

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СВЕТОВОГО ПОЛЯ СЕКТОРНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЗРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗАТОРА

DETERMINATION THE PARAMETERS
OF THE LIGHT FIELD SECTORAL
NAVIGATION SYSTEMS
BY A STATISTICAL MODEL
OF THE VISUAL ANALYZER

D. Vasiliev

Summary. The article discusses the visual navigation through orientation on colored lights (constant or flashing with different characteristics) observed on a colored background uneven. We estimate the impact on the orientation of the brightness of the background, defined as external natural and artificial light (from — for scattered in the atmosphere of the navigation system of the radiation). The model is characterized by the visual observation of the color of the object on a colored background with the uneven distribution of brightness on their surfaces. The application for the description of the visual navigation of fire of the visual analyzer of the statistical model as more fully take into account the processes occurring in the organ of vision.

Keywords: The statistical model, the threshold model, the visual analyzer, the brightness of fire, background brightness, uneven spatial distribution of brightness, a threshold likelihood ratio, the light field.

Васильев Дмитрий Викторович

*К.т.н., Акционерное общество
«Раменский приборостроительный завод».
Заместитель главного конструктора
vasiliev1969@yandex.ru*

Аннотация. В статье рассматривается визуальная навигация путем ориентировки по цветным огням (постоянным или мигающим с различной проблесковой характеристикой), наблюдаемым на цветном неравномерном фоне. Оценивается влияние на процесс ориентировки яркости фона, определяемой как внешними природными, так и искусственными источниками освещения (из - за рассеянного в атмосфере излучения навигационного комплекса). Модель зрительного восприятия характеризуется наблюдением цветного объекта на цветном фоне с неравномерным распределением яркости по их поверхностям. Рассматривается применение для описания процесса зрительного восприятия навигационного огня статистической модели зрительного анализатора, как наиболее полно учитывающей процессы, происходящие в органе зрения.

Ключевые слова: Статистическая модель, пороговая модель, зрительный анализатор, яркость огня, яркость фона, неравномерное пространственное распределение яркости, пороговое отношение правдоподобия, световое поле.

Введение

В практике зрительной навигации в подавляющем большинстве случаев наблюдателю приходится вести ориентировку по цветным огням (постоянным или мигающим с различной проблесковой характеристикой), наблюдаемым на цветном неравномерном фоне. Яркость фона определяется как внешними природными и искусственными источниками освещения, так и яркостью рассеянного в атмосфере излучения навигационного комплекса. Соотношение этих яркостей определяется условиями наблюдения (временем суток, метеовидимостью, наличием посторонних источников и т.д.). В общем случае это можно охарактеризовать как наблюдение цветного объекта на цветном фоне с неравномерным распределением яркости по их поверхностям.

Для оценки видимости огня навигационных комплексов в настоящее время используется пороговая модель зрительного анализатора (глаза) которая основана на сравнении освещенности органа зрения с пороговы-

ми величинами, на основе чего принимается решение о видимости наблюдаемого огня. Поскольку пороговая модель не может в полной мере учесть физиологию зрительного процесса и, следовательно, дать точный результат, для анализа наблюдения огня может быть использована статистическая модель зрительного анализатора, разработанная на кафедре Светотехники Московского Энергетического института, которая позволяет более полно учесть зрительные процессы, происходящие при наблюдении светосигнальных огней. Особенно это актуально в случае ориентировки по световому полю секторного навигационного комплекса, состоящего из разноцветных и отличающихся проблесковыми характеристиками прилегающих друг к другу секторов.

Для случая, когда яркость фона $L\phi > 10-3$ кд/м², вероятность обнаружения цветного огня секторного навигационного комплекса на цветном фоне с произвольным распределением яркости по их поверхности определяется статистической моделью зрительного анализатора следующим образом [1, 2]:

$$P_o = 0.5 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^y \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt. \quad (1)$$

$$y = \frac{m_A - \ln A_{\Pi}}{\sigma_A}. \quad (2)$$

$$m_A = \iint_0^{\Omega_{\text{зп}}} \left[X_o(\eta; \theta) \ln \left(\frac{X_o(\eta; \theta)}{X_{\Phi}(\eta; \theta)} \right) - X_o(\eta; \theta) + X_{\Phi}(\eta; \theta) \right] d\eta d\theta. \quad (3)$$

$$\sigma_A = \sqrt{\iint_0^{\Omega_{\text{зп}}} X_o(\eta; \theta) \ln^2 \left(\frac{X_o(\eta; \theta)}{X_{\Phi}(\eta; \theta)} \right) d\eta d\theta}. \quad (4)$$

$$y = \frac{\iint_0^{\Omega_{\text{зп}}} \left[X_o(\eta; \theta) \ln \left(\frac{X_o(\eta; \theta)}{X_{\Phi}(\eta; \theta)} \right) - X_o(\eta; \theta) + X_{\Phi}(\eta; \theta) \right] d\eta d\theta - \ln A_{\Pi}}{\sqrt{\iint_0^{\Omega_{\text{зп}}} X_o(\eta; \theta) \ln^2 \left(\frac{X_o(\eta; \theta)}{X_{\Phi}(\eta; \theta)} \right) d\eta d\theta}}, \quad (5)$$

где θ, η — угловые координаты точек фона и объекта (угл. мин.); Ω — поле зрения (ср.);

A_{Π} — пороговое отношение правдоподобия.

Общее выражение для расчета $X(\eta, \theta)$ (1/мин²) имеет вид:

$$X(\eta; \theta) = \frac{a_1}{a_2} (1 + 1.3 \ln a_3) \ln a_3, \quad (6)$$

где

$$a_1 = 83.4 \left[0.04 + 0.68 \exp\left(-\left(\frac{R}{26}\right)^2\right) + 0.28 \exp\left(-\frac{R}{100}\right) \right], \quad (7)$$

$$a_2 = 1.0524 / \left[0.0524 + \exp\left(-\frac{R}{6}\right) \right], \quad (8)$$

$$a_3 = 1 + 0.00025 a_2 a_4 L, \quad (9)$$

$$a_4 = 79.5 (5 - 3 \text{th}[0.4 \lg L_{\text{ср}}])^2, \quad (10)$$

$$R = \sqrt{\eta^2 + \theta^2}, \quad (11)$$

$L, L_{\text{ср}}$ — наблюдаемая яркость (средняя наблюдаемая яркость);

η, θ — выражены в угловых минутах, L — в кд/м², $X(\eta, \theta)$ — в 1/мин².

Распределение яркости по плоскости огня секторного навигационного комплекса, в силу малости его угловых размеров, с высокой степенью точности можно считать равномерным и определять средней величиной ($L_{\lambda \text{ ср}}$).

Рассмотрено поперечное сечение двух световых полей навигационного комплекса: одного, состоящего из трех непрерывных секторов красного, зеленого и желтого цветов, и второго, состоящего из трех секторов синего цвета: центральный — непрерывный, боковые — проблесковые с частотой 2 и 6 Гц, коэффициент заполнения 0.5, дальность наблюдения 230 м., МДВ = 200 м.

Угловое распределение средней яркости излучения светового поля для центрального сектора и прилегающих переходных зон приведено в табл. 1. В общем случае при наблюдении светового поля происходит визирование огня, характеризуемого смешением двух цветов с различной средней яркостью ($L_{\lambda \text{ ср}}$), окруженного двухцветным ореолом с угловым распределением яркости ($L_{\lambda \text{ а } j}$) для каждого из них (рис. 1).

Пример подготовки исходных расчетных данных для точек А и Б для ночного и сумеречного наблюдения, когда яркость фона определяется рассеянным в атмосфере излучением огня комплекса представлен в таблице 2, для других точек светового поля данные готовятся аналогично. При наблюдении в дневных условиях яркость фона определяется рассеянным солнечным излучением.

Выражение для расчета логарифма отношения правдоподобия модели цветового зрения [1]:

$$\ln A = \ln(A_K A_3 A_C) = \ln(A_K) + \ln(A_3) + \ln(A_C), \quad (12)$$

где A_K, A_3, A_C — частные отношения правдоподобия, вычисленные для реакций К, 3, С — приемников.

Таблица 1. Распределение средней воспринимаемой яркости огня секторного комплекса в сечении светового поля

Цвет (пр.х.)	Угловое распределение средней яркости излучения ($L_{\lambda, cp j}$) в сечении ИП, кд/м ²															
ф, у.м.	1	3	5	7	9	11	13	15	115	117	119	121	123	125	127	129
Красн.	30.75	30.5	30.1	29.03	27.31	17.58	5.39	2.12	0.08	0.061	0.0608	0.0603	0.06	0.0596	0.0593	0.059
Зел.	0.944	2.49	7.68	18.57	22.73	23.71	24.23	24.6	24.6	24.4	24.05	23.49	21.16	14.02	4.31	1.48
Желт.	0.059	0.0591	0.0594	0.0599	0.06	0.0605	0.061	0.062	1.58	3.15	9.59	24.6	28.41	29.52	30.26	30.63
Син. (непр.)	2.36	6.23	19.2	46.43	56.83	59.28	60.58	61.5	61.5	61.5	60.13	58.73	52.9	35.05	10.76	3.7
Син. (2 Гц)	35.61	35.32	34.75	33.62	31.62	20.36	6.24	2.45	0.09	0.071	0.0704	0.0698	0.0695	0.0691	0.0687	0.068
Син. (6 Гц)	0.037	0.0372	0.0374	0.0377	0.038	0.0381	0.039	0.04	0.99	1.98	6.04	15.5	17.9	18.6	19.06	19.37

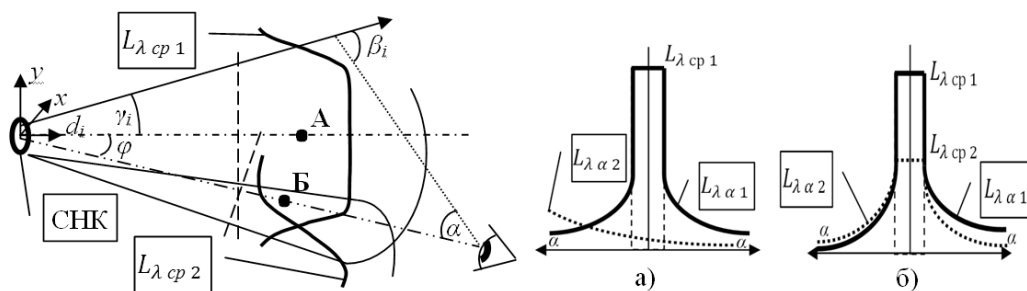


Рис. 1. Схема визирования светового поля и модели наблюдаемого огня для точек «А» — а) и «Б» — б)

Таблица 2. Угловое распределение яркости в области точек «А» и «Б»

α'_i	40	15	7	5	3	1	0	1	3	5	7	15	40	
Точка А	λ_1	$L_{\lambda \alpha j}$					$L_{\lambda cp 1}$			$L_{\lambda \alpha 1}$				
		0.2	0.49	0.87	0.59	0.67	0.6	0.6	0.6	0.67	0.59	0.87	0.49	0.2
Точка А	λ_2	$L_{\lambda \alpha 2}$												
		0.157	0.094	0.088	0.086	0.084	0.082	0.081	0.08	0.079	0.078	0.077	0.075	0.068
Точка Б	λ_1	$L_{\lambda \alpha j}$					$L_{\lambda cp 1}$			$L_{\lambda \alpha 1}$				
		0.01	0.038	0.22	0.8	0.78	0.71	0.05	0.23	0.63	0.57	0.857	0.48	0.197
Точка Б	λ_2	$L_{\lambda \alpha 2}$					$L_{\lambda cp 2}$			$L_{\lambda \alpha 2}$				
		0.25	0.47	0.8	0.225	0.34	0.58	0.59	0.39	0.53	0.16	0.12	0.11	0.093

Важнейшей особенностью статистической модели органа зрения является ее равноконтрастность по отношению к составляющим $\ln A: \ln(A_k), \ln(A_z), \ln(A_c)$. В пороговых условиях для модели цветового зрения можно записать [1]:

$$\ln A_n = m_{A_k} + m_{A_z} + m_{A_c} \quad (13)$$

где $m_{A_k}, m_{A_z}, m_{A_c}$ — математические ожидания сигналов К, З, С — приемников.

$$m_{\Delta_K} = \iint_0^{\Omega_{зр}} \left[X_{0K}(\eta; \theta) \ln \left(\frac{X_{0K}(\eta; \theta)}{X_{\Phi K}(\eta; \theta)} \right) - X_{0K}(\eta; \theta) + X_{\Phi K}(\eta; \theta) \right] d\eta d\theta. \quad (14)$$

$$m_{\Delta_3} = \iint_0^{\Omega_{зр}} \left[X_{03}(\eta; \theta) \ln \left(\frac{X_{03}(\eta; \theta)}{X_{\Phi 3}(\eta; \theta)} \right) - X_{03}(\eta; \theta) + X_{\Phi 3}(\eta; \theta) \right] d\eta d\theta. \quad (15)$$

$$m_{\Delta_C} = \iint_0^{\Omega_{зр}} \left[X_{0C}(\eta; \theta) \ln \left(\frac{X_{0C}(\eta; \theta)}{X_{\Phi C}(\eta; \theta)} \right) - X_{0C}(\eta; \theta) + X_{\Phi C}(\eta; \theta) \right] d\eta d\theta. \quad (16)$$

Тогда:

Значения $X_{o, \Phi(K, 3, C)}(\eta, \theta)$ (1/мин²) определяются из выражения 6, с учетом подстановки значений яркости:

$L_{o, \Phi(K, 3, C)}$, $L_{ср o, \Phi(K, 3, C)}$ — наблюдаемая яркость (средняя яркость) для К, 3, С-приемников.

Исходные выражения для определения $L_{o, \Phi(K, 3, C)}$, $L_{ср o, \Phi(K, 3, C)}$ [3]:

$$L_K = 683 L'_K \int_{380 \text{ нм}}^{780 \text{ нм}} L_{e\lambda}(\lambda) \bar{k}(\lambda) d\lambda. \quad (17)$$

$$L_3 = 683 L'_3 \int_{380 \text{ нм}}^{780 \text{ нм}} L_{e\lambda}(\lambda) \bar{\varepsilon}(\lambda) d\lambda. \quad (18)$$

$$L_C = 683 L'_C \int_{380 \text{ нм}}^{780 \text{ нм}} L_{e\lambda}(\lambda) \bar{c}(\lambda) d\lambda. \quad (19)$$

$$\text{где } L_{e\lambda}(\lambda) = \frac{L_V \lambda}{683 V_\lambda}$$

спектральная плотность энергетической яркости.

Тогда:

$$L_K = L'_K \int_{380 \text{ нм}}^{780 \text{ нм}} \frac{L_V \lambda}{V_\lambda} \bar{k}(\lambda) d\lambda. \quad (20)$$

$$L_3 = L'_3 \int_{380 \text{ нм}}^{780 \text{ нм}} \frac{L_V \lambda}{V_\lambda} \bar{\varepsilon}(\lambda) d\lambda. \quad (21)$$

$$L_C = L'_C \int_{380 \text{ нм}}^{780 \text{ нм}} \frac{L_V \lambda}{V_\lambda} \bar{c}(\lambda) d\lambda. \quad (22)$$

$$\begin{aligned} L_V &= \int_{380 \text{ нм}}^{780 \text{ нм}} L_V \lambda d\lambda = \int_{380 \text{ нм}}^{780 \text{ нм}} L'_{V \max} f(\lambda) d\lambda = \\ &= L'_{V \max} \int_{380 \text{ нм}}^{780 \text{ нм}} f(\lambda) d\lambda, \end{aligned} \quad (23)$$

где $L'_{V \max}$ — абсолютное значение максимальной спектральной плотности яркости; $f(\lambda)$ — спектр источника в относительных единицах.

$$L'_{V \max} = \frac{L_V}{\int_{380 \text{ нм}}^{780 \text{ нм}} f(\lambda) d\lambda}, \quad (24)$$

$$L_V = \frac{E_V}{\pi t g^2 \beta_i'} \quad (25)$$

где E_V — освещенность, создаваемая огнем СНК на зрачке глаза наблюдателя; L_V — наблюдаемая яркость; β_i — угол рассеяния, от направления падения света (по уровню 0.5).

Тогда:

$$L'_{V \max} = \frac{E_V}{\pi t g^2 \beta_i \int_{380 \text{ нм}}^{780 \text{ нм}} f(\lambda) d\lambda}. \quad (26)$$

$$L_{V\lambda} = L'_{V \max} f(\lambda) = \frac{E_V f(\lambda)}{\pi t g^2 \beta_i \int_{380 \text{ нм}}^{780 \text{ нм}} f(\lambda) d\lambda}. \quad (27)$$

В окончательном виде выражения для $L_{o, \Phi(K, 3, C)}$, $L_{ср o, \Phi(K, 3, C)}$:

$$L_K = L'_K \frac{E_V}{\pi t g^2 \beta_i} \int_{380 \text{ нм}}^{780 \text{ нм}} \frac{f(\lambda) \bar{k}(\lambda)}{V_\lambda \int_{380 \text{ нм}}^{780 \text{ нм}} f(\lambda) d\lambda} d\lambda. \quad (28)$$

$$L_3 = L'_3 \frac{E_V}{\pi t g^2 \beta_i} \int_{380 \text{ нм}}^{780 \text{ нм}} \frac{f(\lambda) \bar{\varepsilon}(\lambda)}{V_\lambda \int_{380 \text{ нм}}^{780 \text{ нм}} f(\lambda) d\lambda} d\lambda. \quad (29)$$

$$L_C = L'_C \frac{E_V}{\pi t g^2 \beta_i} \int_{380 \text{ нм}}^{780 \text{ нм}} \frac{f(\lambda) \bar{c}(\lambda)}{V_\lambda \int_{380 \text{ нм}}^{780 \text{ нм}} f(\lambda) d\lambda} d\lambda. \quad (30)$$

Для определения L'_K , L'_3 , L'_C построен совместный график V_λ и $\bar{k}(\lambda)$, $\bar{\varepsilon}(\lambda)$, $\bar{c}(\lambda)$ (рис. 2) [2].

Относительная спектральная световая эффективность определяется выражением [3]:

$$V(\lambda) = \bar{k}(\lambda) L'_K + \bar{\varepsilon}(\lambda) L'_3 + \bar{c}(\lambda) L'_C. \quad (31)$$

Из выражения (31), используя приведенные на рис. 2 значения $\bar{k}(\lambda)$, $\bar{\varepsilon}(\lambda)$, $\bar{c}(\lambda)$, получены значения для коэффициентов: $L'_C = 0.001$; $L'_K = 0.283$; $L'_3 = 0.577$.

Для расчетов использованы спектры светодиодов $f(\lambda)$ в относительных единицах рис. 3.

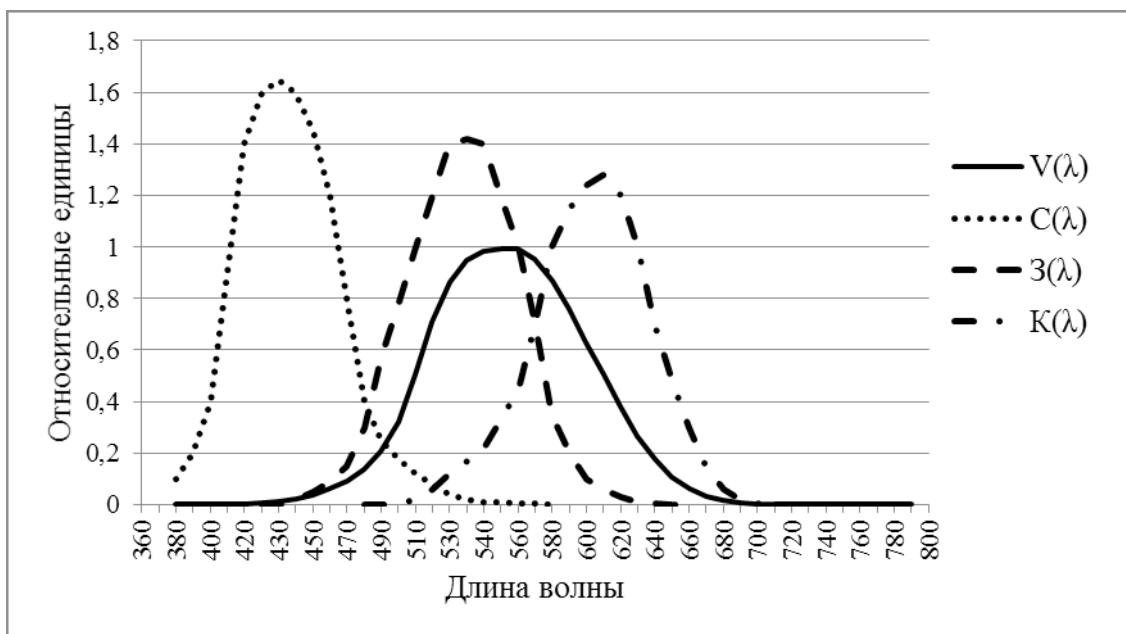
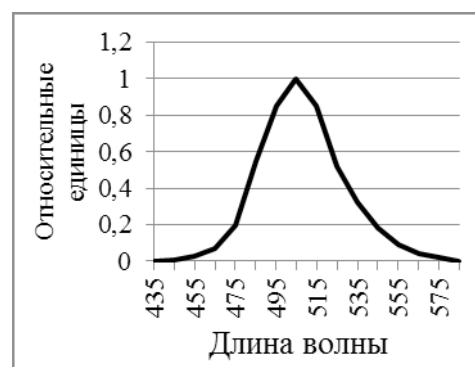


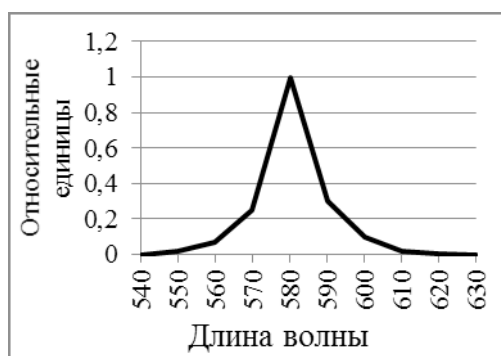
Рис. 2. Совместный график относительной спектральной световой эффективности V_{λ} и относительной спектральной чувствительности K, Z, S -приемников (рецепторов)



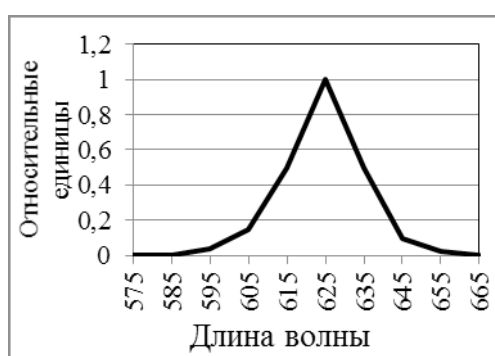
а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Спектры источников излучения: синего, зеленого, желтого и красного светодиодов (а, б, в, г, соответственно)

Таблица 3. ΔL цветных огней для границ секторов светового поля

Усл. наблюдения	ΔL , кд/м ² (Ночь, сумерки)	ΔL , кд/м ² (День)
Постоянный огонь		
Красный	7.23 (на зеленом)	107.1 (на белом)
Зеленый	11.41 (на красном)	168.9 (на белом)
Зеленый	11.78 (на желтом)	174.3 (на белом)
Желтый	15.94 (на зеленом)	235.9 (на белом)
Проблесковый огонь		
Синий постоянный/ Синий проблесковый	≈13.69 (на синем проблесковом / синем постоянном)	≈202.6 (на белом)

Средняя яркость объекта – огня СНК

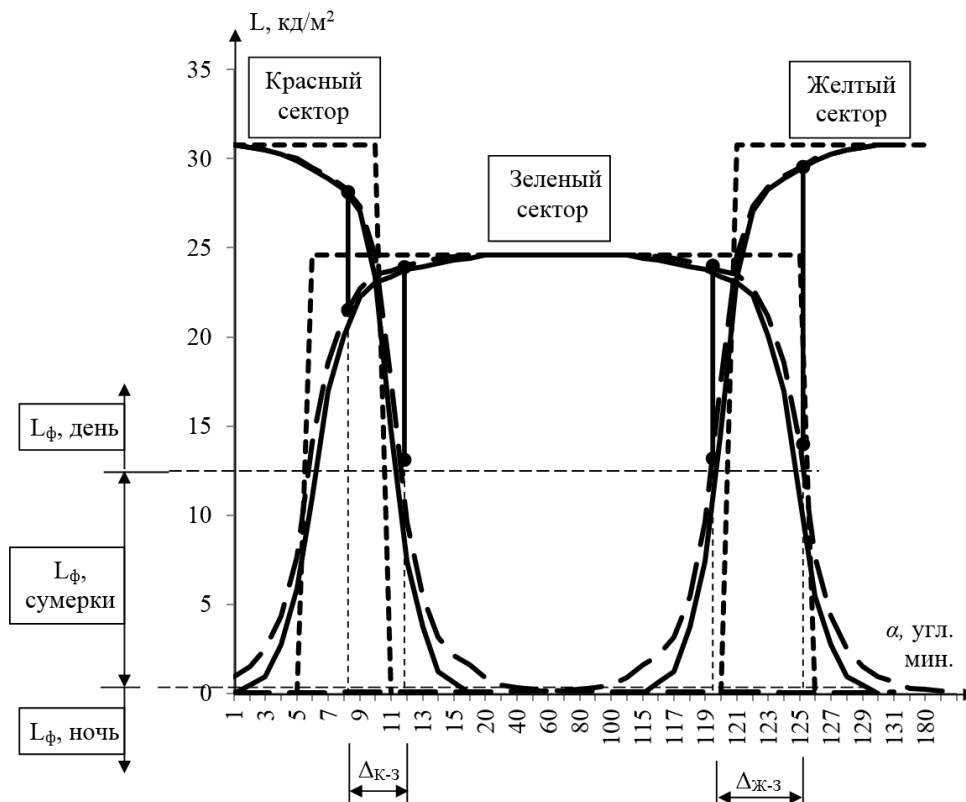


Рис. 4. Поперечное сечение разноцветного светового поля с учетом многократного рассеяния излучения комплекса в атмосфере (дистанция наблюдения 230 метров, метеорологическая дальность видимости 200 метров)

Результатом применения статистической модели является определение, разности яркости между цветными объектом и фоном, при которой объект на фоне обнаруживается с определенной вероятностью. Результат применения статистической модели зрительного анали-

затора для определения разности яркостей на границах красного, зеленого, желтого, синего (постоянного и проблескового) секторов, составляющих световое поле комплекса, приведен в таблице 3 (вероятность обнаружения $P_o = 1$).

Средняя яркость объекта – огня СНК

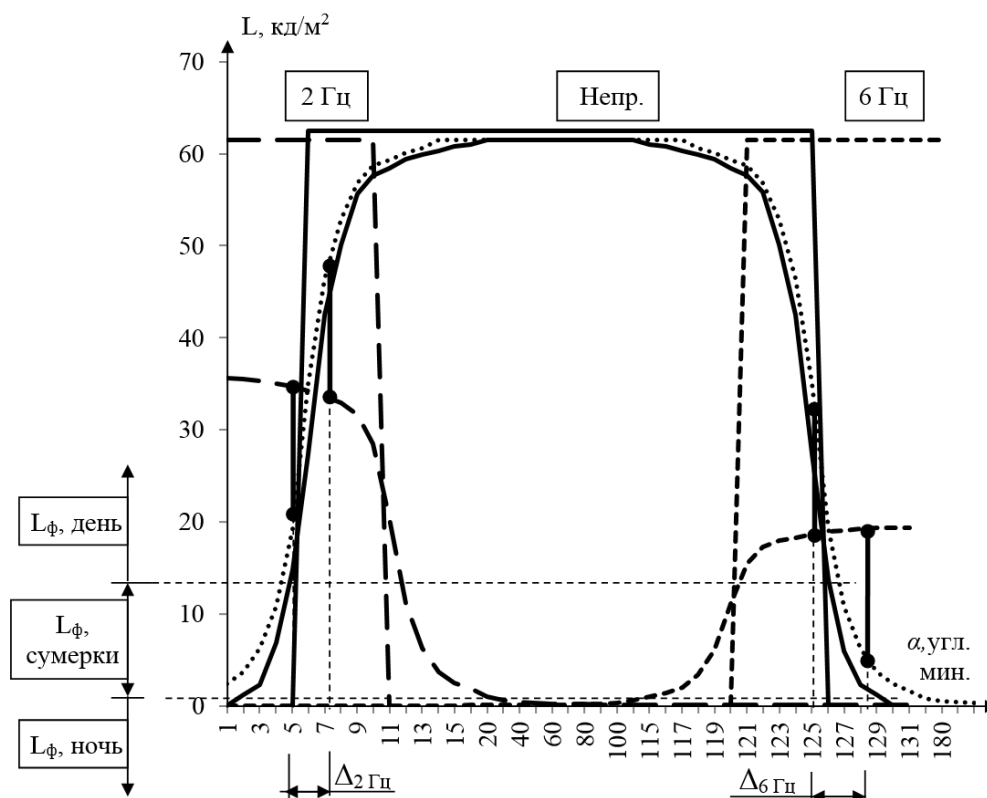


Рис. 5. Поперечное сечение одноцветного светового поля (центральный сектор непрерывный, боковые — с проблесковыми характеристиками 2 и 6 Гц, соответственно) с учетом многократного рассеяния излучения комплекса в атмосфере (дистанция наблюдения 230 метров, метеорологическая дальность видимости 200 метров)

Результаты применения статистической модели зрительного анализатора при оценке ширины переходных зон между секторами поля представлены на рис. 4, 5.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что для ночных и сумеречных условий ширина переходных зон остается одной и той же, поскольку условия наблюдения определяются яркостью рассеянного излучения огней навигационного комплекса. В дневных условиях на процесс наблюдения существенное влияние оказывает яркость рассеянного в атмосфере солнечного света, что приводит (при не превышении максимально допу-

стимых размеров переходных зон), так же как и в сумерках, к уменьшению дальности видимости огня комплекса.

Выводы

Полученные теоретически результаты подтверждены рядом натурных экспериментов, при которых расхождение размеров переходных зон не превышало 1 угловой минуты, что свидетельствует о точности описания процесса наблюдения огня навигационного комплекса статистической моделью зрительного анализатора при различных внешних условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев А. А. Принципы построения статистической модели цветового зрения // Труды Российской светотехнической интернет — конференции «Свет без границ». 2009. — С. 101–106.
2. Григорьев А. А., Гордюхина С. С. Определение удельных координат цвета физиологической системы с использованием статистической модели цветового зрения // Полупроводниковая светотехника. 2011. № 1. — С. 44–47.
3. Матвеев А. Б., Мешков В. В. Основы светотехники. ч. 2. М.: Энергоатомиздат. 1989. — 432с.