
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.397.681.772.7.535

В. Д. Смирнов, И. В. Кнороз, С. Е. Герсанова

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ ПРИ МАЛОМ КОНТРАСТЕ ОБЪЕКТА К ОКРУЖАЮЩЕМУ ФОНУ

Обсуждается проблема достижения потенциальной помехоустойчивости работы оптико-электронной аппаратуры при малом контрасте регистрируемого объекта к окружающему его фону. Получены выражения, определяющие потенциальную чувствительность оптико-электронных приборов и систем при ограничении ее фотонными шумами фонового тока.

Ключевые слова: система первичной обработки информации, приемник излучения, пороговая характеристика, входной зрачок, чувствительность.

Вопросы, относящиеся к решению проблемы работы аппарата человеческого зрения (а также простейших визуальных приборов) при малом контрасте регистрируемого объекта относительно контраста фона, впервые были поставлены основоположником фундаментальной теории о квантовой природе света акад. С. И. Вавиловым и впоследствии изучались А. А. Лебедевым и А. В. Луизовым [1]. Именно эти ученые ввели понятия контраста, порогового контраста, эффективного контраста, а также порогового контраста во времени. В космическом телевидении данная проблема изучалась А. Розе, Л. Хромовым и П. Брацлавцем [2—4].

С появлением современных приемников излучения (линейных и матричных ПЗС видимого диапазона, многоэлементных инфракрасных приемников излучения), работающих в спектральном диапазоне, во много раз превышающем область спектральной чувствительности человеческого глаза, значительно расширился и круг задач, которые в целом можно определить как проблему достижения потенциальной помехоустойчивости работы оптико-электронной аппаратуры в условиях различной величины контраста регистрируемого объекта к окружающему его фону [5—7].

Цель настоящей статьи — определение потенциальной чувствительности оптико-электронных приборов и систем при ограничении ее фотонными шумами фонового потока при регистрации малоразмерных объектов в условиях малого контраста к окружающему фону.

Рассмотрим работу оптико-электронной аппаратуры, когда фоновый поток значительно больше сигнального потока регистрируемого излучения. По определению Р. Хадсона [5], в этом случае режим работы приборов относится к так называемому „ограничению фоном“ („режим ОФ“).

Ток чувствительного элемента матричного приемника излучения, обусловленный фоновым монохроматическим потоком, определяется по формуле

$$J_{\text{ф}\lambda} = eY_{\lambda} \Phi_{\text{ф}\lambda} / hv = \pi L_{\text{ф}\lambda} (D/f')^2 \tau \pi d_{\text{эл}}^2 eY_{\lambda} / 16hv, \quad (1)$$

где $\Phi_{\text{фл}}$ — фоновый поток от регистрируемого объекта для длины волны λ ; e — заряд электрона; $L_{\text{фл}}$ — энергетическая яркость фона; τ — коэффициент пропускания оптической системы; D — диаметр входного зрачка оптической системы; f' — фокусное расстояние оптической системы; $\pi d_{\text{эл}}^2/4$ — площадь чувствительного элемента матричного приемника излучения (в данном случае полагается, что диаметр чувствительного элемента равен диаметру кружка рассеяния оптической системы: $d_{\text{эл}} = d_{\text{кр}}$); $h\nu$ — энергия кванта; Y_{λ} — квантовый выход приемника излучения для длины волны λ .

Ток, обусловленный световым потоком от регистрируемого малоразмерного объекта, при $d_{\text{кр}} = d_{\text{эл}}$ определяется выражением

$$J_{\text{сл}} = [(\pi D^2)/4](\Delta I_{\text{сл}}/R^2)e\tau Y_{\lambda}/h\nu, \quad (2)$$

где $\Delta I_{\text{сл}}$ — энергетическая сила света малоразмерного объекта; R — расстояние от регистрируемого объекта до оптико-электронного прибора.

Ток, обусловленный шумом, на основании формулы Шоттки при известной полосе пропускания электронного тракта (Δf) определяется как

$$J_{\text{ш}} = [2e(J_{\text{сл}} + J_{\text{фл}})\Delta f]^{1/2}. \quad (3)$$

Полагая, что $J_{\text{фл}} \gg J_{\text{сл}}$, и учитывая выражения (1)—(3), для отношения сигнал/шум можно записать:

$$\rho = J_{\text{сл}}/J_{\text{ш}} = (f'D\tau^{1/2}/d_{\text{кр}})(\Delta I_{\text{сл}}/R^2)(Y_{\lambda}/\Delta f)^{1/2}1/(2L_{\text{фл}}h\nu)^{1/2}. \quad (4)$$

В выражении (4) в первых скобках заключены параметры оптической системы как основного звена оптико-электронного прибора; характеристики системы первичной обработки информации включены в третьи скобки, а вторая и четвертая пары скобок определяют внешние характеристики. Следует подчеркнуть, что выражение (4) описывает работу оптико-электронной аппаратуры в „идеальном“ режиме: регистрируемый сигнал ограничен флуктуационными шумами фонового излучения, характеризуемого большей мощностью, чем мощность полезного сигнала, — условие „малого контраста“ объекта к фону.

В общем виде контраст регистрируемого объекта к окружающему его фону определяется формулой

$$K = (L_{\text{max}} - L_{\text{min}})/(L_{\text{max}} + L_{\text{min}}) = \Delta L/(L_{\text{max}} + L_{\text{min}}).$$

В случае когда яркость фона много больше яркости регистрируемого объекта ($L_{\text{сл}}$), можно записать

$$K = \Delta L_{\text{сл}}/L_{\text{фл}}. \quad (5)$$

Учитывая, что в первых скобках выражения (4) член $(D\tau^{1/2}/d_{\text{кр}})$ характеризует усиленные свойства оптической системы и поэтому непосредственно связан с так называемым „коэффициентом усиления“ [5, 6], равным $\beta = \tau(D^2/d_{\text{кр}}^2)$, а также учитывая, что $\Delta I_{\text{сл}} = \Delta L_{\text{сл}}\Delta S$ (где ΔS — площадь регистрируемого объекта), получаем в соответствии с формулой (5) следующее выражение для отношения сигнал/шум:

$$\rho = f'(\Delta S/R^2)[(Y_{\lambda}\Delta L_{\text{сл}}\beta K\tau_a)/(2h\nu\Delta f)]^{1/2}, \quad (6)$$

где $\Delta S/R^2$ — телесный угол объекта; τ_a — коэффициент прозрачности атмосферы.

Р. Хадсоном [5] предложено определять „идеальное“ (максимально возможное) расстояние до регистрируемого объекта при отношении сигнал/шум, равном единице. На основании выражения (6) „идеальное“ расстояние определяется формулой

$$R_{\text{ид}} = (f'\Delta S)^{1/2}[(Y_{\lambda}\Delta L_{\text{сл}}\beta K\tau_a)/(2h\nu\Delta f)]^{1/4}.$$

Когда оптико-электронный прибор регистрирует малоконтрастный объект, чувствительность прибора необходимо определять по минимальной (пороговой) облученности $E_{\text{п}}$ входного зрачка оптической системы; в этом случае формулу (4) целесообразно преобразовать к виду

$$E_{\text{п}} = (2L_{\text{фл}}h\nu\Delta f)^{1/2} / [f'(Y_{\lambda}\beta\tau_a)^{1/2}].$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луизов А. В. Инерция зрения. М.: Оборонгиз, 1961.
2. Розе А. Зрение человека и электронное зрение. М.: Мир, 1977.
3. Хромов Л. И., Смирнов В. Д. Влияние параметров оптической системы на предельную чувствительность телевизионных систем // Техника средств телевидения. Сер. Техника телевидения. 1981. Вып. 4. С. 3—7.
4. Брацлавец П. Ф. и др. Космическое телевидение. М.: Связь, 1973.
5. Хадсон Р. Инфракрасные системы. М.: Мир, 1972.
6. Смирнов В. Д. Оптические и оптико-электронные системы космического технического зрения для беспилотных летательных аппаратов. СПб.: Изд-во „Петербургский институт печати“, 2006.
7. Смирнов В. Д. Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника в полиграфии. СПб.: Изд-во „Петербургский институт печати“, 2000.

Сведения об авторах

- Всеволод Дмитриевич Смирнов** — д-р техн. наук, профессор; НИИ телевидения, Санкт-Петербург;
E-mail: niit@infos.ru
- Ирина Владимировна Кнороз** — аспирант; НИИ телевидения, Санкт-Петербург
- Светлана Евгеньевна Герсанова** — аспирант; НИИ телевидения, Санкт-Петербург

Рекомендована Институтом

Поступила в редакцию
12.03.08 г.