

УДК 536.48:629.785

## Проектирование оптической системы ПЗС-камеры космического базирования

В. Г. Колобродов

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

Надійшла до редакції 30.04.96

Представлена методика проектування оптичної системи ПЗС-камери космічного базирования. Отримані формули для розрахунку роздільної здатності, фокусної віддалі, поля зору та діаметра вхідного зрачка об'єктива камери. Розглянуто приклад розрахунку оптичних характеристик об'єктива.

### ВВЕДЕНИЕ

Развитие общества привели к резкому увеличению антропогенной нагрузки на природную среду, в результате чего наблюдается загрязнение всех ее составляющих, истощение естественных ресурсов земной поверхности. В практике экологических и природо-ресурсных исследований важную роль играет дистанционное зондирование Земли из космоса опико-электронными системами различного класса и назначения. Одной из актуальных проблем, стоящих перед разработчиками таких систем, является повышение их пространственной и энергетической разрешающих способностей с одновременным уменьшением массы прибора и его энергопотребления.

Настоящая статья посвящена вопросам проектирования оптической системы (ОС) ПЗС-строчной камеры, установленной на спутнике с высотой полета  $h_i = 400$  км, которая обеспечивала бы пространственное разрешение  $\Delta V = 5$  м на поверхности Земли. Такие камеры работают в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра, а в качестве фотоприемника (ФП) используются кремниевые ПЗС-линейки с большим числом элементов и малыми размерами чувствительной площадки.

### МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ВИДЕОСИГНАЛА В ПЗС-КАМЕРЕ

Формирование видеосигнала в ПЗС-камере удобно рассмотреть на обобщенной функциональной схеме (рис. 1). Солнечное излучение, отражаясь от земной поверхности, на которой расположен объект наблюдения, проходит через атмосферу и попадает в ОС камеры. ОС формирует изображение объекта и фона в плоскости ФП, который преобразует распределение облученности в электрический сигнал, который после считывания формирует видеосигнал.

Рассмотрим более подробно отдельные элементы этой функциональной схемы.

Объект наблюдения расположен на равномерном фоне земной поверхности, который характеризуется альбедо  $\rho_b$ . Объект имеет коэффициент отражения, отличный от альбедо на величину  $\Delta\rho$ . Иногда величина  $\Delta\rho$  определяется следующим образом:

$$\Delta\rho = \frac{\rho_t - \rho_b}{\rho_b},$$

или

$$\Delta\rho = \frac{\rho_t - \rho_b}{\rho_b} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

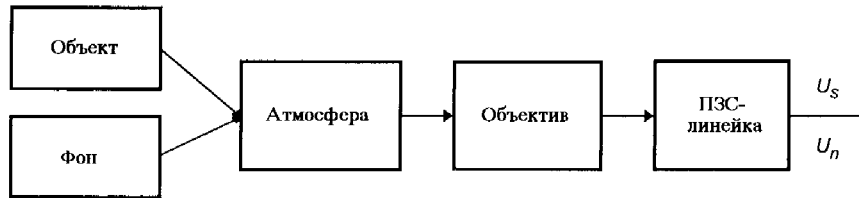


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема ПЗС-камеры

где  $\rho_t$ ,  $\rho_b$  — коэффициенты отражения объекта и фона соответственно. Если объект и фон излучают по закону Ламберта, а Солнце создает на поверхности Земли освещенность  $E_0$ , то светимость объекта и фона

$$M_t = E_0 \rho_t, \quad M_b = E_0 \rho_b \quad (2)$$

соответственно. С учетом спектральных характеристик

$$M_t = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_t(\lambda) E_0(\lambda) d\lambda; \quad M_b = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_b(\lambda) E_0(\lambda) d\lambda. \quad (3)$$

При этом полезный сигнал формируется за счет отличий отражательной способности объекта и фона, т. е.

$$\Delta M = M_t - M_b = E_0(\rho_t - \rho_b).$$

Тогда минимальное превышение светимости объекта над фоном, или пороговое значение светимости, равно

$$\Delta M_n = E_0 \Delta \rho. \quad (4)$$

Определим величину  $E_0$  для рабочего спектрального диапазона, ограниченного значениями  $\lambda_1 = 0.5$  и  $\lambda_2 = 0.76$  мкм. Для этого рассчитаем вначале энергетическую освещенность  $E'_s$ , создаваемую Солнцем вне атмосферы в диапазоне  $\lambda_1 \dots \lambda_2$  по методике, изложенной Павловым (1974):

$$E'_s = E_s [z(\lambda_2) - z(\lambda_1)],$$

где  $E_s = 0.14$  Вт/см<sup>2</sup> — энергетическая освещенность, создаваемая Солнцем вне атмосферы во всем спектральном диапазоне;  $z(0.76) = 0.58$ ,  $z(0.5) = 0.236$  — коэффициенты, учитывающие спектральный состав излучения Солнца. Тогда

$$E'_s = 0.14(0.58 - 0.236) = 4.8 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/см}^2.$$

С учетом пропускания атмосферы  $\tau_A = 0.5$  (см. далее), освещенность поверхности Земли в рабочем

спектральном диапазоне равна

$$E_0 = E'_s \tau_A = 4.8 \cdot 10^{-2} \cdot 0.5 = 2.4 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/см}^2.$$

**Атмосфера** — это промежуточная среда между объектом и камерой, в которой происходит изменение параметров излучения от объекта за счет поглощения и рассеяния. Поглощение обусловлено в основном взаимодействием световой волны с молекулами воды и углекислого газа, а рассеяние связано с наличием скопления молекул атмосферных газов, частиц пыли и капелек воды. Атмосфера характеризуется спектральным  $\tau_A(\lambda)$  и интегральным  $\tau_A$  коэффициентами пропускания, причем  $\tau_A = E_0/E'_s$ , где  $E_0 = 0.06 \dots 0.09$  Вт/см<sup>2</sup> — освещенность поверхности Земли в ясную погоду (Ишанин и др., 1991). Поэтому для предварительных расчетов будем полагать, что  $\tau_A = 0.5$ . Анализ влияния атмосферы на работу ПЗС-камеры с учетом рабочего спектрального диапазона  $\lambda_1 \dots \lambda_2$ , широты наблюдения, высоты Солнца, времени суток и года, облачности и состояния атмосферы требует дополнительных глубоких исследований.

**Оптическая система** состоит из двух основных элементов — главного объектива и плоского зеркала перенацеливания оси визирования (в некоторых случаях зеркало отсутствует). Дополнительными элементами ОС являются каналы калибровки и тестирования ПЗС-камеры, которые не рассматриваются в данной статье. Наиболее важным элементом ПЗС-камеры высокого пространственного разрешения является объектив, который имеет следующие оптические характеристики (Бегунов, 1981; Колобродов и др., 1994):

- фокусное расстояние  $f_0$ ;
- относительное отверстие  $D_0/f'_0$  или эффективное диафрагменное число  $k_{\text{эф}} = f'_0/D_0$ , где  $D_0$  — диаметр входного зрачка;
- поле зрения:
  - угловое  $2\omega_0$ ;

линейное в пространстве предметов  
(на поверхности Земли)  $V \times W$ ;  
линейное в пространстве изображений  
(в плоскости ФП)  $V' \times W'$ ;

- разрешающая способность при заданном контрасте  $M_{01}$ :  
в центре  $\nu_{x1}$  ( $\omega = 0$ );  
на краю  $\nu_{x1}$  ( $\omega = \omega_0$ );
- модуляционная передаточная функция (МПФ)  $M_0(\nu_x)$ , где  $\nu_x$  — пространственная частота;
- рабочий спектральный диапазон  $\lambda_1 \dots \lambda_2$ ;
- спектральный  $\tau_0(\lambda)$  и интегральный  $\tau_0$  коэффициенты пропускания.

Объектив формирует изображение, освещенность которого определяется выражением

$$E' = \frac{1}{4} \left( \frac{D_0}{f_0} \right)^2 \tau_A \tau_0 M. \quad (5)$$

С учетом спектральных характеристик

$$E' = \frac{1}{4} \left( \frac{D_0}{f_0} \right)^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \tau_0(\lambda) M(\lambda) d\lambda. \quad (6)$$

Качество изображения наиболее полно характеризуется МПФ, которую для высококачественных объективов удобно аппроксимировать функцией (Колобродов и др., 1994)

$$M_0(\nu_x) = 1 - \frac{1.218}{D_0} f_0 \lambda \frac{\nu_x}{\eta}, \quad (7)$$

где  $\eta = (1 - M_{or}) / (1 - M_{od}) \leq 1$  — параметр аппроксимации, определяющий отличие реальной МПФ  $M_{or}$  от дифракционно ограниченной  $M_{od}$  на определенной пространственной частоте.

Фотоприемником служит ПЗС-линейка. Предлагается использовать аналог ФП CCD 151 фирмы LORAL Fairchild Imaging Sensors, который имеет следующие характеристики, необходимые для проектирования камеры:

- Тактовая частота  $f_d = 2+10$  МГц (типично 5 МГц).
- Экспозиция, эквивалентная среднему квадратичному значению шума  $H_n = 0.0002$  мкДж/см<sup>2</sup>.
- Экспозиция насыщения  $H_m = 0.5$  мкДж/см<sup>2</sup>.
- Размер площадки чувствительного элемента  $V_D \times W_D = 7 \times 7$  мкм<sup>2</sup>.
- Расстояние между центрами элементов  $L_{D1} = 7$  мкм.
- Количество элементов  $N = 5000$ .
- Чувствительность  $S_D = 4$  В·мкДж<sup>-1</sup>см<sup>2</sup>.
- Максимальный динамический диапазон 2500:1.
- Рабочая температура  $-25 \dots +70^\circ\text{C}$ .

Так как чувствительная площадка ФП имеет конечные размеры  $V_D \times W_D = 7 \times 7$  мкм<sup>2</sup>, а сам приемник обладает постоянной времени  $t_D$ , его МПФ описывается формулой (Колобродов и др., 1994)

$$M_D = M_{Ds} M_{Dt},$$

где  $M_{Ds} = \text{sinc}(V_D \nu_x)$  — пространственная МПФ;  $M_{Dt} \approx 1$  — временная МПФ. Учет функции  $M_{Dt}$  требует более детального исследования и выходит за рамки данной статьи. Поэтому будем считать, что

$$M_D(\nu_x) = \frac{\sin(\pi V_D \nu_x)}{\pi V_D \nu_x}. \quad (8)$$

#### РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТИВА

**Разрешающая способность.** На качество изображения, его «размытость», влияют одновременно МПФ объектива и ФП. Для линейных инвариантных систем МПФ системы «объектив—ФП» имеет вид

$$M_s = M_0 M_D. \quad (9)$$

С учетом (7) и (8)

$$M_s(\nu_x) = \left( 1 - \frac{1.218}{D_0} f_0 \lambda \frac{\nu_x}{\eta} \right) \frac{\sin(\pi V_D \nu_x)}{\pi V_D \nu_x}. \quad (10)$$

При согласовании разрешающих способностей объектива и ФП полагают, что они имеют одинаковую пространственную частоту  $\nu_{x1}$  при  $M_{01} = M_{D1} = 0.5$  (рис. 2) (Колобродов и др., 1994), т. е.

$$M_{01}(\nu_{x1}) = 1 - \frac{1.218}{D_0} f_0 \lambda \frac{\nu_{x1}}{\eta} = \frac{1}{2}.$$

$$M_{D1}(\nu_{x1}) = \frac{\sin(\pi V_D \nu_{x1})}{\pi V_D \nu_{x1}} = \frac{1}{2}.$$

Отсюда

$$\nu_{x1} = \frac{\eta}{2.436 \left( \frac{f_0}{D_0} \right) \lambda};$$

$$\nu_{x1} = \frac{0.6}{V_D}. \quad (11)$$

Из сравнения двух последних равенств находим формулу для расчета коэффициента аппроксимации  $\eta$ :

$$\eta = 1.46 \left( \frac{f_0}{D_0} \right) \frac{\lambda}{V_D}. \quad (12)$$

Будем аппроксимировать элемент разрешения системы «объектив—ФП» в плоскости ФП прямо-

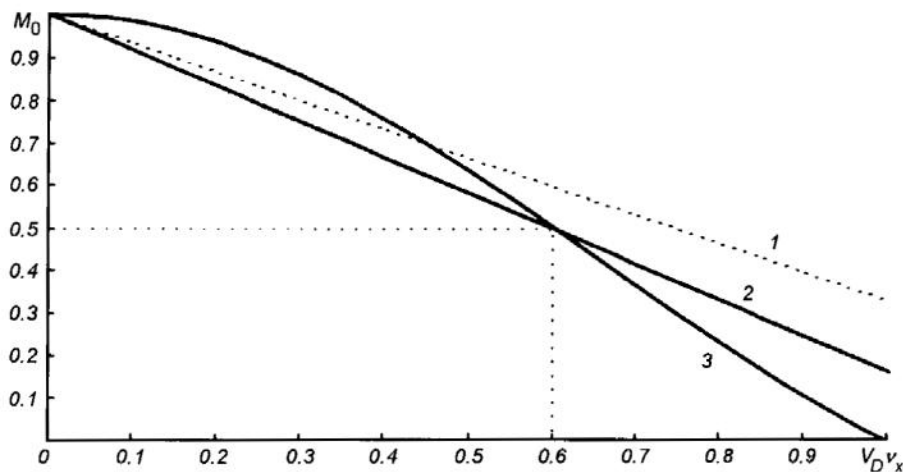


Рис. 2. К определению разрешающей способности ПЗС-камеры: 1 — МПФ дифракционно ограниченного (идеального) объектива; 2 — МПФ объектива при  $\eta = 0.8$ , согласованная с ФП; 3 — МПФ ФП с чувствительной площадкой размером  $V_D$

угольником размером  $V_s \times W_s$ , одномерная МПФ которого согласно (8) имеет вид

$$M_s^a(v_x) = \frac{\sin(\pi V_s v_x)}{\pi V_s v_x}. \quad (13)$$

Из условия совпадения функций (10) и (13) на уровне 0.5 получим систему уравнений

$$M_{s2}(v_{x2}) = 0.5;$$

$$M_{s2}^a(v_{x2}) = 0.5.$$

Из первого уравнения аналогично (11)

$$v_{x2} = \frac{0.6}{V_s}. \quad (14)$$

Тогда второе уравнение с учетом (12) и (14) запишется в виде

$$\left(1 - \frac{V_D}{2V_s}\right) \frac{\sin\left(\pi V_D \frac{0.6}{V_s}\right)}{\pi V_D \frac{0.6}{V_s}} = \frac{1}{2}.$$

Решение этого трансцендентного уравнения дает следующий результат

$$V_s = 1.49V_D. \quad (15)$$

**Фокусное расстояние.** Рассмотрим оптическую схему формирования изображения в ПЗС-камере (рис. 3), где  $V_s$  — элемент разрешения системы «объектив—ФП» (ПЗС-камеры);  $f'_0$  — искомое фокусное расстояние;  $h_f$  — высота полета КА;  $\delta V$  — элемент разрешения на поверхности Земли. Из

геометрии рисунка находим, что

$$f'_0 = \frac{V_s}{\delta V} h_f. \quad (16)$$

**Поле зрения.** Максимальное поле зрения объектива определяется максимальным размером ПЗС-

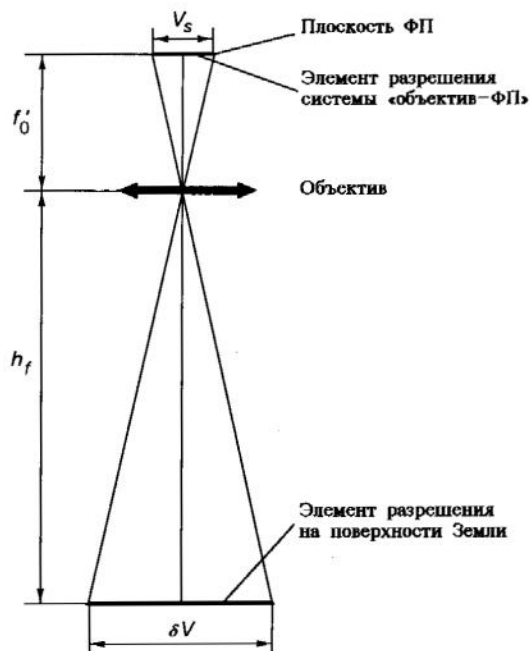


Рис. 3. К расчету фокусного расстояния объектива

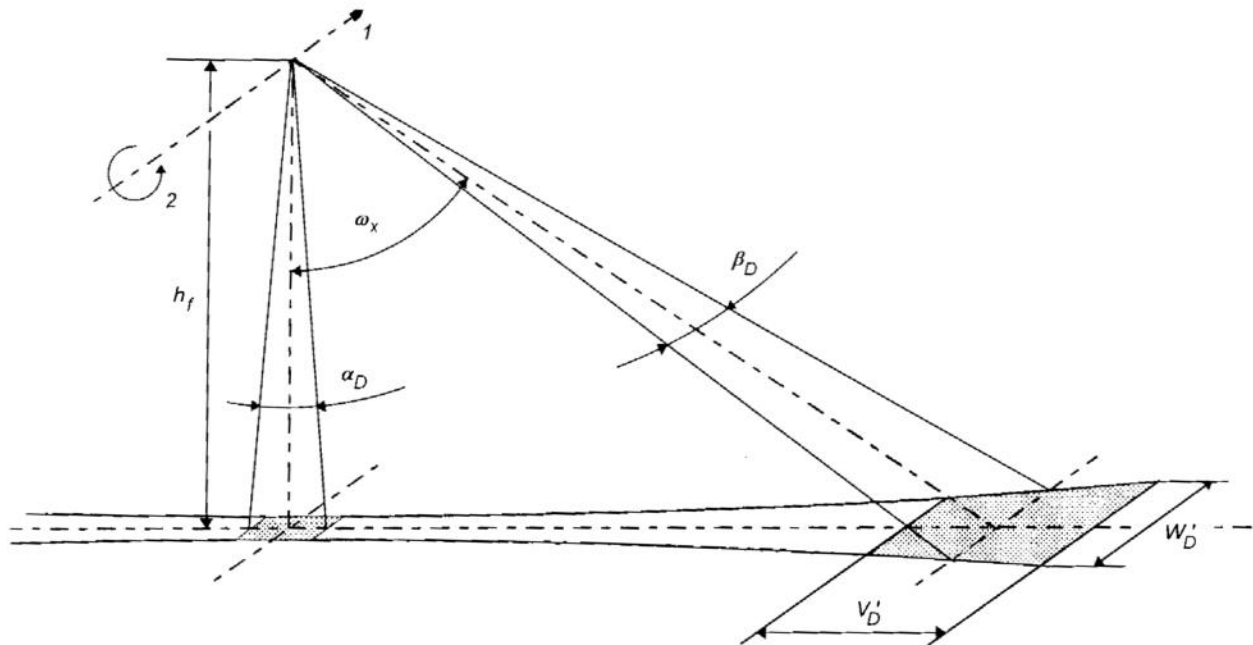


Рис. 4. Геометрическая схема линейного сканирования одноэлементым ФП: 1 — направление полета КА; 2 — направление сканирования;  $\alpha_D, \beta_D$  — угловое разрешение ПЗС-камеры

линейки  $l_D = V_D N = 7 \cdot 10^{-3} \cdot 5000 = 35$  мм. Согласно рис. 3 находим, что угловое поле зрения вдоль координаты  $x$  и  $y$  составляет соответственно

$$2\omega_{0x} = 2\text{arctg} \frac{l_D}{2f'_0},$$

$$2\omega_{0y} = 2\text{arctg} \frac{V_s}{2f'_0}.$$
(17)

Поэтому  $2\omega_0 = 2\omega_{0x}$

Линейное поле зрения находится по формулам, аналогичным (16)

$$V = \frac{l_D}{f'_0} h_f;$$

$$W = \frac{V_s}{f'_0} h_f.$$
(18)

При этом необходимо отметить, что на краю поля зрения размеры элемента разрешения на поверхности Земли изменяются по закону (рис. 4)

$$\delta V = V'_D = \frac{V_s h_f}{f'_0 \cos^2 \omega};$$

$$\delta W = W'_D = \frac{V_s h_f}{f'_0 \cos \omega}.$$

Такое же изменение элемента разрешения будет наблюдаться и при наклоне оси визирования на угол  $\omega$  относительно вертикального положения.

**Диаметр входного зрачка.** Диаметр входного зрачка объектива  $D_0$  (относительное отверстие  $D_0/f'_0$  или эффективное диафрагменное число  $k_{\text{эф}} = (D_0/f'_0)^{-1}$ ) определяет энергетическую разрешающую способность камеры. Исходными при расчете  $D_0$  являются:

1. Пороговая облученность ФП

$$E_n = H_n/t_i. \quad (20)$$

2. Пороговая светимость объекта наблюдения, которая определяется из формулы (5)

$$E_n = \frac{1}{4} \left( \frac{D_0}{f'_0} \right)^2 \tau_A \tau_0 \Delta M_n. \quad (21)$$

Отсюда

$$D_0 = f'_0 \sqrt{\frac{4E_n}{\tau_A \tau_0 \Delta M_n}}. \quad (22)$$

**Пространственное разрешение вдоль направления полета.** В линейных ПЗС-строчных камерах разложение изображения по второй координате  $y$  осуществляется за счет собственного движения КА. За время (период) строчной развертки  $t_p$ , которое равно времени накопления заряда, изображение ПЗС-линейки на поверхности Земли сместится на величину

$$\delta y = v_f t_p, \quad (23)$$

где  $v_f = 7.9$  км/с — первая космическая скорость у

поверхности Земли. Величиной  $\delta u$  можно управлять путем изменения тактовой частоты считывания  $f_d$ . При этом необходимо помнить, что с увеличением  $f_d$  уменьшается время накопления заряда в ПЗС-линейке, а значит и энергетическое разрешение камеры.

**ПРИМЕР ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТИВА**

В качестве примера рассмотрим расчет основных характеристик объектива ПЗС-камеры, которая обеспечивала бы:

- пространственное разрешение на поверхности Земли  $\delta V = 5$  м;
- воспринимаемую разность альбедо  $\Delta\rho = 1\%$  на равномерном фоне с альбедо  $\rho_0 = 0.3$ ;
- рабочий спектральный диапазон  $\lambda\lambda$  0.5—0.76 мкм;
- высоту орбиты спутника  $h_t = 400$  км;
- в качестве ФП используется ПЗС-линейка CCD 151.

В соответствии со сказанным выше:

1. Разрешающую способность при контрасте  $M_{01} = 0.5$  находим по формуле (11):

$$v_{x1} = 0.6/7 \cdot 10^{-3} = 86 \text{ мм}^{-1}.$$

2. Фокусное расстояние находим по формуле (16) с учетом (15):

$$f_0 = 1.49 \cdot 7 \cdot 10^{-3} \cdot 400 \cdot 10^3 / 5 = 832 \text{ мм}.$$

3. Угловое поле зрения находим по формуле (17):

$$2\omega_0 = 2\omega_{0x} = 2\text{arctg} \frac{l_D}{2f_0} = 2\text{arctg} \frac{35}{2 \cdot 832} = 2.4^\circ.$$

Линейное поле зрения на поверхности Земли находим по формулам (18):

$$V = \frac{l_D}{f'_0} h_t = \frac{35}{832} 400 = 16.8 \text{ км};$$

$$W = \frac{V_s}{f'_0} h_t = \frac{10.4}{832} 400 = 5 \text{ м}.$$

4. Диаметр входного зрачка находим по формуле (22), где известно только ранее определенное фокусное расстояние объектива  $f_0 = 832$  мм.

Для типичных зеркально-линзовых телеобъективов с просветляющими покрытиями интегральный коэффициент пропускания в видимом диапазоне  $\tau_0 = 0.8$ .

Пороговую светимость объекта наблюдения  $\Delta M_n$  рассчитаем по формуле (4), где  $\Delta\rho = 3 \cdot 10^{-3}$  — воспринимаемая ПЗС-камерой разность альбедо;  $E_0 = 2.4 \cdot 10^{-2}$  Вт/см<sup>2</sup> — освещенность поверхности

Земли в рабочем спектральном диапазоне. Тогда пороговая светимость объекта наблюдения

$$\Delta M_n = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 2.4 \cdot 10^{-2} = 7.2 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/см}^2.$$

Пороговая освещенность ФП, определяется формулой (20)  $E_n = H_{nr}/t_i$ , где  $H_{nr}$  — пороговая экспозиция в рабочем спектральном диапазоне для излучения, создаваемого Солнцем;  $t_i$  — время интегрирования (накопления) заряда в элементе ПЗС-линейки, определяемое как  $t_i = t_0 N$ , где  $t_0 = 1/f_D = 1/(5 \cdot 10^6) = 2 \cdot 10^{-7}$  с — время считывания одного элемента (здесь  $f_D = 5 \cdot 10^6$  Гц — тактовая частота считывания ПЗС-линейки);  $N = 5000$  — количество элементов в ПЗС-линейке. Тогда  $t_i = 10^{-3}$  с. Рассчитаем  $H_{nr}$ , если известна экспозиция, эквивалентная среднему квадратичному значению шума,  $H_{nt} = 0.0002$  мкДж/см<sup>2</sup> для эталонного источника излучения с температурой 2854 К.

Согласно работе Ишанина и др. (1981)

$$H_{nr} = H_{nt} \frac{k_i}{k_c},$$

где  $k_i = 0.187$ ,  $k_c = 0.852$  — коэффициенты использования ФП в рабочем спектральном диапазоне по отношению к эталонному и реальному источникам излучения соответственно. Тогда  $H_{nr} = 0.22 H_{nt} = 4.4 \cdot 10^{-11}$  Дж/см<sup>2</sup>, а  $E_n = 4.4 \cdot 10^{-8}$  Вт/см<sup>2</sup>. Подставляя исходные данные в формулу (22), имеем  $D_0 = 206$  мм.

Таким образом, данная методика позволяет получить исходные данные для расчета оптической схемы объектива.

Бегунов Б. Н., Заказнов Н. П., Кирюшин С. И., Кузичев В. И. Теория оптических систем. — М.: Машиностроение, 1981.— 432 с.

Ишанин Г. Г., Панков Э. Д., Андреев А. А., Польщиков Г. В. Источники и приемники излучения. — Санкт-Петербург: Политехника, 1991.—240 с.

Колобродов В. Г., Шустер Норберт. Инфракрасная термография (физические основы, методы проектирования и контроля, применение). — Киев: Министерство образования Украины, 1994.—426 с.

Павлов А. В. Оптико-электронные приборы. — М.: Энергия, 1974.—360 с.

**DESIGNING THE OPTICAL SYSTEM OF A SATELLITE-BORNE CCD-CAMERA**

*V. G. Kolobrodov*

A technique is proposed for designing the optical system of a satellite-borne CCD-camera. Formulas were obtained for calculating the resolution, focal length, angular and linear field of view, and entrance pupil diameter of the camera. Calculations of main objective characteristics are given as an example.