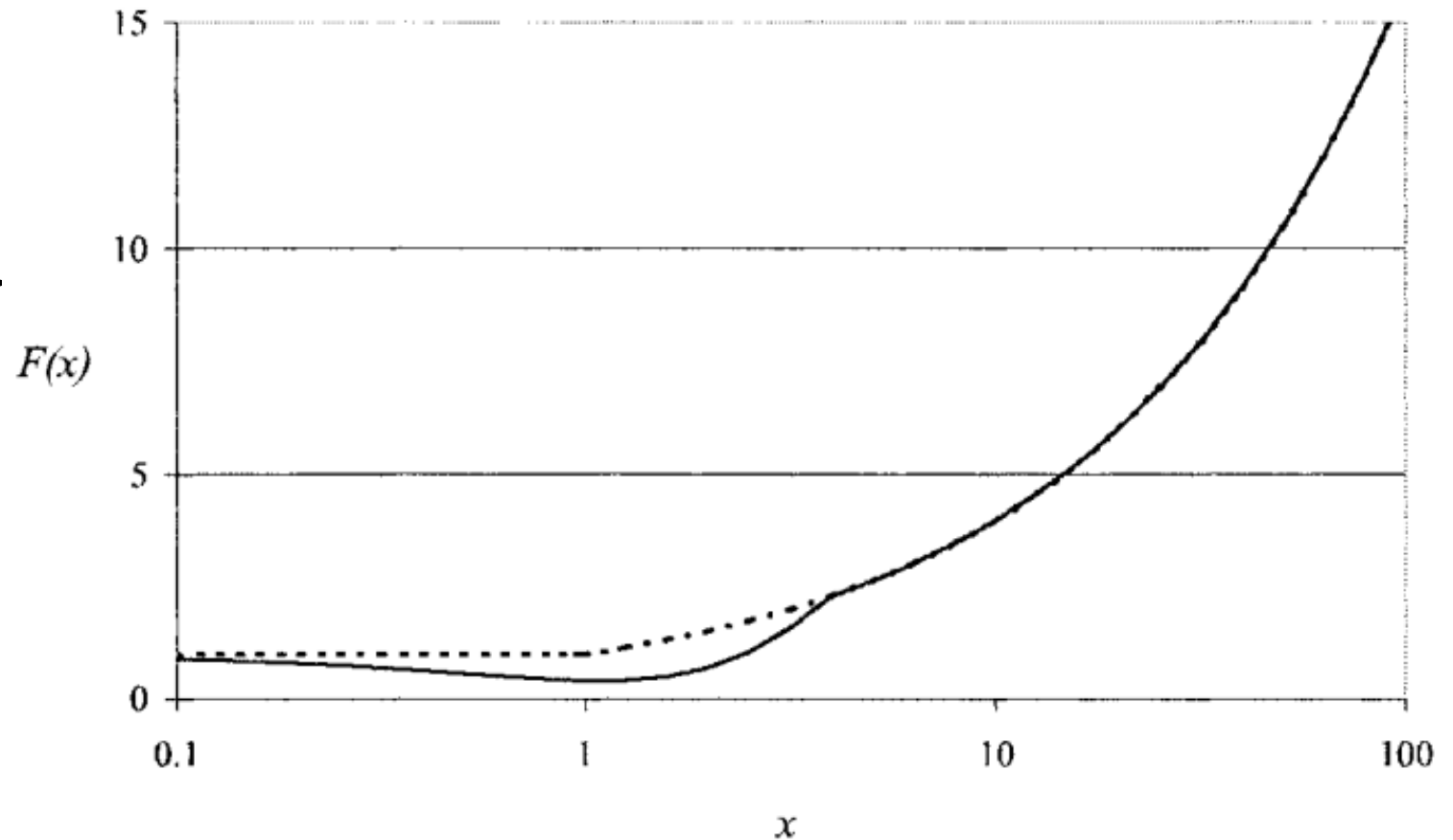
$$C_{jn}^m(f, L_0, W, \theta) = \frac{\Delta L_{jn}^m(f, L_0, W, \theta)}{L_0} = C_{jn}(f, L_0, W, \theta) \cdot F\left(\frac{\Delta L_m/L_0}{C_{jn}(f, L_0, W, \theta)}\right),$$

Эксперимент 3: эффект маскировки при восприятии синусоидального сигнала

22

Функция $F(x)$ обладает следующими свойствами:

- $F(0) = 1,$
- $F(x) \leq 1$
при $0 < x \leq 1,$
- $F(x) > 1$ при $x > 1.$



Аппроксимация на практике: $F(x) = \max(1, x^w)$, $w \in [0,5; 0,8]$

Эксперимент 3: эффект маскировки при восприятии синусоидального сигнала

23

Случай 2: $f_m \neq f$ и $\theta_m \neq \theta$

Эффект маскировки ослабевает

Он зависит от отношения f_m/f и от разницы $|\theta_m - \theta|$:

$$C_{jn}^m = C_{jn}(f, L_0, W, \theta) \cdot F \left(S \left(\frac{f_m}{f}, |\theta_m - \theta| \right) \cdot \frac{\Delta L_m / L_0}{C_{jn}(f, L_0, W, \theta)} \right).$$

Функция $S(x_1, x_2)$ обладает следующими свойствами:

- $S(1,0) = 1$, и это её максимальное значение.
- Монотонно убывает при отклонении (x_1, x_2) от $(0,1)$ во всех направлениях.

Аппроксимация:

$$S \left(\frac{f_m}{f}, |\theta_m - \theta| \right) = \exp \left\{ -\frac{1}{\sigma_f^2} \log^2 \left(\frac{f_m}{f} \right) + \frac{1}{\sigma_\theta^2} (\theta_m - \theta)^2 \right\},$$

где величины $\sigma_f^2, \sigma_\theta^2$ имеют смысл дисперсии.

Список наиболее важных статических свойств человеческого зрения

24

1. *Частотная чувствительность* – человек гораздо более восприимчив к низкочастотному шуму, нежели к высокочастотному шуму.
2. *Яркостная адаптация и контрастная чувствительность* – система человеческого зрения способна адаптироваться к широкому диапазону яркостей, и в каждом диапазоне человек способен различать определенные уровни яркости. Эта разрешающая способность зависит не от разности уровней яркости, а от отношения этой разности к среднему значению яркости, т.е. от контраста.
3. *Спектральная чувствительность (HSV)*: человек гораздо более восприимчив к изменению тона, нежели к изменению насыщенности: $CSF(S) \ll CSF(H) \ll CSF(V)$
4. *Спектральная чувствительность (RGB)*: $CSF(B) < CSF(R) < CSF(G)$.

Эксперимент 4: способность зрения к восприятию движения

25

Модель динамического изображения

$$L(x, t) = L_0 + \Delta L \cdot \cos[2\pi f(x - vt)]$$

- $v = \frac{f_t}{f} \left[\frac{\text{градус}}{\text{с}} \right]$ — скорость движения синусоиды,
- $f \left[\frac{\text{цикл}}{\text{градус}} \right]$ — угловая пространственная частота,
- $f_t \text{ [Гц]}$ — временная частота.

Аппроксимация ФКЧ

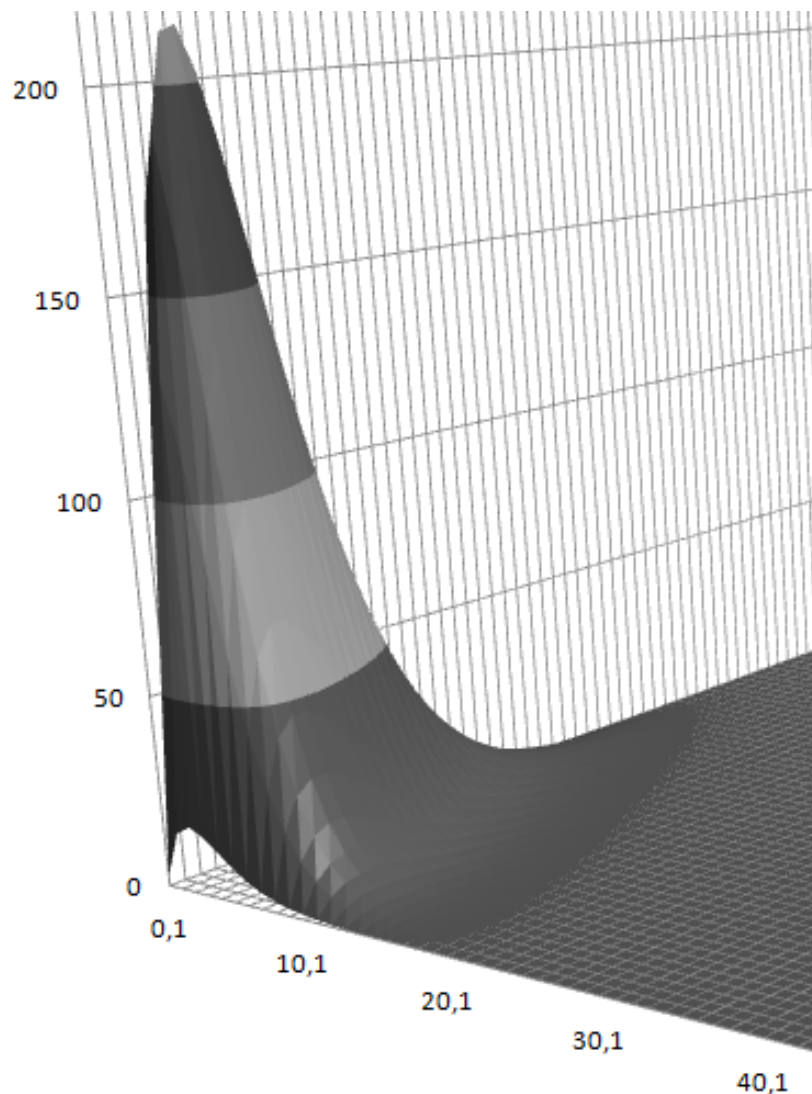
$$S_c = \left(6,1 + 7,3 \cdot \left| \log_{10} \left(\frac{v}{3} \right) \right|^3 \right) \cdot v \cdot (2\pi f)^2 \cdot \exp \left\{ -\frac{4\pi f}{45,9} (v + 2) \right\}.$$

- При $f_t \approx 30 \text{ Гц}$ $S_c \approx 2,5$, что уже достаточно мало.

Эксперимент 4: способность зрения к восприятию движения

26

График ФКЧ



Слежение за объектом

$$v = v_{object} - v_{eye},$$
$$v_{eye} = \max(0,82 \cdot v_{object}, v_{eye}^{max}),$$
$$v_{eye}^{max} \approx 80 \left[\frac{\text{градус}}{c} \right],$$
$$v = v_{object} - \max(g \cdot v_{object}, v_{eye}^{max}).$$

За счёт слежения за объектом значение f_t возрасти до 180 Гц при пространственной частоте $1 \left[\frac{\text{цикл}}{\text{градус}} \right]$.

Показатели качества изображений

27

- $v(n_1, n_2)$ – искажённое изображение
- $u(n_1, n_2)$ - эталонное изображение
- Мера качества: $Q = Q(u, v)$.
- $\varepsilon(n_1, n_2) = u(n_1, n_2) - v(n_1, n_2)$ - разностное изображение
- Мера качества: $Q = Q(\varepsilon)$

Примеры мер качества

- Показатель субъективного визуального восприятия
- Показатель максимальной ошибки: $\varepsilon_{max} = \max_{(n_1, n_2)} |\varepsilon(n_1, n_2)|$
- Показатель среднеквадратичной ошибки:

$$\varepsilon_{\text{КВ}}^2 = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} \varepsilon^2(n_1, n_2)$$

Показатели качества изображений

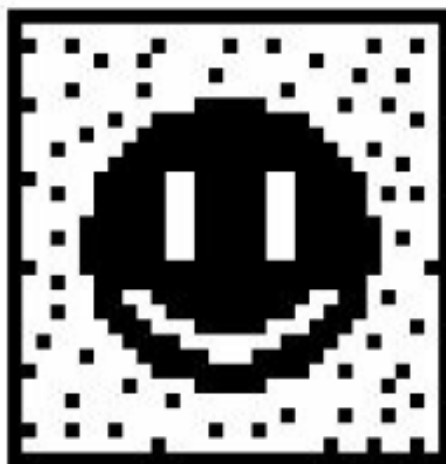
28

- Показатель среднеквадратичной ошибки:

$$\varepsilon_{\text{KB}}^2 = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} \varepsilon^2(n_1, n_2)$$

- Пиковое отношение сигнал/шум

$$PSNR(u, v) = 10 \cdot \lg \frac{\sup_{(n_1, n_2)}^2 u(n_1, n_2)}{\varepsilon_{\text{KB}}^2(u, v)} = 20 \cdot \lg \frac{255}{\varepsilon_{\text{KB}}(u, v)}$$



Частотно-взвешенный среднеквадратичный показатель

29

- Спектр $\varepsilon(n_1, n_2)$

$$E(e^{i\omega_1}, e^{i\omega_2}) = \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} \varepsilon(n_1, n_2) e^{-i[n_1\omega_1 + n_2\omega_2]}.$$

- Равенство Парсеваля

$$\sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} \varepsilon^2(n_1, n_2) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |E(e^{i\omega_1}, e^{i\omega_2})|^2 d\omega_1 d\omega_2.$$

- Среднеквадратичный показатель – эквивалентная формула:

$$\varepsilon_{\text{KB}}^2 = \frac{1}{N_1 N_2} \cdot \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |E(e^{i\omega_1}, e^{i\omega_2})|^2 d\omega_1 d\omega_2.$$

- ЧВ СКП

$$\varepsilon_{\text{ЧВ KB}}^2 = \frac{1}{N_1 N_2} \cdot \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} W(\omega_1, \omega_2) \cdot |E(e^{i\omega_1}, e^{i\omega_2})|^2 d\omega_1 d\omega_2.$$

Частотно-взвешенный среднеквадратичный показатель

30

- Простая весовая функция

$$W(\omega_1, \omega_2) = \frac{1}{\omega_1^2 + \omega_2^2}.$$

- ФКЧ (приближение Дейли)

$$S_c(f) = \begin{cases} 2,2(0,192 + 0,114f) \exp(-(0,114f)^{1.1}), & \text{если } f > f_{\max}, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где $f_{\max} = 6,6$ цикла на градус.

- Если считать ФКЧ изотропной, можно принять

$$f = \frac{\pi}{180} \sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2}.$$

Частотно-взвешенный среднеквадратичный показатель

31

- В действительности ФКЧ анизотропная.
Поэтому считаем:

$$f = \frac{\frac{\pi}{180} \sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2}}{0,15 \cdot \cos 4\phi + 0,85},$$

где

$$\phi = \operatorname{arctg} \frac{\omega_1}{\omega_2}.$$

