



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

С.Б. Стукалов

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ТРАНСПОРТЕ

Учебно-методическое пособие
по проведению практических занятий

для студентов
специальности 25.05.03
всех форм обучения

Москва
2019

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ (МГТУ ГА)»**

**Кафедра технической эксплуатации радиоэлектронного
оборудования воздушного транспорта**

С.Б. Стукалов

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ТРАНСПОРТЕ

**Учебно-методическое пособие
по проведению практических занятий**

*для студентов
специальности 25.05.03
всех форм обучения*

Москва
2019

ББК 6Ф0.3
С-88

Рецензент:

Яманов Д.Н. – канд. техн. наук, доцент

Стукалов С.Б.

С-88 Оптико-электронные технологии на транспорте: учебно-методическое пособие по проведению практических занятий./ С.Б. Стукалов. – Воронеж: ООО «МИР», 2019. – 40 с.

Данное учебно-методическое пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Оптико-электронные технологии на транспорте» по учебному плану для студентов специальности 25.05.03 всех форм обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры 26.03.2019 г. и методического совета 26.03.2019 г.

Учебно-методическое пособие издается в авторской редакции.

Подписано в печать 17.04.2019 г.

Формат 60x84/16 Печ.л. 2,5 Усл. печ. л. 2,33

Заказ 465/7612 Тираж 50 экз.

Московский государственный технический университет ГА

125993 Москва, Кронштадтский бульвар, д.20

Отпечатано ООО «МИР»

394033, г. Воронеж, Ленинский пр-т 119 А, лит. Я, оф. 215

Введение

Одним из наиболее важных источников информации у экипажа воздушных судов (ВС) является канал зрительного восприятия. Результаты летных экспериментов показали, что при полете по маршруту, при заходе на посадку воздушных судов в условиях ограниченной видимости пилоту важно зрительно увидеть препятствия в виде рельефа местности, рек, деревьев, опор линий передачи электроэнергии. Необходимо различить площадки, транспортные средства, здания или другие объекты. В настоящее время это можно сделать при помощи оптико-электронных средств (ОЭС). Бортовые ОЭС видения конструктивно устанавливаются в носовой части фюзеляжа воздушного судна или на гиростабилизированных платформах вертолетов (рис.1.1).



Рис.1.1– Устройства бортового оптико-электронного оборудования воздушных судов

Формируемые изображения ОЭС позволяют получить визуальную карту местности, которую можно применить для навигации и посадки воздушных судов (рис.1.2). Существует особая значимость данных устройств для воздушных судов гражданской авиации, выполняющих полет по маршруту и выполнение посадки в сложных метеоусловиях. Плохие погодные условия, такие как туман, нередко становились причиной авиакатастроф. Применение современных оптико-электронных средств и методов позволит уменьшить расходы авиакомпаний, вызванных задержками вылетов или их отменой из-за погодных факторов. Использование таких подходов увеличит шансы выполнить посадку воздушных судов с первого раза, и обеспечит экономию ресурсов. И это может существенно повысить уровень безопасности полета воздушных судов.



Рис. 1.2 – Результаты регистрации изображения от ОЭС при полете ВС в сельской местности (а) и вблизи города (б)

С целью практического освоения положений оптико-электронных технологий подготовлен сборник задач. Учебный материал сборника задач разделен на три главы, в которых излагаются: физические основы использования оптико-электронных устройств на транспорте, обнаружение и регистрация сигналов в оптико-электронных устройствах и характеристики бортовых оптико-электронных систем воздушных судов гражданской авиации. В начале каждого раздела представлены краткие теоретические сведения, необходимые для решения задач. Даны задачи по анализу характеристик оптического излучения. Представлены параметры и характеристики оптических излучателей. Поставлены задачи по определению параметров, необходимых для практической работы оптико-электронных средств. Предлагается выполнить анализ влияния среды распространения на работу оптико-электронных систем. Учебный материал касается теории приема и обработки сигналов в оптико-электронных системах транспорта, приемников оптико-электронных систем, методы приема и обработки оптических сигналов, вопросы передачи информации с помощью волоконно-оптических линий.

В учебно-методическом пособии представлены задачи, связанные с анализом работы и техническими характеристиками современных бортовых и наземных оптико-электронных средств, предназначенных к применению в гражданской авиации. В центре внимания учебно-методического пособия находятся вопросы практического применения элементов оптико-электронных устройств. Задачи предлагается выполнять студентам очной и заочной форм обучения. **Студентам заочной формы обучения необходимо самостоятельно выполнить задания главы 1.** При подготовке к решению задач использовать литературу [1].

Глава 1

Физические основы использования оптико-электронных устройств на транспорте

Краткие сведения из теории

Для пространственной характеристики оптического излучения используют телесный угол Ω (рис.1.3.) с единицей измерения - стерадиан (ср):

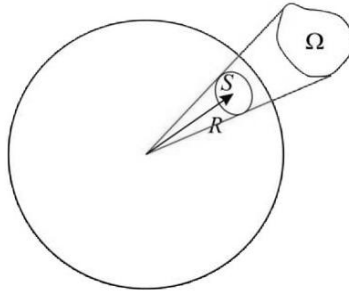


Рис. 1.3 – Пространственное распределение в телесном угле Ω .

Телесный угол определяют по формуле:

$$\Omega = \frac{S}{R^2},$$

где R - расстояние от источника до поверхности, S - площадь поверхности.

Для характеристики свойств оптического излучения используют энергетические величины и фотометрические (световые) величины. Деление на два типа вызвано необходимостью использования величин, связанных с реакцией фотоприемников или зрения на воздействующее световое излучение.

Средняя мощность Φ_e , переносимая оптическим излучением за время, значительно большее периода электромагнитных колебаний, называется *поток*ом излучения. Параметр входит в систему энергетических величин. Функция, описывающая зависимость потока монохроматического излучения $\Phi_e(\lambda)$ от длины волны определяет спектральный состав излучения. Мощность, переносимую потоком в области длин волн $d\lambda$ определяет произведение $\Phi_e(\lambda)d\lambda$:

$$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_e(\lambda) d\lambda.$$

Типовые величины, характеризующие оптическое излучение, приведены в табл. 1, 2. (прил.1).

Для точечного источника излучения (тела, имеющего малые размеры по сравнению с расстоянием) используют величину - *силу излучения*, которую оценивают отношением потока излучения $d\Phi_e$, распространяющегося от источника к этому телесному углу $d\Omega$:

$$I_e = d\Phi_e / d\Omega.$$

Отношение измеренной в этом направлении энергетической силы оптического излучения к видимой площади излучающей поверхности называют *энергетической яркостью* излучающей поверхности в данном направлении:

$$L_{e\theta} = I_{e\theta} / dA,$$

где $I_{e\theta}$ – энергетическая сила света в направлении θ ; dA – видимая площадь элемента поверхности dA в направлении, образующем угол θ с нормалью к элементу dA .

Отношение потока излучения, испускаемого малым элементом поверхности по одну сторону к площади этого элемента dA называют *энергетической светимостью* M_e :

$$M_e = d\Phi_e / dA.$$

Энергетической освещенностью (облученностью) E_e называют отношение потока излучения $d\Phi_e$, падающего на малый элемент поверхности, к площади этого элемента dA .

Отношение энергетической величины (освещенности, силы света, яркости), взятой в малом спектральном интервале длин волн, к ширине этого интервала $\Delta\lambda$ называется *спектральной плотностью*.

Световые величины определяются аналогично соответствующим энергетическим величинам.

Для оценки мощности излучения по производимому им световому ощущению, т.е. по реакции на воздействие потока излучения, пользуются световой поток и световые величины. Зрение неодинаково чувствительно к излучению различных длин волн. Отношение значения светового потока $\Phi_{v\lambda}$, воспринимаемого зрением к значению потока излучения $\Phi_{e\lambda}$ на той же длине волны λ характеризует спектральную световую эффективность:

$$K_{\lambda} = K(\lambda) = \frac{\Phi_{v\lambda}}{\Phi_{e\lambda}}.$$

Результат сравнения K_{λ} для какой-либо длины волны излучения с максимальным значением K_m называют относительной спектральной световой эффективностью для дневного зрения:

$$V_{\lambda} = V(\lambda) = \frac{K_{\lambda}}{K_m},$$

где $K_m=683 \text{ лм}\cdot\text{Вт}^{-1}$ – световой эквивалент потока излучения.

График V_{λ} характеризует спектральную чувствительность зрения (рис. 1.4).

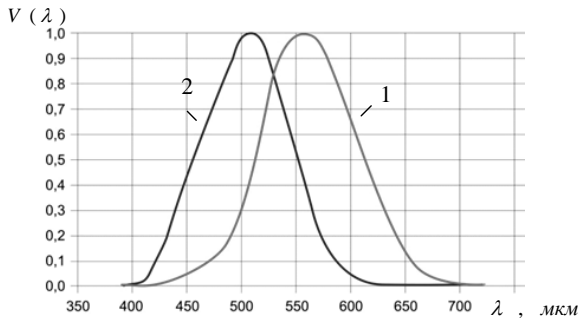


Рис.1.4 – Спектральная чувствительность зрения (кривая 1- для дневного зрения, кривая 2 — глаз адаптирован к ночным яркостям).

Максимум кривой соответствует $\lambda_{max} = 0,555 \text{ мкм}$. Используя спектральную чувствительность можно определить результирующий световой поток:

$$\Phi_v = \int_0^{\infty} K_{\lambda} \Phi_{e\lambda} d\lambda = \int_{0,38}^{0,78} K_{\lambda} \Phi_{e\lambda} d\lambda = 683 \int_{0,38}^{0,78} V_{\lambda} \Phi_{e\lambda} d\lambda.$$

От диапазона значений K_{λ} зависят пределы интегрирования. Расчет эффективности потока может быть проведен аналогично и для фотоприемников. В этом случае формулах вместо спектральной чувствительности зрения K_{λ} необходимо применять спектральную характеристику фотоприемников оптико-электронных устройств S_{λ} .

Задачи

Анализ характеристик пропускания атмосферного канала передачи информации

1.1. Рассчитать спектральный коэффициент пропускания слоя атмосферы для дистанции $1,05^N$ км, в области спектра от 0,5 до 3,0 мкм с шагом 0,10 мкм. Температура воздуха 20°C , относительная влажность 70%. Метеорологическая дальность видимости $S_M = 1,1^N$, N - номер варианта *(по списку студентов)*.

1.2. Построить график спектра коэффициента пропускания.

1.3. Выполнить анализ окон прозрачности атмосферы.

Методические указания

Для выполнения задания вначале следует определить количество осажденной воды на длине 1 км по формуле:

$$\omega_0 = \frac{2,167 \cdot 10^4}{T} \cdot f \cdot e,$$

где ω_0 – количество воды в мм на длине 1 км;

T – температура воздуха, K ;

f – относительная влажность воздуха, %;

e – упругость насыщающих паров, Па (табл.1.1)

Таблица 1.1

Упругость насыщающих паров в зависимости от температуры воздуха.

$t, ^\circ\text{C}$	$e, \text{Па}$
0	$6,108 \cdot 10^{-4}$
5	$8,719 \cdot 10^{-4}$
10	$1,227 \cdot 10^{-3}$
15	$1,704 \cdot 10^{-3}$
20	$2,337 \cdot 10^{-3}$
25	$3,167 \cdot 10^{-3}$
30	$4,243 \cdot 10^{-3}$
35	$5,624 \cdot 10^{-3}$
40	$7,377 \cdot 10^{-3}$
45	$9,585 \cdot 10^{-3}$
50	$1,234 \cdot 10^{-2}$

Далее определить толщину слоя осажденной воды на заданной трассе:

$$\omega = \omega_0 \cdot l ,$$

где l – длина трассы в км.

Затем, пользуясь табл. 1.2, *определить* спектральный коэффициент пропускания излучения парами воды. Если толщина слоя осажденной воды не совпадает со значениями в табл. 1.2, то следует провести интерполяцию.

Таблица 1.2

Спектральные коэффициенты пропускания излучения парами воды для горизонтальной трассы на уровне моря

λ , мкм	Толщина слоя осажденной воды, мм						
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10
0,5	0,986	0,980	0,968	0,956	0,937	0,901	0,861
0,6	0,990	0,986	0,977	0,968	0,955	0,929	0,900
0,7	0,991	0,987	0,980	0,972	0,960	0,937	0,910
0,8	0,989	0,984	0,975	0,965	0,950	0,922	0,891
0,9	0,965	0,951	0,922	0,890	0,844	0,757	0,661
1,0	0,990	0,986	0,977	0,968	0,955	0,929	0,900
1,1	0,970	0,958	0,932	0,905	0,866	0,790	0,707
1,2	0,980	0,972	0,955	0,937	0,911	0,860	0,802
1,3	0,726	0,610	0,432	0,268	0,116	0,013	0
1,4	0,930	0,902	0,844	0,782	0,695	0,536	0,381
1,5	0,997	0,994	0,991	0,988	0,982	0,972	0,960
1,6	0,998	0,997	0,996	0,994	0,991	0,986	0,980
1,7	0,988	0,997	0,996	0,994	0,991	0,986	0,980
1,8	0,729	0,707	0,555	0,406	0,239	0,062	0,008
1,9	0,960	0,943	0,911	0,874	0,822	0,723	0,617
2,0	0,985	0,979	0,966	0,953	0,933	0,894	0,851
2,1	0,997	0,994	0,991	0,988	0,982	0,972	0,960
2,2	0,998	0,997	0,996	0,994	0,991	0,986	0,980
2,3	0,997	0,994	0,991	0,988	0,982	0,972	0,960
2,4	0,997	0,972	0,955	0,937	0,911	0,860	0,8020
2,5	0,980	0,902	0,844	0,782	0,695	0,536	0,918
2,6	0,930	0,479	0,261	0,110	0,002	0	0
2,7	0,617	0,196	0,040	0,004	0	0	0
2,8	0,361	0,289	0,092	0,017	0,001	0	0
2,9	0,689	0,517	0,369	0,205	0,073	0,005	0
3,0	0,851	0,790	0,673	0,552	0,401	0,184	0,060

Продолжение таблицы 1.2

Спектральные коэффициенты пропускания излучения парами воды для горизонтальной трассы на уровне моря

λ , мкм	Толщина слоя осажденной воды, мм					
	20	50	100	200	500	1000
0,5	0,804	0,695	0,579	0,433	0,215	0,079
0,6	0,860	0,779	0,692	0,575	0,375	0,210
0,7	0,873	0,800	0,722	0,615	0,425	0,260
0,8	0,845	0,758	0,663	0,539	0,330	0,168
0,9	0,535	0,326	0,165	0,050	0,002	0,000
1,0	0,860	0,779	0,692	0,575	0,375	0,210
1,1	0,595	0,406	0,235	0,093	0,008	0,000
1,2	0,723	0,574	0,428	0,236	0,076	0,012
1,3	0	0	0	0	0	0
1,4	0,216	0,064	0	0	0	0
1,5	0,944	0,911	0,874	0,823	0,724	0,616
1,6	0,972	0,956	0,937	0,911	0,860	0,802
1,7	0,972	0,956	0,937	0,911	0,860	0,802
1,8	0	0	0	0	0	0
1,9	0,478	0,262	0,113	0,024	0	0
2,0	0,790	0,674	0,552	0,401	1,184	0,006
2,1	0,944	0,911	0,874	0,823	0,724	0,616
2,2	0,972	0,956	0,937	0,911	0,860	0,802
2,3	0,944	0,911	0,974	0,823	0,724	0,616
2,4	0,723	0,574	0,428	0,263	0,076	0,012
2,5	0,216	0,064	0,005	0	0	0
2,6	0	0	0	0	0	0
2,7	0	0	0	0	0	0
2,8	0	0	0	0	0	0
2,9	0	0	0	0	0	0
3,0	0,008	0	0	0	0	0

Далее *определить* спектральный коэффициент пропускания излучения углекислым газом по табл. 1.3. Если толщина слоя осажденной воды не совпадает со значениями в табл. 1.3., то следует провести интерполяцию.

Таблица 1.3

Спектральные коэффициенты пропускания излучения углекислым газом для горизонтальной трассы для уровня моря.

λ , мкм	Протяженность трассы, км					
	0.1	0.2	0.5	1	2	5
0.5...1.2	1	1	1	1	1	1
1.3	1	1	1	0.999	0.999	0.999
1.4	0.996	0.995	0.992	0.988	0.984	0.975
1.5	0.999	0.999	0.998	0.998	0.997	0.995
1.6	0.996	0.995	0.992	0.998	0.984	0.975
1.7	1	1	1	0.999	0.99	0.999
1.8	1	1	1	1	1	1
1.9	1	1	1	0.999	0.999	0.999
2	0.978	0.969	0.951	0.931	0.903	0.847
2.1	0.998	0.997	0.996	0.994	0.992	0.987
2.2...2.6	1	1	1	1	1	1
2.7	0.799	0.718	0.569	0.419	0.253	0.071
2.8	0.871	0.804	0.695	0.578	0.432	0.215
2.9	0.997	0.995	0.993	0.990	0.985	0.977
3.0...3.9	1	1	1	1	1	1

Продолжение таблицы 1.3

Спектральные коэффициенты пропускания излучения углекислым газом для горизонтальной трассы для уровня моря.

λ , мкм	Протяженность трассы, км				
	10	20	50	100	200
0.5...1.2	1	1	1	1	1
1.3	0.998	0.997	0.996	0.994	0.992
1.4	0.964	0.949	0.919	0.885	0.838
1.5	0.993	0.990	0.984	0.976	0.967
1.6	0.964	0.949	0.919	0.885	0.838
1.7	0.998	0.997	0.996	0.994	0.992
1.8	1	1	1	1	1
1.9	0.998	0.997	0.996	0.994	0.992
2	0.785	0.699	0.541	0.387	0.221
2.1	0.982	0.974	0.959	0.942	0.919
2.2...2.6	1	1	1	1	1
2.7	0.011	0	0	0	0
2.8	0.079	0.013	0	0	0
2.9	0.968	0.954	0.927	0.898	0.855
3.0...3.9	1	1	1	1	1

Затем определяют спектральный коэффициент пропускания за счет аэрозолей, воспользовавшись формулой (1.1-1.7). Если слой l_0 однороден, то спектральный коэффициент прозрачности определяется как (при условии $k(\lambda) = \text{const}$):

$$\tau(l_0, \lambda) = e^{-k(\lambda)l_0}. \quad (1.1)$$

Показатель ослабления $k(\lambda)$ является суммой показателей рассеяния $\sigma(\lambda)$ и поглощения $\alpha(\lambda)$:

$$k(\lambda) = \sigma(\lambda) + \alpha(\lambda). \quad (1.2)$$

В задании провести учет аэрозольного ослабления.

Аэрозольное ослабление

Аэрозольное ослабление включает в себя рассеяние на частицах и поглощение.

Расчет показателя аэрозольного ослабления $k_A(\lambda)$ как функции от длины волны, весьма затруднен, из-за того, что при расчете необходимо знать количество, размеры, форму и состав вещества аэрозольных частиц, на которых происходит рассеяние излучения. Из-за многообразия различных состояний атмосферы, метеорологических условий и сезонов года зависимость показателей $k_A(\lambda)$ от λ достаточно изменчива. На основании экспериментальных исследований явлений атмосферы получена следующая эмпирическая зависимость:

$$k_A(\lambda) = B \cdot \lambda^{-n}, \quad (1.3)$$

где n лежит в пределах от 0 до 4, причем вариации $0 \leq n \leq 4$ примерно соответствуют следующим состояниям атмосферы:

$n = 0 \div 1$ - состояние атмосферы в условиях сплошного тумана ($n=0$) и слабого тумана ($n=1$)

$n = 2 \div 3$ - наиболее устойчивое состояние безоблачной атмосферы при метеорологической дальности видимости S_M от 10 до 20 км;

$3 < n < 4$ - соответствует безоблачной атмосфере для $S_M > 20$ км;

B - параметр, зависящий от состояния атмосферы.

Иногда для расчета $k_A(\lambda)$ в условиях, когда $S_M > 2$ км и $\lambda < 3$ км, пользуются формулой:

$$k_A(\lambda) = \left(\frac{3,91}{S_M}\right) \cdot \left(\frac{\lambda}{0,55}\right)^{-n_S}, \quad (1.4)$$

где $n_S = 0.585 \cdot S_M^{1/3}$ - для плохих погодных условий ($S_M \leq 6$ км)

$n_s = 1,3$ – для средних метеоусловий,

$n_s = 1,5$ – для хороших метеоусловий.

Для расчетов значений $k_A(\lambda)$ используется следующее значение на длине волны $\lambda = 0.555$ мкм:

$$k_A(\lambda_{0,555}) = \frac{3,91}{S_M}, \quad (1.5)$$

где S_M в км – метеорологическая дальность видимости, которая представляет наибольшую дальность видимости днем темных предметов, проектирующихся на фоне неба у горизонта при величине контраста равным величине порога контрастной чувствительности глаза равным $0,02 \div 0.03$.

Таблица 1.4

Международная шкала видимости

Видимость, S_M	км	Условия наблюдения
Очень плохая	<0,05	Очень сильный туман
Плохая	0,5...1 1...2	Слабый туман, сильная дымка Умеренный снег, сильный дождь
Средняя	2...10	Слабый снег, дождь, слабая дымка
Хорошая	10...20	Без осадков
Очень хорошая	20...50	Без осадков
Отличная	>50	Совершенно чистый воздух

Для определения параметра B приравняем правые части формул (1.3,1.5):

$$B \cdot \lambda^{-N} = \frac{3,91}{S_M}. \quad (1.6)$$

Это справедливо для $\lambda = 0,555$ мкм. Отсюда

$$B = \frac{3,91}{S_M \cdot \lambda^{-N}} = \frac{3,91}{S_M} \cdot \frac{1}{0,555^{-n}}. \quad (1.7)$$

По известному значению B можно определить $k_A(\lambda)$ на других длинах волн по формуле (1.3).

Общий коэффициент пропускания будет:

$$r(\lambda) = \tau_A(\lambda) \cdot \tau_{CO_2}(\lambda) \cdot \tau_{H_2O}(\lambda), \quad (1.8)$$

где $\tau_A(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания излучения за счет аэрозолей;

$\tau_{CO_2}(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания излучения углекислым газом;

$\tau_{H_2O}(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания излучения парами воды.

Примерный вид картины пропускания атмосферного канала для приземного слоя представлен на рис.1.5. Это совокупность полос с разными показателями пропускания.

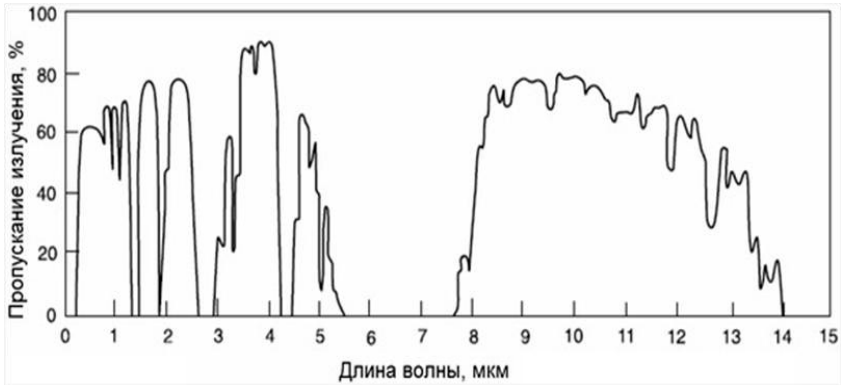


Рис.1.5 – Характеристика пропускания атмосферы

В атмосферном канале приземного слоя образуются окна прозрачности для оптического излучения: 0,95...1,05; 1,2...1,3; 1,5...1,8; 2,1...2,4; 3,3...4,2; 4,5...5,0; 8...13 мкм. С увеличением высоты плотность воздуха и количество поглощающих компонентов уменьшаются, а окна опускания атмосферы расширяются.

Расчеты по заданию представить в виде таблице 1.5.

Таблица 1.5

Результаты вычислений

λ	$\tau_{H_2O}(\lambda)$	$\tau_{CO_2}(\lambda)$	B	$\sigma_A(\lambda)$	$\tau_a(\lambda)$	$r(\lambda)$

По результатам расчетов построить графики зависимости $r(\lambda)$.

На основании полученных графиков провести анализ пропускания атмосферного канала передачи информации для разных длин волн оптического излучения.

Глава 2

Обнаружение и регистрация сигналов в оптико-электронных устройствах

Для расчетов ОЭС используют параметры и характеристики приемников оптического излучения.

Параметрами приемников оптического излучения обычно называют величины, характеризующие свойства приемника при работе его в определенных условиях и служащие критериями оценки его качества.

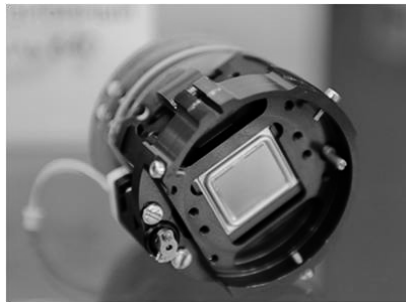


Рис.2.1 – Приемник оптического излучения оптико-электронной системы

Чувствительность на данной длине волны – это отношение излучения измеренной электрической величины (напряжения U_λ), вызванное падением на приемник излучения, к изменению количественной характеристики этого излучения (потока Φ_λ):

$$S_\lambda = \frac{dU_\lambda}{d\Phi_\lambda}$$

Интегральная чувствительность S это мера реакции приемника на сложный по спектру поток излучения:

$$S = \frac{dU}{d\Phi}$$

Интегральная чувствительность зависит от конструкции приемника, и от характеристик излучения объекта. Приводимые в паспортах приемников

оптического излучения значения S обычно измеряются по излучению эталонных источников абсолютно черного тела (АЧТ) [4]:

источник типа А – это АЧТ с $T = 2848 \text{ K}$;

источник типа Б – это АЧТ с $T = 2500 \text{ K}$;

источник типа В – это АЧТ с $T = 2900 \text{ K}$.

В качестве эталонного источника при измерении паспортной чувствительности сопротивлений для ИК области используется еще АЧТ при $T = 373 \text{ K}$ или $T = 573 \text{ K}$. За рубежом параметры фотосопротивлений чаще измеряются по излучению АЧТ с $T = 500 \text{ K}$. В последнее время это применяют и в отечественных разработках, что позволяет сравнивать чувствительности приемников излучения различных производителей.

Пороговым потоком $\Phi_{\text{п}}$ называется минимальный поток излучения, который вызывает на выходе приемника сигнал, эквивалентный уровню собственных шумов.

Для более объективного сравнения различных типов приемников оптического излучения принято выражать пороговый поток для единичной полосы частот и единичной площади чувствительного слоя:

$$\Phi_{\text{п}}^* = \frac{\Phi_{\text{п}}}{\sqrt{A \cdot \Delta f}},$$

где A - размер площадки приемника оптического излучения, Δf –полоса пропускания.

Иногда в расчетах удобно пользоваться величиной, обратной $\Phi_{\text{п}}^*$, называемой *обнаружительной способностью*:

$$D^* = \frac{1}{\Phi_{\text{п}}^*}.$$

Обнаружение оптического излучения

Основные формулы для расчета

энергетическая освещённость от точечного источника

$$E_e = \frac{I_e}{r^2} \cos \varepsilon,$$

где r — расстояние от источника до облучаемой поверхности; ε — угол падения лучей на поверхность;

энергетическая освещённость от источника, имеющего форму круглого диска или сферы,

$$E_e = \pi L_e \sin^2 \omega,$$

где 2ω — угловой размер источника из точки, в которой определяется энергетическая освещенность;

связь между энергетической яркостью и энергетической светимостью

$$L_e = M_e / \pi;$$

энергетическая яркость вторичного источника

$$L_e = \rho \frac{E_e}{\pi}$$

где ρ — коэффициент диффузного отражения вторичного источника.

Энергетическая светимость тепловых источников определяется по закону Стефана — Больцмана:

$$M_e = \sigma \varepsilon T^4,$$

где ε — коэффициент теплового излучения реального тела;

$\sigma = 5,672 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$; T — температура по абсолютной шкале, К.

Для световых величин сохраняются те же формулы, что и для энергетических, с соответствующими единицами. Переход от энергетических единиц к световым и наоборот выполняется через световую эффективность излучения:

$$K = \frac{\Phi_v}{\Phi_e} = \frac{680 \int v(\lambda) \Phi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int \Phi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda}$$

где $v(\lambda) = K(\lambda)/K_m$ — относительная спектральная световая эффективность; $K(\lambda) = \Phi_{v,\lambda}(\lambda)/\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ — спектральная световая эффективность; $K_m = 680 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$ — максимальное значение спектральной световой эффективности.

Если источник света яркостью L_0 расположен на оптической оси, то освещенность его изображения при равенстве показателей преломления сред пространства предметов и изображений определяется выражением

$$E'_v = \tau \pi L_0 \sin^2 \sigma'_{A'},$$

где τ — коэффициент пропускания оптических сред, расположенных между предметом и его изображением; $\sigma'_{A'}$ — апертурный угол в пространстве изображений.

Последнюю формулу иногда применяют в виде

$$E'_v = \frac{\tau\pi L_0}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \frac{\beta_p^2}{(\beta_p - \beta)^2},$$

где D/f' — относительное отверстие; β_p — линейное увеличение в зрачках; β — линейное увеличение в сопряженных плоскостях.

Если предметная плоскость находится в бесконечности, то $\beta = 0$ и формула принимает вид

$$E'_v = \frac{\tau\pi L_0}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2.$$

Для предмета, расположенного вне оптической оси, освещённость его изображения

$$E'_{v,\omega'} = E'_v k_\omega \cos^4 \omega',$$

где k_ω — коэффициент виньетирования наклонного пучка; ω' — половина углового паля в пространстве изображений.

Коэффициент пропускания оптической системы приближённо можно вычислить по формуле

$$\tau_{OC} = 0,96^{N_{кр}} \cdot 0,94^{N_{фл}} \cdot 0,98^{N_1} \cdot 0,99^{N_2} \cdot 0,995^{N_3} \cdot 0,99^d \cdot 0,9^{N_0},$$

где $N_{кр}$ — число границ крон - воздух; $N_{фл}$ — число границ флинт - воздух; N_1 — число однослойно просветленных поверхностей; N_2 — число двухслойно просветлённых поверхностей; N_3 — число трехслойно просветленных поверхностей; d — суммарная толщина оптических деталей по оси; N_0 — число отражающих (зеркальных) поверхностей.

Задачи

2.1. На каком расстоянии от площадки подсвета нужно расположить источник силой света $I_v = 300 \text{ кд}$, чтобы при освещении получить яркость площадки $L_v = 50 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$? Угол падения лучей на поверхность площадки $\varepsilon = 0$, коэффициент диффузного отражения площадки $\rho = 0,65$.

2.2. Определить яркость площадки объекта (рис.2.2) с коэффициентом диффузного отражения $\rho = 0,6$, освещаемой источником силой света $I_v = 500 \text{ кд}$, с расстояния $r = 100 \text{ м}$. Угол падения лучей на освещаемую поверхность $\varepsilon = 30^\circ$.

2.3. Фотоприемник с диаметром светочувствительной поверхности $d_{np} = 20 \text{ мм}$ расположен от источника на расстоянии $r = 10 \text{ м}$. Определить

силу света источника, при которой на фотоприемник упадёт световой поток $\Phi_v = 0.05$ лм. Угол падения лучей на поверхность фотоприемника $\varepsilon = 0$.

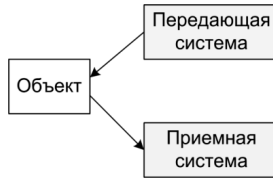


Рис.2.2 – Подсвет объекта источником света

2.4. Над фотоприемником с диаметром фоточувствительной поверхности $d_{np} = 15$ мм расположен источник силой света $I_v = 10$ кд.

На каком расстоянии от фотоприемника должен находиться источник, чтобы на его светочувствительную поверхность падал световой поток $\Phi_v = 0,002$ лм? Каково будет значение светового потока, падающего на светочувствительную поверхность фотоприемника, если его сместить в сторону на 2 м?

2.5. Площадка с коэффициентом диффузного отражения $\rho = 0,4$ и размером 4×4 см освещается источником силой света $I_v = 200$ кд с расстояния $r_1 = 15$ м.

На расстоянии $r_2 = 0,8$ м от площадки расположен фотоприемник с диаметром светочувствительной поверхности $d_{np} = 30$ мм. Определить световой поток, падающий на светочувствительную поверхность фотоприемника, при засветке его излучением, отражённым от площадки. Считать, что угол падения световых лучей на поверхность площадки и фотоприемника $\varepsilon = 0$.

2.6. Поверхность площадью $Q_{эк} = 16$ м² равномерно освещается световым потоком $\Phi_v = 500$ лм. Найти яркость площадки, если ее коэффициент диффузного отражения $\rho = 0,7$.

2.7. Точечный источник света излучает равномерно по всем направлениям световой поток $\Phi_v = 500$ лм. На каком расстоянии от источника нужно расположить площадку, чтобы освещённость площадки была $E_v = 20$ лк? Угол падения световых лучей на экран $\varepsilon = 0$.

2.8. Поверхность площадки с коэффициентом диффузного отражения $\rho = 0,6$ освещается двумя источниками, имеющими силу света $I_{v_1} = 200$ кд, $I_{v_2} = 70$ кд и вертикально расположенными на высоте 100 м.

Расстояние между источниками 20 м. Найти яркость площадки в точках вертикального проецирования источников.

2.9. Фотоприемник площадью светочувствительной поверхности $Q_{\text{фз}} = 9 \text{ мм}^2$ освещается двумя источниками. Определить силу света первого источника, если сила света второго источника $I_{v_2} = 15 \text{ кд}$, а на светочувствительную поверхность фотоприемника должен упасть световой поток $\Phi_v = 6 \cdot 10^{-4} \text{ лм}$. Условия освещения аналогичны задаче 2.8.

2.10. На каком расстоянии от освещаемого объекта можно считать точечным источник, имеющий форму круглого плоского диска, если его площадь $Q = 10 \text{ мм}^2$? Допустимая относительная погрешность в определении освещённости, обусловленная пренебрежением конечными размерами источника, не должна превышать 5%.

2.11. Точечный источник силой света $I_v = 300 \text{ кд}$ расположен на расстоянии $r_1 = 100 \text{ м}$ от экрана. Найти освещённость в центре экрана, если по другую сторону от источника на расстоянии $r_2 = 5 \text{ м}$ параллельно экрану установлено плоское зеркало. Коэффициент отражения зеркала $\tau_0 = 0,94$.

2.12. На высоте $r_1 = 5 \text{ м}$ над плоской поверхностью расположен источник света. Считая излучатель точечным источником с постоянной силой света по всем направлениям, определить её силу света, при которой освещённость под лампой $E_v = 30 \text{ лк}$. Определить диаметр круга под источником света, в пределах которого освещённость уменьшается в 2 раза.

2.13. На высоте $r = 15 \text{ м}$ над центром круглой площадки диаметром $d = 1 \text{ м}$ расположен точечный источник, сила света которого описывается функцией, обеспечивающей равномерную освещённость во всех точках площадки. Найти вид функции $I_v(\varepsilon)$ и световой поток, падающий на поверхность стола, если сила света источника по направлению, перпендикулярному к поверхности площадки, составляет $I_v = 500 \text{ кд}$.

2.14. Над площадкой на высоте $r = 10 \text{ м}$ установлен источник подсвета в виде круглого плоского диска диаметром $d = 500 \text{ мм}$. Плоскости источника и площадки параллельны. Определить его светимость, если освещённость в центре площадки $E_v = 50 \text{ лк}$.

2.15. Примерный уровень силы света теплового источника (зажигалка, сигарета и т.п.) $I_v = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ кд}$. Определить наибольшее расстояние, с которого можно визуально обнаружить ночью источник, если минимальный световой поток, регистрируемый глазом $\Phi_v = 10^{-13} \text{ лм}$, а

диаметр зрачка глаза ночью $D_{zл} = 8$ мм. Поглощением света в атмосфере пренебречь.

2.16. Источник силой света $I_v = 500$ кд освещает приемник площадью светочувствительной поверхности $Q_{пр} = 10$ мм² с расстояния $r = 10$ м. Угол падения лучей на поверхность приемника $\varepsilon = 0$. Спектральная плотность $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ потока излучения, создаваемого источником, и соответствующая спектральная плотность $v(\lambda)\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ светового потока, приведены на рис. 2.3. Площади, ограниченные кривыми, построенными в одинаковом масштабе, составляют $Q_1 = 15$ мм² и $Q_2 = 450$ мм². Найти поток излучения, поступающий от источника на светочувствительную поверхность приёмника.

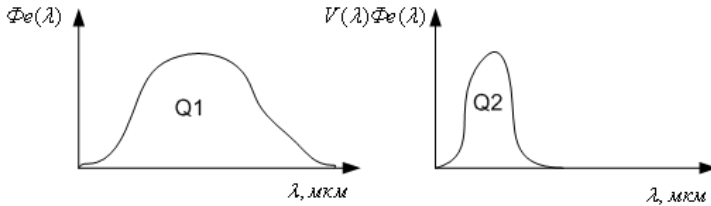


Рис.2.3 – Спектральные плотности потока излучения

2.17. Тепловой объект в форме шарика диаметром $d = 20$ мм, имеющий температуру $t = 1000$ °С, облучает термозлемент приемной системы (рис.2.4.) площадью светочувствительной поверхности $Q_{тэ} = 100$ мм² с расстояния $r = 560$ мм. Определить коэффициент теплового излучения объекта, если на светочувствительную поверхность термоприемника приемной системы поступает поток излучения $\Phi_e = 0,001$ Вт.

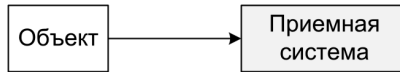


Рис.2.4 – Регистрация теплового излучения объекта

2.18. Вольфрамовый шарик диаметром $d = 20$ мм освещает поверхность с расстояния $r = 2$ м. Коэффициент теплового излучения вольфрама $\varepsilon = 0,31$. Яркость поверхности, имеющей коэффициент диффузного отражения $\rho = 0,5$, составляет $L_v = 10$ кд · м⁻². Найти температуру вольфрамового шарика, если световая эффективность излучения вольфрама $K = 3$ лм · Вт⁻¹.

2.19. Тепловой источник диаметром $d_u = 1 \text{ м}$ имеет температуру $t = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ и тепловой коэффициент излучения $\varepsilon = 0,4$. На расстоянии $r = 2 \text{ км}$ от источника расположена оптическая система, регистрирующая его излучение.

Определить диаметр входного зрачка оптической системы, при котором в систему будет поступать поток излучения $\Phi_e = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}$. Коэффициент пропускания атмосферы $\tau_0 = 0,7$.

2.20. Определить энергетическую освещённость, создаваемую Солнцем на поверхности Земли, если угловой размер Солнца для земного наблюдателя $2\omega = 0,008$, коэффициент пропускания атмосферы $\tau_0 = 0,8$. Найти освещённость от Солнца на поверхности Земли, если световая эффективность излучения Солнца $K = 84 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$. Солнце имеет температуру $T = 6000 \text{ К}$ и излучает, как абсолютно чёрное тело.

2.21. Тепловой источник в форме круглого плоского диска диаметром $d_u = 15 \text{ мм}$ имеет коэффициент теплового излучения $\varepsilon = 0,65$ и световую эффективность излучения $K = 0,03 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$. Температура источника $t = 600 \text{ }^\circ\text{C}$. На расстоянии $r = 100 \text{ м}$ от источника расположен приемник с диаметром светочувствительной поверхности $d_{np} = 10 \text{ мм}$. Поверхности источника и приемника параллельны друг другу. Найти уровень обнаруживаемого светового потока, поступающий от источника.

2.22. Вольфрамовый шарик диаметром $d = 9 \text{ мм}$ имеет температуру $t = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ и коэффициент теплового излучения $\varepsilon = 0,3$. На расстоянии $r = 300 \text{ м}$ от шарика расположен фотоприемник, имеющий площадь светочувствительной поверхности $Q_{тз} = 90 \text{ мм}^2$. Определить коэффициент пропускания нейтрального светофильтра, установленного между шариком и фотоприемником, если на светочувствительную поверхность фотоприемника должен упасть поток излучения $\Phi_e = 3 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}$.

2.23. Абсолютно чёрное тело нагрето до температуры $T = 2000 \text{ К}$. Световая эффективность излучения $K = 20 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$.

Определить световой поток, излучаемый поверхностью этого тела площадью $Q = 9 \text{ см}^2$.

2.24. Определить температуру источника, если его энергетическая светимость $M_e = 50 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$, а коэффициент теплового излучения $\varepsilon = 0,55$.

2.25. Во сколько раз изменится спектральная плотность энергетической светимости жёлто-зелёного излучения ($\lambda = 0,555 \text{ мкм}$) абсолютно черного тела, если его температура T возрастёт от 1500 до 2000 К?

2.26. Передающая телевизионная трубка нормально работает при рабочей освещённости фотокатода, равной 20 лк. Определить яркость объекта, расположенного на большом расстоянии от камеры, необходимую для получения рабочей освещённости фотокатода при использовании объектива с $K = 3$ и $\tau = 0,8$.

Источники подсвета

Основные формулы для расчета

Сила света источника

$$I_v = \frac{\Phi_v}{2\pi},$$

где Φ_v — световой поток.

Габаритная яркость источника света

$$L_v \approx \frac{\Phi_v}{4\pi Q},$$

где Q — площадь проекции светящегося тела на плоскость, перпендикулярную к оптической оси.

Дистанция оформления светового пучка прожектора, начиная с которой освещённость становится функцией расстояния p ,

$$p_0 = \frac{D}{d} f',$$

где D — диаметр выходного зрачка прожектора; d — диаметр светящегося тела источника света; f' — фокусное расстояние оптической системы прожектора.

Освещённость, создаваемая прожектором на расстоянии p от него,

$$E_v = \tau_a \frac{I_{v.пр}}{p^2},$$

где τ_a — коэффициент пропускания атмосферы;

$$I_{v.пр} = I_v \tau_{0.c} (D/d)^2$$

; $\tau_{0.c}$ — коэффициент пропускания оптической системы.

Освещённость в плоскости изображения

$$E_v = \pi L_v \tau_{0,c} \sin^2 \sigma'_A,$$

где L_v — габаритная яркость источника света; σ'_A — апертурный угол оптической системы в пространстве изображений.

Для осветительных систем, являющихся составной частью проектора, с точностью до соблюдения закона синусов справедлив инвариант

$$I = \sin \sigma_k d = \sin \omega D,$$

где σ_k — апертурный угол конденсора; d — диаметр светящегося тела источника света (если светящееся тело имеет прямоугольную форму, то d — меньший из двух размеров); ω — половина угла поля объектива.

Задачи

2.27. Световой диаметр конденсора 90 мм. Расстояние пластины со светочувствительным материалом от задней главной плоскости конденсора составляет 80 мм. Габаритная яркость дуги лампы 150 Мкд/м², а диаметр светящегося тела $d = 5$ мм. Определить фокусное расстояние конденсора и освещённость в плоскости светочувствительного материала, если допустимый угол расходимости лучей $2\omega = 1^\circ$. Коэффициент пропускания конденсора принять равным $\tau_{0,c} = 0,9$. Изменится ли освещённость, если пластину со светочувствительным материалом расположить на расстоянии 140 мм от задней главной плоскости конденсора?

2.28. Определить освещённость, создаваемую ртутной лампой на расстоянии $r = 400$ мм от светящегося тела без оптической системы. Во сколько раз возрастёт освещённость в той же плоскости, если светящееся тело лампы поместить в переднюю фокальную плоскость конденсорной линзы с $f' = 120$ мм? Потери света в линзе пренебречь.

2.29. Светящееся тело лампы накаливания размером 2 мм × 2 мм проецируется на площадку линзой со световым диаметром 40 мм. Расстояние экрана от линзы составляет 4000 мм. Полный световой поток лампы 300 лм. Определить освещённость изображения. Потери света в линзе пренебречь. Зависит ли освещённость изображения от фокусного расстояния линзы, т. е. от линейного увеличения?

2.30. Изображение излучателя сфокусировано на площадке с помощью линзы с фокусным расстоянием 60 мм и световым диаметром 9 мм. Определить диаметр изображения, пренебрегая аберрациями, и освещённость, полагая яркость излучателя, равной $1,6 \cdot 10^3$ кд/м², а его угловой диаметр $2\omega = 30'$, коэффициент пропускания линзы $\tau = 0,9$.

2.31. В прожекторе используется лампа с полным световым потоком 200 клм, светящееся тело которой имеет форму круга с диаметром 6 мм: Диаметр выходного зрачка прожектора $D = 600$ мм; $\tau_{OC} = 0,8$; $\tau_a = 0,75$. Определить освещённость на расстоянии 4000 м от прожектора, принимая во внимание, что фокусное расстояние оптической системы равно 900 мм.

2.32. Определить освещённость, создаваемую прожектором (см. условия задачи 2.31), на расстояниях 80 и 300 м.

2.33. В прожекторе использован источник с силой света $I_v = 1200$ кд, диаметр которого $d = 9$ мм. Диаметр выходного зрачка прожектора $D = 180$ мм, коэффициент пропускания $\tau_{OC} = 0,9$. Определить световой поток, падающий от прожектора на приёмную площадку размером 8×8 мм, расположенную от прожектора на расстоянии $p = 120$ м. Фокусное расстояние оптической системы $f' = 240$ мм.

2.34. Прожектор имеет источник света диаметром $d = 4$ мм. Полный световой поток составляет 5000 лм. Определить диаметр выходного зрачка прожектора, при котором освещённость, создаваемая на расстоянии $p = 1,5$ км, была бы равна 1 лк. Коэффициент пропускания оптической системы $\tau_{OC} = 0,9$, атмосферы $\tau_a = 0,8$.

Регистрация оптического излучения

Абсолютная спектральная чувствительность фотоприемника оптико-электронной системы может быть оценена по формуле

$$S(\lambda) = S_{max}s(\lambda) = 680s(\lambda)S \frac{\int v(\lambda)M_{e,\lambda 0}(\lambda)d\lambda}{\int s(\lambda)M_{e,\lambda 0}(\lambda)d\lambda},$$

где S_{max} - максимальная абсолютная спектральная чувствительность;

$s(\lambda)$ -относительная спектральная чувствительность;

$v(\lambda)$ - относительная спектральная световая эффективность излучения;

$M_{e,\lambda 0}(\lambda)$ - спектральная плотность энергетической светимости источника.

Реакция приёмника на поток излучения, поступающий на его светочувствительную поверхность, определяется выражением

$$i = S\Phi'_e.$$

Задачи

2.35. Спектральная характеристика приёмника приведена на рис. 2.5. Определить силу фототока, вырабатываемого фотоприёмником, при

попадании на его светочувствительную поверхность излучения от точечного источника с силой излучения $I_v = 15 \text{ Вт} \cdot \text{ср}^{-1}$ и длиной волны $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$. Угол падения лучей на поверхность приёмника $\varepsilon = 0$. Источник расположен от приёмника на расстоянии $r = 100 \text{ м}$. Площадь светочувствительной поверхности фотоприёмника $Q_{np} = 100 \text{ мм}^2$. Максимальное значение спектральной чувствительности приёмника $S_{max} = 10 \text{ мА} \cdot \text{Вт}^{-1}$.

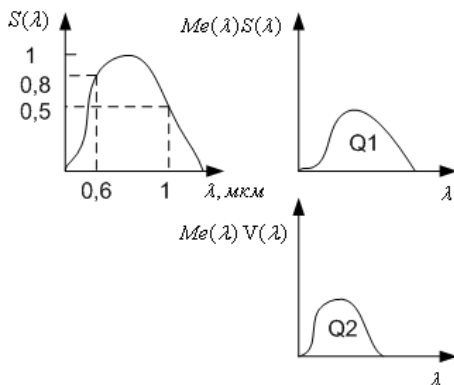


Рис.2.5 – Спектральные характеристики

2.36. Площадь светочувствительной поверхности болометра $Q_{np} = 4 \text{ мм}^2$. Интегральная чувствительность $S = 9 \text{ В} \cdot \text{Вт}^{-1}$. На расстоянии $r = 3 \text{ м}$ от приёмника расположен точечный источник. Угол падения лучей на приёмник $\varepsilon = 0$. Найти силу света источника, если его световая эффективность $K = 5 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$, а болометр должен давать реакцию $U = 1 \text{ мВ}$.

2.37. На расстоянии $r = 6 \text{ м}$ от приёмника расположен точечный монохроматический источник, излучающий на длине волны $\lambda = 0,6 \text{ мкм}$. Площадь светочувствительной поверхности приёмника $Q_{np} = 9 \text{ мм}^2$, угол падения лучей на приёмник $\varepsilon = 0$. Максимальная спектральная чувствительность приёмника $S_{max} = 2 \text{ мА} \cdot \text{Вт}^{-1}$, спектральная характеристика приведена на рис. 2.5. Определить силу излучения источника, если реакция приёмника на излучение источника $I = 0,05 \text{ мкА}$.

2.38. В задней фокальной плоскости объектива, имеющего фокусное расстояние $f' = 6000 \text{ мм}$, относительное отверстие $D/f' = 1:4$ и коэффициент пропускания $\tau_{OC} = 0,9$, установлен болометр с интегральной чувствительностью $S = 900 \text{ В} \cdot \text{Вт}^{-1}$. Определить реакцию болометра на излучение звезды второй звёздной величины со световой эффективностью

излучения $K = 35 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$, если коэффициент пропускания атмосферы $\tau_a = 0,9$.

2.39. Оптическая фотоэлектрическая система регистрирует излучение звёзд. Характеристики оптической системы:

фокусное расстояние $f' = 5000 \text{ мм}$,

относительное отверстие $D/f' = 1:5$,

коэффициент пропускания $\tau_{OC} = 0,9$.

В задней фокальной плоскости оптической системы установлен болометр с интегральной чувствительностью $S = 500 \text{ В} \cdot \text{Вт}^{-1}$. Определить максимально возможную звёздную величину звезды, регистрируемой фотоэлектрической системой, если коэффициент пропускания атмосферы $\tau_a = 0,75$, световая эффективность излучения звезды $K = 40 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$, а болометр должен давать реакцию $u = 0,1 \text{ мкВ}$.

2.40. Определить относительное отверстие объектива с фокусным расстоянием $f' = 800 \text{ мм}$, предназначенного для регистрации с помощью болометра излучения звезды первой звездной величины со световой эффективностью излучения $K = 45 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$. Болометр установлен в задней фокальной плоскости объектива, имеет интегральную чувствительность $S = 400 \text{ В} \cdot \text{Вт}^{-1}$ и должен давать реакцию $u = 0,2 \text{ мкВ}$. Коэффициент пропускания оптической системы $\tau_{OC} = 0,8$, атмосферы $\tau_a = 0,8$.

2.41. Звезда шестой звёздной величины создаёт на поверхности Земли освещённость $E_v = 7 \cdot 10^{-9} \text{ лк}$. Излучение звезды регистрируется оптической фотоэлектрической системой, имеющей диаметр входного зрачка $D = 900 \text{ мм}$ и коэффициент пропускания $\tau_{OC} = 0,85$. Определить интегральную чувствительность приёмника, установленного в задней фокальной плоскости оптической системы, если реакция приёмника на излучение звезды $i = 0,04 \text{ мкА}$.

2.42. В задней фокальной плоскости объектива с относительным отверстием $D/f' = 1:1$, диаметром входного зрачка $D = 90 \text{ мм}$ и коэффициентом пропускания $\tau_{OC} = 0,85$ установлен приёмник излучения с интегральной чувствительностью $S = 10 \text{ мА} \cdot \text{лм}^{-1}$ и диаметром светочувствительной поверхности $d_{пр} = 3 \text{ мм}$. Найти реакцию приемника на световой поток от Луны яркостью $L_v = 2450 \text{ кд} \cdot \text{м}^2$, если угловой размер Луны $2\omega = 0,009 \text{ рад}$, а коэффициент пропускания атмосферы $\tau_a = 0,85$.

2.42. В задней фокальной плоскости объектива, имеющего фокусное расстояние $f' = 100 \text{ мм}$, диаметр входного зрачка $D = 50 \text{ мм}$ и

коэффициент пропускания $\tau_{OC} = 0,9$, установлен фотоприемник с интегральной чувствительностью $S = 100 \text{ мкА} \cdot \text{лм}^{-1}$. Светочувствительная поверхность приемника круглая. Определить диаметр приёмника и угловое поле объектива в пространстве предметов, если сила тока, вырабатываемого приёмником при засветке его излучением от дневного неба яркостью $L_v = 1,2 \cdot 10^4 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$, должна составлять $i = 12 \text{ мкА}$. Коэффициент пропускания атмосферы $\tau_a = 0,9$.

2.43. Излучение Луны регистрируется с помощью приемника, установленного в задней фокальной плоскости объектива. Луна имеет яркость $L_v = 2450 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ и угловой размер $2\omega = 0,009$ рад. Приёмник имеет интегральную чувствительность $S = 15 \text{ мА} \cdot \text{лм}^{-1}$ и диаметр светочувствительности поверхности $d_{\text{пр}} = 3 \text{ мм}$. Какова будет реакция приемника на излучение от Луны, регистрируемое двумя различными объективами со следующими характеристиками:

1) фокусное расстояние $f'_1 = 40 \text{ мм}$;

диаметр входного зрачка $D_1 = 50 \text{ мм}$; коэффициент пропускания $\tau_{OC} = 0,8$;

2) фокусное расстояние $f'_2 = 100 \text{ мм}$;

диаметр входного зрачка $D_2 = 50 \text{ мм}$; коэффициент пропускания $\tau_{OC} = 0,85$?

Коэффициент пропускания атмосферы $\tau_a = 0,7$.

2.45. Излучение бесконечно удалённого источника, имеющего угловой размер $2\omega = 0,02$ рад и яркость $L_v = 2000 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$, регистрируется оптической фотоэлектрической системой. Фокусное расстояние системы $f' = 200 \text{ мм}$, диаметр входного зрачка $D = 100 \text{ мм}$, коэффициент пропускания $\tau_{OC} = 0,85$. Приемник излучения с диаметром светочувствительной поверхности $d_{\text{пр}} = 5 \text{ мм}$ установлен в задней фокальной плоскости. Определить интегральную чувствительность приемника, если его реакция на излучение источника $i = 12 \text{ мкА}$, а коэффициент пропускания атмосферы $\tau_a = 0,7$.

Глава 3

Характеристики бортовых оптико-электронных систем воздушных судов гражданской авиации

В настоящее время определены минимальные стандарты к системным и эксплуатационным характеристикам оптико-электронных систем [19]. Выделены типовые классы авиационных систем видения: системы улучшенного видения (*Enhanced Vision Systems (EVS)*), системы искусственного видения (*Synthetic Vision Systems (SVS)*), комбинированные системы видения (*Combine Vision Systems (CVS)*) и бортовые системы технического зрения с расширенными возможностями визуализации (*Enhanced Flight Vision Systems (EFVS)*). Совокупность систем всех классов объединена одним термином - «системы визуализации». Установлены общие указания по эксплуатации систем визуализации. В минимальных стандартах к системным и эксплуатационным характеристикам оптико-электронных систем указано, что способность пилота видеть и использовать необходимую информацию на основном пилотажном дисплее не должна ухудшаться или понижаться из-за наличия изображения систем визуализации. При добавлении вспомогательных признаков или символики, а также при размещении необходимой информации на основном пилотажном дисплее следует проявлять исключительную осторожность. Главной функцией систем является создание у экипажа представления об окружающем пространстве, включая представления о рельефе местности и искусственных сооружениях, таких, как высокие препятствия или ВПП.

К системам улучшенного видения (*EVS*) относят электронные средства обеспечения лётного экипажа изображением, полученным от датчика или обработанное изображение внешней обстановки (рис. 3.1) [6, 9].

В перспективных системах в качестве датчика предполагается использование инфракрасной камеры обзора, радиолокатора миллиметрового диапазона, а также устройства усиления изображения, полученного при низком уровне освещенности [19].

Пилот в режиме реального времени может наблюдать созданную системой *EVS* графическую информацию, которая проецируется на индикаторе на лобовом стекле или же на многофункциональном индикаторе, входящим в состав бортовой системы отображения информации.

EVS формирует улучшенное изображение внешней среды по изображениям с ТВ и ИК каналов.



а).



б).

Рис.3.1 – Типовой вариант комплекта бортовой системы улучшенного видения: а). камера ОЭС с гиросtabilизированной платформой, б). монитор ОЭС.

Состав типовой системы *EVS* и характеристики [6]

Система включает в себя оптические каналы:

- тепловизионный с ИК камерой (*FLIR*);
- телевизионный с камерой дневного наблюдения.

Система состоит из трех блоков:

- стабилизированная наклонно-поворотная платформа (STA) (рис.3.2), включающая в себя оптические датчики (рис.3.1 а), механизмы стабилизации и опорно-поворотное устройство;
- интерфейсный блок (рис.3.3). Блок обеспечивает управление установкой, связь с блоком контроля и управления, связь с внешними устройствами и системами, внутренний контроль всей системы;
- джойстик (рис.3.4).

Электромеханические характеристики (типовые)

- а. Стабилизация: по 3 осям: азимут, угол места, горизонт;
- б. Угол поворота: по углу места от $+20^\circ$ до -105° по азимуту 360° (непрерывный);
- с. Уровень стабилизации: 50 мрад на ось;
- д. Угловая скорость поворота: до $60^\circ/\text{с}$ по азимуту до $32^\circ/\text{с}$ по углу места;
- е. Точность позиционирования: $\leq 0.7^0$.

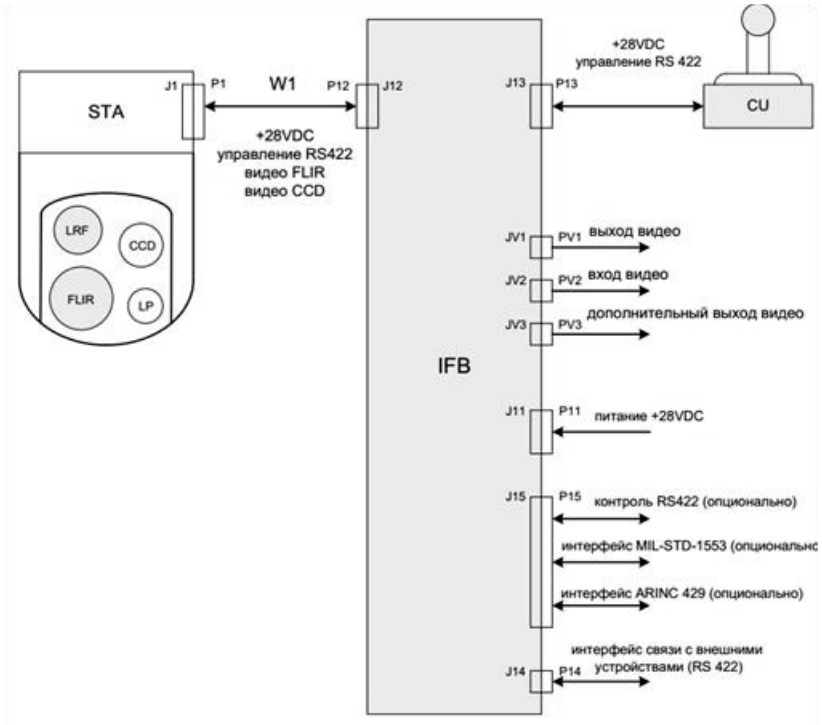


Рис.3.2 – Блок схемы опико-электронной системы



Рис.3.3 – Интерфейсный блок



Рис.3.4 – Джойстик системы

Электрические характеристики (типовые)

- a. Напряжение питания: 28 В, пост.;
- b. Потребляемая мощность: 70 Вт (номинальная), 280 Вт (пиковая).

Тепловизионная камера FLIR (типовой вариант)

- a. Спектральный диапазон: 3.0 - 5.0 мкм;
- b. Детектор: FPA 320 x 256 пикселей, антимонид индия (*InSb*);
- c. Оптика: непрерывное оптическое увеличение x12.5;
- d. Поле зрения:
широкое 27°x21°
узкое 2.2°x1.7°
электронное увеличение (x2) 1.1°x 0.85°;
- e. Охладитель: замкнутого цикла
- f. Чувствительность 0,02°С
- g. Регулировка уровня видеосигнала: автоматическая/ручная
- h. Контроль:
масштабирование, фокусировка, быстрое масштабирование,
регулировка усиления *AGC*, увеличение контрастности в центральной
части экрана, выбор таблицы чувствительности *NUC*, калибровка таблицы
чувствительности *NUC Calibration*.

Камера дневного наблюдения CCD(типовой вариант)

- a. Камера: цветная, высокого разрешения (768x494 пикселей);
- b. Оптика: непрерывное оптическое увеличение x25 с. ;
Поле зрения: широкое (*WFOV*) 50° x 38°;
узкое (*NFOV*) 2.2° x 1.6°;
- электронное увеличение (x2) 1.1° x 0.8°;
- d. Регулировка усиления: автоматическая;
- e. Минимальный уровень освещенности: 10 лк.

Технические возможности системы (типовые)

- система обеспечивает получение изображения в дневных, ночных и неблагоприятных погодных условиях наблюдения;
- система снабжена механизмом гиросtabilизации по 3-м осям – азимут, угол места, горизонт;
- тепловизионная камера на основе матрицы 3-го поколения, работает в диапазоне 3-5 микронметра с разрешением 320x256 пикселей (опционально 640x512 пикселей) и объективом с непрерывным оптическим увеличением 12,5 крат. Работу детектора обеспечивает охладитель замкнутого цикла, что позволяет тепловизионному каналу работать в длительном непрерывном режиме. Детектор *FLIR* работает совместно с объективом, обеспечивающим непрерывное изменение фокусного расстояния от 20 мм (широкое поле зрения) до 250 мм (узкое поле зрения). Детектор тепловизионного канала обеспечивает следующие непрерывные изменения поля зрения: от самого широкого 27° x 21° до самого узкого 2.2° x 1.7°.
- цветная камера дневного наблюдения, с функцией «день-ночь» и объективом с непрерывным оптическим увеличением 24 крат;
- предварительная обработка изображения в тепловизионной камере и камере дневного наблюдения: функция *AGC*, обеспечивающая широкий динамический диапазон и повышающая качество изображения тепловизионного канала;
- встроенная функция «окно-в-окне» для получения изображения на дисплее от тепловизионной камеры и камеры дневного наблюдения одновременно; - встроенный тест всех компонентов системы;
- коррекция неоднородности детектора (*NUC*), выбирается автоматически или по команде оператора из 7-ми заранее запрограммированных таблиц, калибруется по внешнему или внутреннему источнику;
- питание осуществляется от одного питающего напряжения +28В, пост;
- потребляемая мощность 70Вт (номинальное значение);
- наличие интерфейса связи с внешними устройствами по протоколу *RS 422* или *RS 232*;
- стандартный видеовыход *PAL* или *NTSC*.

Дополнительные характеристики бортовых ОЭС ведущих производителей [9, 10] приведены в приложении 2.

Литература

1. Стукалов С.Б., Петров В.И., Болелов Э.А. Оптико-электронные технологии на воздушном транспорте. - М.: ИД Академии Н.Е.Жуковского: Учебное пособие. 2018. –76 с.
2. Стукалов С.Б., Стукалов Д.С., Кондриков В.И. Возможности практического применения оптико-электронных систем визуализации на воздушных судах Научный вестник МГТУ ГА. Том 20, №4. 2017. –С.135-143.
3. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов: учебник / - 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Логос, 2011. – 568 с.
4. Тыкум В.М., Тыкум Л.В. Оптико-электронные приборы и системы. Теория и методы энергетического расчета. Сибирская государственная геодезическая академия. Новосибирск. 2005. – 192 с.
5. Войцеховский А.В., и др. Физические основы полупроводниковой фотоэлектроники. Томск. Изд. Дом Томского государственного университета 2013. 559 с.
6. Отчет по НИР № 0415 «Исследование инновационных подходов применения оптико-электронных технологий на воздушных судах». // Москва, МГТУ ГА, 2016. – 61с.
7. Стукалов С.Б., Стукалов А.С. Нормативное регулирование требований к бортовым системам визуализации. Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества. //Сборник тезисов докладов участников научно-технической конференции, посвященной 45-летию университета. Москва. МГТУ ГА. 2016 . – С.139.
8. Шереметьев А.Г. Статистическая теория лазерной связи: монография /- М. Связь.1971.-264 с.
9. Мир Диагностики. Диагностические и измерительные приборы. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.diaworld.ru/>.
10. Официальный сайт компании Уральский оптико-механический завод. [Электронный ресурс] // URL: <http://uomz.com/>.
11. Официальный сайт компании Международные аэронавигационные системы [Электронный ресурс]. URL: <http://www.fl-system.ru/>.
12. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование: монография. – М.: Мир, 1987. – 550 с.
13. Официальный сайт компании Лазерные системы [Электронный ресурс]. URL: <http://lsystems.ru/>.
14. Официальный сайт компании Honeywell. [Электронный ресурс] // URL: <http://www.honeywell.com/>.
15. Официальный сайт компании Universal Avionics. [Электронный ресурс] // URL: <http://www.uasc.com/>.
16. Официальный сайт компании Avidyne. [Электронный ресурс] // URL: <http://www.avidyne.com/>.

17. Официальный сайт компании Rockwell Collins. [Электронный ресурс] // URL: <http://www.rockwellcollins.com/>.
18. Обработка изображений в авиационных системах технического зрения. Под ред. Костяшкина Л.Н., Никифорова М.Б. : монография –М.: Физматлит. 2016. –233 с.
19. Руководство RTCA DO – 315 «По минимальным стандартам характеристик авиационных систем (MASPS) для систем улучшенного видения, систем искусственного видения, комбинированных систем искусственного видения и бортовых систем увеличения дальности видения» Авиационного Регистра Межгосударственного Авиационного Комитета (АР МАК).
20. Ярославский Л. П. Введение в цифровую обработку изображений. М.: Радио и связь, 1979. 312 с.
21. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2. М.: Наука, 1970. 442 с.
22. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. 1104 с
23. Горелик А. Л., Скрипкин В. А. Методы распознавания. М. Высш. шк., 1984. 208 с.
24. Пресс Ф. П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. М.: Радио и связь, 1991. 264 с.
25. Бычков С. И., Лукьянов Д. П., Бакаляр А. И. Лазерный гироскоп. М.Сов. радио, 1975, 424.
26. Астапов Ю. М., Васильев Д. В., Заложнев Ю. И. Теория оптико-электронных следящих систем. М.: Наука, 1988. 328 с.

Основные энергетические величины

Наименование величины	Определяющее выражение	Основная единица измерения
Энергетические		
Поток излучения (лучистый поток, мощность излучения)	$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_e(\lambda) d\lambda$	1 Вт
Энергия излучения (лучистая энергия)	$Q_e = \int_0^t \Phi_e(t) dt$	1 Дж
Энергетическая сила света (сила излучения)	$I_e = d\Phi_e/d\Omega$	1 Вт* $c\rho^{-1}$
Энергетическая светимость (поверхностная плотность потока излучения, излучательность)	$M_e = d\Phi_e/dA$	1 Вт* m^{-2}
Энергетическая освещенность (облученность, плотность мощности)	$E_e = d\Phi_e/dA$	1 Вт* m^{-2}
Энергетическая яркость (лучистость)	$L_{e\theta} = \frac{I_{e\theta}}{dA \cos\theta}$	1 Вт* m^{-2} * $c\rho^{-1}$
Энергетическая экспозиция (энергетическое количество освещения, количество облучения)	$H_e = \int_0^t E_e(t) dt$	1 Дж* m^{-2}

Таблица 2

Основные фотометрические величины

Наименование величины	Определяющее выражение	Основная единица измерения
Фотометрические (световые)		
Световой поток	$\Phi_e = K_{\lambda m} * \int_0^{\infty} V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda$	Лм
Световая энергия	$\theta_v = \int_0^t \Phi_v(t) dt$	1 лм*с
Сила света	$I_v = d\Phi_v/d\Omega$	1 кд
Светимость	$M_v = d\Phi_v/dA$	1 лм*м ⁻²
Освещенность	$E_v = d\Phi_v/dA$	1 лк=1 лм*м ⁻²
Яркость	$L_{v\theta} = \frac{I_{v\theta}}{dA \cos\theta}$	1 кд*м ⁻²
Экспозиция (количество освещения)	$H_v = \int_0^t E_v(t) dt$	1 лк*с

Приложение 2

Таблица 3

Технические характеристики ОЭС СОН-730

<i>Характеристики тепловизора</i>	
Тип детектора	матрица <i>InSb</i>
Количество чувствительных элементов	640×512
Спектральный диапазон	3-5 мкм
Температурная чувствительность	0,03 °С
Поле зрения (плавная трансфокация)	От 2,2°×1,7° до 27,0°×20,2°
Дополнительное электронное увеличение (<i>zoom</i>), обеспечиваемое средствами тепловизора	× 2
<i>Характеристики дневной камеры</i>	
Разрешение	1920×1080
Фоточувствительный датчик	Матрица <i>CCD</i> ¼ дюйма
Количество чувствительных элементов	740000
Стандарт разложения	<i>CCIR</i> (625 строк, 25 кадров)
Поле зрения:	От 1,6°×2,2° до 42°×54° (плавная трансфокация)
Тип стабилизации	Двухконтурная четырехосная стабилизация (азимут, угол места)
Диапазон углов разворота в азимутальной плоскости	N × 360°
Диапазон углов разворота в угломестной плоскости	от -10° (вниз) до +90° (вверх) – при размещении системы «шаром» вверх.
Диапазон угловых скоростей движения линии визирования	от 0,05°/с до 45°/с
Угловое ускорение	до 100 °/с ²
Габаритные размеры:	
- устройство оптико-электронное (моноблок)	250 мм × 440 мм
Масса:	
- устройство оптико-электронное	Не более 25 кг
- пульт управления	Не более 3 кг
- в случае комплектации телетеlevisionным автоматом	5 кг

Технические характеристики ОЭС UltraForce 275

<i>Характеристики тепловизора</i>	
Тип детектора	3-го поколения, 640×512, 3-5 мкм в фокальной плоскости
Поля зрения	Непрерывное масштабирование от 35,5° до 1,83°
Электронное масштабирование	2-х кратное
Усиление качества изображения	Выравнивание гистограммы Автоматическая регулировка усиления (AGC) Цифровое усиление деталей изображения (DDE) Коррекция неоднородности/дефектных пикселей
<i>Характеристики дневной камеры</i>	
Камера №1: Разрешение Поле зрения Электронное увеличение Видео	Высокое разрешение 2 Мегапикселя от 37,6° до 2° (720P)/от 55,4° до 2,9° (1080P) 2-кратное 720 p или 1080 p
Камера №2: Разрешение Поле зрения Электронное масштабирование Видеовыход	Стандартное разрешение 630 000 пикселей (NTSC) или 740000 пикселей (PAL) от 42° до 1,6° 2-кратное NTSC или PAL
Опции	Устройство сопровождения цели, лазерный дальномер, лазерный целеуказатель, устройство лазерной подсветки, встроенный инерциальный измерительный блок
Угол поворота	360° непрерывно
Угол наклона	от +20° до -120°
Скорость поворота	до 60°/с
Факторы внешней среды	RTCA DO-169E
Размеры (мм)	275 мм (Г) × 378,5 мм (В)
Масса	14 кг

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Физические основы использования оптико-электронных устройств на транспорте.....	5
Глава 2. Обнаружение и регистрация сигналов в оптико-электронных устройствах	15
Глава 3. Характеристики бортовых оптико-электронных систем воздушных судов гражданской авиации.....	29
Литература	34
Приложение 1.....	36
Приложение 2.....	38