

УДК 621.397:629.7

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ОПТИКО-ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ВИЗИРОВ НА ЭТАПЕ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

И.М. Илюхин, С.Б. Каледин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
e-mail: valya@bmstu.ru

Предложена методика проектирования оптико-телевизионных визиров специального назначения, позволяющая рассчитать и оптимизировать параметры их основных функциональных блоков с учетом требований технического задания и возможностей зрительной системы человека-оператора.

Ключевые слова: оптико-телевизионный визир, телевизионный приемник излучения, видеоконтрольное устройство, зрительная система, решение наблюдательной задачи, угловое и энергетическое разрешение, отношение сигнал/шум, расчет и оптимизация параметров.

CALCULATION OF PARAMETERS OF SPECIAL-PURPOSE OPTIC TV SIGHTS AT THEIR DESIGN STAGE

I.M. Ilyukhin, S.B. Kaledin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow
e-mail: valya@bmstu.ru

A technique for designing the special-purpose optic TV sights is proposed which allows parameters of their basic functional units to be calculated and optimized taking into account requirements of preliminary specifications and capabilities of the vision system of a human operator.

Keywords: optic TV sight, matrix TV receiver, visual control device, vision system, solution to the observation problem, angular and energy resolution, signal-to-noise ratio, calculation and optimization of parameters.

Оптико-телевизионные визеры (ОТВ) получили широкое применение в качестве специализированных устройств для наблюдения удаленных объектов при решении различных технических задач: наведения и навигации летательных аппаратов, управления в промышленности и робототехнике, охранной службе и многих других сферах деятельности человека.

Особенностью работы таких устройств, в отличие от оптических наблюдательных приборов, является преобразование первичного оптического изображения, созданного объективом, в электрический сигнал (видеосигнал), последующая его обработка и создание вторичного изображения на экране отображающего устройства. Поэтому ОТВ включает в себя такие обязательные функциональные блоки, как объектив, телевизионный приемник излучения (ТПИ), электронный

тракт (ЭТ), канал передачи видеосигнала (КПВС) и видеоконтрольное устройство (ВКУ) [1]. Конечным потребителем видеoinформации обычно является человек-оператор, что требует согласования параметров визира (в первую очередь его ВКУ) с возможностями зрительной системы (ЗС) оператора.

При проектировании ОТВ выполняются различные расчеты, позволяющие оценить его энергетическое и пространственное разрешение, а также другие параметры, влияющие на решение поставленных в техническом задании задач. Особое значение при проектировании имеет энергогабаритный расчет, определяющий технические параметры всех основных блоков прибора.

Существуют различные подходы к энергогабаритному расчету. В последнее время наиболее перспективным можно считать способ, основанный на пространственно-частотном и времячастотном представлении процессов регистрации и преобразовании сигналов в тракте прибора. При этом различные блоки прибора описывают математическими моделями — импульсными откликами или передаточными функциями, а сам процесс преобразования сигналов заменяют операциями с их спектрами. Такой подход на практике часто оказывается более удобным и информативным.

Проектирование ОТВ начинают с анализа технического задания на его разработку, библиографического и патентного поиска аналогов и обоснования выбора основных функциональных блоков визира с учетом существующей и перспективной элементной базы. В современных визирах специального назначения, работающих в условиях дневной или сумеречной освещенности, используют линзовые объективы, а в качестве телевизионных приемников — кремниевые матричные приемники излучения. Электронный тракт прибора может быть аналогового или чаще цифрового типа, а в качестве канала передачи видеосигнала в зависимости от условий эксплуатации телевизионного визира используются: радиолиния, электронный или оптико-волоконный кабель. Наконец, ВКУ визира чаще всего выполняют на основе малогабаритных плоских видеоэкранов, например на основе активных или пассивных жидкокристаллических элементов.

Выбор конкретного типа матричного приемника излучения предопределяет выбор параметров поэлементного разложения создаваемого объективом изображения: формат видеокадра K_k , число рабочих строк разложения изображения z_p и частоту повторения кадров ν_k телевизионного сигнала. В свою очередь эти параметры определяют эффективную полосу пропускания амплитудно-частотной характеристики ЭТ. Она должна обеспечить максимизацию отношения сигнал/шум и минимизацию искажений формы электрических импульсов, снимаемых

с каждого элемента матричного приемника в процессе его построчно-кадрового опроса. Этим условиям отвечает широкополосный ЭТ с нижней (ν_n) и верхней (ν_b) границами среза частот, значения которых можно принять, как $\nu_n \geq \nu_k$ и $\nu_b \leq 1/\tau_1$, где $\tau_1 = (k_k z_p^2 \nu_k)^{-1}$ — длительность единичных импульсов сигнала. Вследствие конечности полосы пропускания ЭТ $\Delta\nu_{ЭТ} = (\nu_b - \nu_n)$ нормированная амплитуда этих импульсов на выходе тракта будет уже порядка 0,95 их начального значения и почти без искажения формы, так как энергетический КПД ЭТ при обработке им электрического сигнала определяется как

$$\eta_{ЭТ} = \left[\int_{\nu_n}^{\nu_b} U(\nu)^2 d\nu / \int_0^{\infty} U(\nu)^2 d\nu \right]^{1/2} \simeq 0,95.$$

Для сохранения информации, содержащейся в таком высокочастотном видеосигнале, канал передачи должен иметь полосу пропускания, определяемую как

$$\Delta\nu_{КПВС} = \Delta\nu_{ЭТ} \log_2(1 + \mu),$$

где μ — требуемое для энергетического разрешения элементов наблюдаемой картины отношение сигнал/шум.

На этапе решения наблюдательной задачи (опознавания или идентификации оператором объекта с требуемой вероятностью) ОТВ должен обеспечивать необходимое для этого угловое разрешение $\varphi_{ОТВ}$. Его значение может быть рассчитано по формуле

$$\varphi_{ОТВ} = a_0 / (N_M l_0), \quad (1)$$

где значения определяющего размера наименьшего объекта наблюдения a_0 и его максимальное удаление l_0 от визира оговариваются техническим заданием, а N_M — число периодов эквивалентной пространственной миры, обеспечивающее требуемую вероятность P решения оператором наблюдательной задачи, выбирается в соответствии с критерием Джонсона [2]. Зависимость $P = f(N_M)$, полученная экспериментальным путем, представлена на рис. 1.

В пространстве изображений угловое разрешение ОТВ определяется уже как

$$\varphi_{ОТВ} = 2h_{ТПИ} / (z_p f_{об}), \quad (2)$$

где $h_{ТПИ}$ — размер чувствительного слоя телевизионного приемника

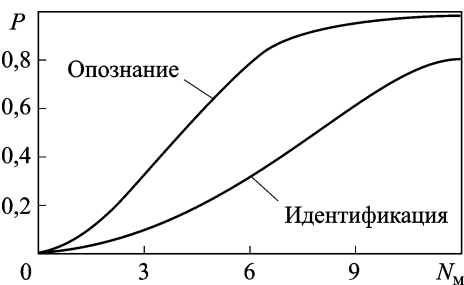


Рис. 1. Зависимость вероятности решения наблюдательной задачи от числа периодов эквивалентной пространственной миры при $\mu \geq \mu_{тр}$

излучения, а $f_{об}$ — фокусное расстояние объектива визира. С учетом параметров выбранного ТПИ совместным решением равенств (1) и (2) можно рассчитать фокусное расстояние объектива, при котором ОТВ будет обеспечивать необходимое угловое разрешение. Понятно, что при этом должно обеспечиваться и требуемое энергетическое разрешение $\mu_{тр}$, а в пределах всего прямоугольного по форме углового поля ОТВ, определяемого как

$$2\omega = h_{ТПИ}(1 + K_{\kappa}^2)/f_{об},$$

объектив должен иметь диаметр кружка рассеяния не хуже чем $d_{кр} \leq h_{ТПИ}/z_p$ или $d_{кр} \leq a_{эл}$ (здесь $a_{эл}$ — размер одного элемента матричного ТПИ).

Энергетическое разрешение элементов наблюдаемой картины обеспечивается относительным отверстием объектива $Ot_{об}$ визира. Его требуемое значение рассчитывается из условия

$$\Delta E_{прив} \geq \mu \times E_{пор}, \quad (3)$$

где $\Delta E_{прив}$ — контрастная облученность в плоскости изображения от элементов наблюдаемой картины, приведенная к спектру излучения стандартного источника, используемого при паспортизации ТПИ, а $E_{пор}$ — паспортная пороговая чувствительность (облученность) выбранного ТПИ. Значение $\Delta E_{прив}$, в свою очередь, может быть рассчитано как

$$\Delta E_{прив} = E(T_0) \times (\rho_o - \rho_{\phi}) K_{прив} \tau_A \tau_{об} \times 0,25 Ot_{об}^2 \times \eta_{с.о.с}, \quad (4)$$

где $E(T_0)$ — облученность наблюдаемой картины Солнцем, небесной сферой или иным источником оптического излучения, спектр которого определяется его температурой T_0 , К; ρ_o и ρ_{ϕ} — интегральные коэффициенты отражения (яркости) элементов объекта наблюдения и окружающего его фона; $K_{прив}$ — безразмерный коэффициент приведения; τ_A и $\tau_{об}$ — коэффициенты интегрального пропускания слоя атмосферы и объектива внутри рабочего спектрального диапазона; $Ot_{об}$ — искоемое относительное отверстие объектива; $\eta_{с.о.с}$ — безразмерный коэффициент, который учитывает энергетические потери сигнала (снижение контраста элементов наблюдаемой картины) вследствие влияния на пространственно-частотные составляющие оптического сигнала передаточной функции объектива и ТПИ, а на времячастотные составляющие электрического сигнала — инерциальные свойства МПИ и конечной полосы пропускания ЭТ. Для практически безынерционного МПИ при $d_{кр} \approx a_{эл,МПИ}$ и $\Delta\nu_{ЭТ} \approx K_{\kappa} z_p^2 \nu_{\kappa}$ числовое значение относительно контраста в сигнале на выходе ЭТ (значение энергетического КПД системы обработки сигнала $\eta_{с.о.с}$) можно оценить как произведение

$$\eta_{с.о.с} = \eta_{об} \eta_{ТПИ} \eta_{ЭТ} = 0,85(2/\pi)0,95 \approx 0,515.$$

Значение энергетического КПД оптической системы $\eta_{об}$ получено в предположении, что ОПФ объектива можно аппроксимировать предполагаемой в работе [3] зависимостью вида

$$\tilde{H}_{oc,N}(\nu_z) = \sin c(\pi\nu_z d_{кр}) / (1 - (\nu_z d_{кр})^2),$$

для которой на частоте разрешаемой ОТВ эквивалентной пространственной миры

$$\nu_z = 1/2d_{кр}H_{oc,N}(\nu_z) \simeq 0,85.$$

Изменение контраста в сигнале на выходе МПИ можно оценить, используя пространственно-частотное описание процесса его преобразования дискретно расположенными элементами матрицы [4]. Передаточная функция одного элемента МПИ как пространственного фильтра может быть представлена в виде

$$\tilde{H}_{МПИ,N}^*(\nu_z) = \sin c(\pi\nu_z a_{э.м,МПИ}).$$

Для $\nu_z = 1/2d_{кр}$ при сделанных ранее допущениях соотношения размеров абберационного пятна и фоточувствительного элемента МПИ получаем

$$U(\nu_z)_N = \tilde{H}_{МПИ,N}^* = \sin c(\pi/2) = \eta_{ТПИ} = 2/\pi \approx 0,64.$$

Поскольку ОТВ работает в видимой и ближней ИК области спектра, то коэффициент приведения может быть рассчитан как

$$K_{прив} = (K(T_0)_{ТПИ} / K(T_{ст})_{ТПИ}) \cdot (K(T_{ст})_{ЗС} / K(T_0)_{ЗС}),$$

где $K(T)$ — коэффициент использования телевизионным приемником и зрительной системой (ЗС) оператора излучения облучающего и стандартного источников, спектр которых определяется соответственно температурами T_0 и $T_{ст}$. В свою очередь, значение $K(T)$ рассчитывается как

$$K(T) = \int_0^{\infty} E(T, \lambda) S(\lambda) d\lambda / \int_0^{\infty} E(T, \lambda) d\lambda,$$

где $S(\lambda)$ — относительная спектральная чувствительность ТПИ.

Габаритно-энергетические параметры экрана ВКУ визира должны быть оптимизированы с учетом пространственно-угловых, времячастотных и энергетических возможностей ЗС оператора. В современных ОТВ специального назначения наблюдаемая картина воспроизводится на малогабаритном матричном экране ВКУ. Будем полагать, что экран имеет равное с ТПИ число элементов, яркость свечения каждого из которых пространственно однородна и пропорциональна амплитуде электрического импульса, снимаемого с соответствующего элемента ТПИ, т.е. $L_i = K_3 U_i$, где K_3 — коэффициент преобразования (светоотдачи) люминофора экрана. Вследствие пространственной

дискретизации изображения аналогичной той, что имеет место в плоскости матричного ТПИ, контраст сформированной на экране картины снизится еще на 36 %, т.е. $\eta_3 = \eta_{\text{ТПИ}} = 0,64$. Поэтому результирующее снижение энергетического контраста исходного оптического сигнала всеми функциональными блоками ОТВ будет “восприниматься” на экране уже как произведение

$$\eta_{\text{ОТВ}} = \eta_{\text{об}} \times \eta_{\text{ТПИ}} \times \eta_{\text{ЭТ}} \times \eta_3 = 0,85 \times 0,64 \times 0,95 \times 0,64 \approx 0,33.$$

Распределение яркости свечения по площади экрана является подобием огибающей построчно-кадрового изменения амплитуды электрического сигнала, снимаемого с выхода ЭТ прибора. При этом визуально воспринимаемое отношение сигнал/шум на экране ВКУ, полагая собственный его шум пренебрежимо малым, можно оценить как

$$\mu_3 = \eta_{\text{ОТВ}}(\rho_0 - \rho_{\text{ф}}) \times K_{\text{ВКУ}} / [(\rho_0 + \rho_{\text{ф}}) \times \sigma_{\text{ЗС}}],$$

где $\sigma_{\text{ЗС}}$ — контрастная чувствительность ЗС оператора, а $K_{\text{ВКУ}}$ — коэффициент усиления контраста элементов наблюдаемой на экране картины в процессе улучшения ее качества с помощью регулировок “яркость” и “контраст” на панели ВКУ. В современных ОТВ с цифровой обработкой сигнала эта регулировка выполняется автоматически в процессе начального тестирования визира. Благодаря этому устанавливается благоприятный для ЗС оператора уровень средней яркости свечения экрана — яркость адаптации ЗС порядка 50...75 кд/м² и корректируется амплитуда переменной составляющей электрического сигнала, являющегося аналогом перепада яркости между элементами наблюдаемой картины. При этом будут достигнуты “комфортные” значения контрастной чувствительности $\sigma_{\text{ЗС}} \approx 0,03-0,05$ и разрешающей способности ЗС не хуже двух угловых минут. Это позволит оператору различать в изображении объекта достаточное для его распознавания число градаций яркости $m_L \approx \ln(K_L)/\sigma_{\text{ЗС}}$, где $K_L = L_{\text{max}}/L_{\text{min}}$ — динамический диапазон перепада яркости на экране ВКУ визира.

Значение μ_3 определяет вероятность правильного опознавания или идентификации объекта наблюдения с позиции энергетического разрешения его элементов на экране ВКУ. Экспериментально полученная зависимость $P = f(\mu_3)$ [5] приведена в таблице.

μ_3	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0
Вероятность опознавания	0,30	0,53	0,72	0,9	0,98
Вероятность идентификации	0,12	0,30	0,48	0,7	0,81

Для наиболее полного и эффективного использования возможностей ЗС оператора необходимо выполнить следующие условия (рис. 2).

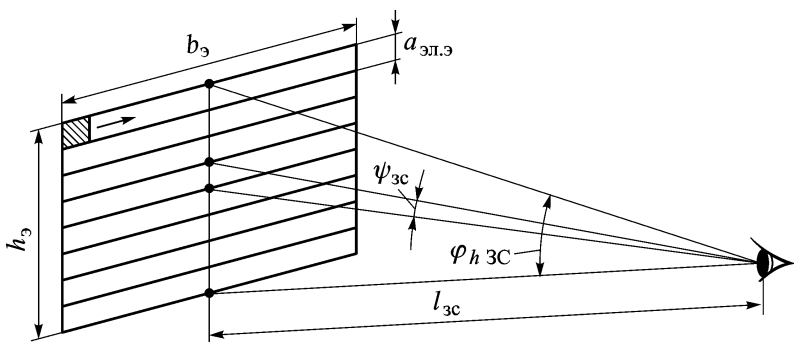


Рис. 2. К расчету оптимальных параметров экрана ВКУ

Во-первых, так как поле ясного зрения человека по разным оценкам составляет величину порядка $(\varphi_h \times \varphi_b) \simeq (9 \dots 12) \times (12 \dots 16)$ градусов, внутри которого угловое разрешение $\varphi_{зс} \simeq 1$ минута [6], то для исключения визуального восприятия строчной структуры растра число рабочих строк разложения z_p и формат кадра должны выбираться как

$$z_p \geq \varphi_{h,зс} / \varphi_{зс} \geq (540 \dots 720) \text{ и } K_k = b_э / h_э = 4/3.$$

Кроме того, с учетом удаления ЗС от экрана ВКУ (очевидно, что в специализированных ОТВ $l_{зс} \geq (220 \dots 250)$ мм) размер одного его элемента и рабочая высота должны выбираться как

$$a_{эл.э} \leq l_{зс} \times \varphi_{зс} \text{ и } h_э = a_{эл.э} \times z_p \geq l_{зс} \times \varphi_{зс}.$$

Во-вторых, частота смены кадров ν_k должна быть не менее некоторого критического значения $\nu_{кр}$, исключающего с учетом инерционных свойств ЗС визуальное восприятие чередования кадров. Так, при наблюдении медленно перемещающихся объектов и яркости экрана порядка 50 кд/м^2 можно принимать $\nu_k \geq (25 \dots 30)$ Гц. В случае же наблюдения быстро перемещающихся объектов необходимо использовать так называемую чересстрочную развертку, когда каждый кадр формируется двумя последовательными полукадрами, следующими с частотой $\nu_{п/к} = 2\nu_k$.

Отношение сигнал/шум в сигнале, поступающем на вход ВКУ, с учетом снижения его контраста в объективе, ТПИ и ЭТ должен быть не менее чем

$$\eta_{с.о.с} \times \Delta E_{прив} / E_{пор} \geq \mu_{тр},$$

где $\mu_{тр}$ — определяется значением требуемой вероятности надежного выделения полезного сигнала на фоне случайных помех [7].

Такой ОТВ будет обеспечивать видимое (угловое) увеличение, определяемое как

$$\Gamma_{ОТВ} = \varphi_{зс} / \varphi_{вх} \approx (h_э / l_{зс}) / (h_{ТПИ} / f_{об}).$$

К сожалению, оно лишь увеличивает масштаб наблюдаемой на экране картины, сохраняя в ней исходное пространственное (угловое) разрешение, которое было получено на входе ОТВ сочетанием параметров ТПИ и объектива.

Завершающим этапом проектирования ОТВ является изготовление опытного образца визира, проведение его натурных испытаний с последующим устранением выявленных недостатков и окончательной оптимизацией параметров.

Предложенная методика проектирования ОТВ позволяет рассчитать и оптимизировать параметры его основных функциональных блоков согласно требованиям технического задания с учетом возможностей ЗС человека-оператора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование и техническая эксплуатация телевизионной аппаратуры: учеб. пособие для вузов / Под ред. С.В. Новаковского. – М.: Радио и связь, 1994. – 355 с.
2. Ллойд Дж. Системы тепловидения. – М.: Мир, 1978.
3. Мосягин Г. М., Немтинов В. Б., Лебедев Е. Н. Теория оптико-электронных систем. – М.: Машиностроение, 1990. – 431 с.
4. Бокшанский В. Б., Карасик В. Е. Расчет характеристик фоточувствительных приборов с зарядовой связью. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 52 с.
5. Красильников Н. Н., Шелепин Ю. Е. Красильникова О. И. Фильтрация в зрительной системе человека в условиях порогового наблюдения // Оптический журнал. – 1999. – Т. 66, № 1. – С. 5–14.
6. Волков В. В., Луизов А. В., Овчинников В. В., Травникова Н. П. Эргономика зрительной деятельности человека. – Л.: Машиностроение, 1989. – 112 с.
7. Гарасов А. В., Якушенок Ю. Г. Инфракрасные системы смотрящего типа. – М.: Логос, 2004. – 444 с.

Статья поступила в редакцию 21.05.2012

Игорь Михайлович Илюхин — канд. техн. наук, доцент кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в области проектирования и производства оптико-электронных приборов управления.

I.M. Ilyukhin — Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Laser and Optic-Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 50 publications in the field of designing and manufacturing of optic-electronic control device.

Сергей Борисович Каледин — канд. техн. наук, доцент кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в области оптико-электронных приборов.

S.B. Kaledin — Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Laser and Optic-Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 50 publications in the field of optic-electronic instruments.