

УДК 629.7.054.001

И. М. И л ю х и н

ВЫБОР И ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПРИЕМНОЙ СИСТЕМЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА НА СТАДИИ ЭСКИЗНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Предложены практические рекомендации и аналитические зависимости, позволяющие на стадии эскизного проектирования оптико-электронного прибора предъявлять технически обоснованные требования к важнейшим параметрам его приемной системы.

Один из этапов разработки оптико-электронного прибора (ОЭП) — эскизное проектирование, т.е. анализируя техническое задание (ТЗ), результаты патентного и библиографического поиска, учитывая существующую элементную базу и технологические возможности производства, сначала обоснованно выбирают принципиальную схему будущего изделия и его основные функциональные блоки, а затем проводят энергетический, габаритный и абберрационный расчеты фотоприемной системы (ФПС) прибора. По результатам этих расчетов вычерчивают оптическую схему, которая является основой конструкции прибора и всей технической документации, необходимой для производства нового изделия.

В процессе обоснования принципиальной схемы прибора, анализируя спектральный состав и мощность излучения объекта “наблюдения” и окружающего его фона, выбирают спектральный диапазон его работы, типы приемника излучения (ПИ) и оптической системы (ОС), а также материалы ее компонентов. С учетом окон прозрачности атмосферы и спектра излучения наиболее характерных типов естественных фонов, в качестве рабочего спектрального диапазона чаще всего используется либо диапазон 2...5 мкм (для “горячих” целей, имеющих температуру $T_{ц} > 600$ К), либо 7...14 мкм (для “холодных” целей с $T_{ц} < 600$ К). Эти спектральные диапазоны легко формируются в ОЭП парой “оптический фильтр–приемник излучения”, где коротковолновая граница обеспечивается фильтром (например из просветленного германия и сурьмянистого индия), а длинноволновая — “красной” границей чувствительности выбранного ПИ. Понятно, что все преломляющие компоненты ОС при этом должны быть выполнены

из материалов, имеющих малые световые потери в выбранном спектральном диапазоне. Это позволяет рассчитать ожидаемые значения коэффициентов спектрального пропускания ОС и слоя атмосферы, а в ходе последующего расчетно-технического обоснования выбранной схемы прибора [1, 2] определить важнейшие параметры его объектива, отвечающие требованиям ТЗ по энергетике, угловому разрешению (точности), помехозащищенности, массогабаритным и другим показателям.

Полученные параметры ОС полезно проанализировать с точки зрения их технико-экономической “реализуемости”. Она, в первую очередь, определяется соответствием полученных значений диаметра D зрачка входа, относительного отверстия (D/f) и углового поля 2ω “допустимым” их значениям, а также возможностью обеспечения ОС требуемого качества изображения. Для проведения такого анализа необходимо иметь некоторые численные параметры–ориентиры, которые позволяют путем сравнения с ними требуемых по расчету параметров сделать заключение о технико-экономической целесообразности создания такой ОС. Далее приведены такие параметры–ориентиры.

Накопленный опыт разработки ОЭП показывает, что, исходя из массогабаритных и стоимостных ограничений, нецелесообразно использовать ОС с диаметром линз более 100. . . 150 мм и относительным отверстием более 0,75. . . 0,8, а зеркальные и комбинированные ОС с диаметром и относительным отверстием зеркал соответственно более 200. . . 250 мм и 0,9. . . 1,0 [2]. Угловое поле определяет эффективность процесса поиска объекта наблюдения и точность измерения его положения в связанной с прибором системе координат, а также степень его защищенности от мешающего излучения фона. Кроме того, с ростом углового поля возникают проблемы с абберационной коррекцией ОС. Поэтому, учитывая реализуемый способ поиска объекта наблюдения, а также требуемую точность работы и помехозащищенности прибора, его угловое поле желательно ограничивать десятком угловых минут в ОЭП сканирующего и несколькими градусами ($\leq 3^\circ \dots 5^\circ$) — следящего типа [2, 3].

Качество изображения, создаваемого ОС при наблюдении удаленных “точечных” объектов, может быть определено следующими численными показателями. Простейшим из них является значение диаметра кружка рассеяния $d_{к,р}$, величина которого зависит от параметров ОС (в первую очередь от ее относительного отверстия, углового поля и рабочего спектрального диапазона) и определяется степенью абберационной исправленности системы, а также качеством ее изготовления и сборки. Следует помнить, что даже идеальная (безабберационная) ОС не может иметь $d_{к,р}$ меньше его дифракционного предела

$d_d = 2,44\lambda/(D/f)$, где λ — длина волны оптического излучения в области максимума спектральной чувствительности ФПС прибора.

Более совершенным показателем качества ОС следует считать ее разрешающую способность, количественной мерой которой служит значение минимального угла ϕ_m между двумя близлежащими точечными объектами, когда ФПС прибора воспринимает их еще раздельно (выдает независимую информацию об их угловом положении в пространстве предметов). Значение ϕ_m определяется не только обеспечиваемым ОС значением $d_{к.р}$, но и распределением энергии (облученности) в пределах этого кружка $E(y, z)$, а также способом восприятия изображения — необходимым для разрешения объектов абсолютным $\Delta E = E_{\max} - E_{\min}$ или относительным $K_E = \Delta E/E$ энергетическим контрастом. Последний, в свою очередь, определяется контрастной чувствительностью зрительной системы человека-оператора или автоматической системы распознавания на основе какого-либо ПИ. Так, при визуальном восприятии изображения надежное разрешение “точечных” элементов удаленной картины обеспечивается, если центры их изображений смещены относительно друг друга на расстояние T_p , равное $d_{к.р}/2$ (критерий визуального разрешения по Рэлею). Тогда для дифракционно ограниченной (безабберационной) ОС имеем предел визуального разрешения, определяемый как (рис. 1)

$$\phi_m = T_p/f = d_d/2f = 1,22\lambda/D.$$

Видно, что чем меньше взаимное смещение элементов изображения ($T_p < d_{к.р}$), тем с меньшим контрастом они воспроизводятся ОС, а при некотором предельно близком их расположении $K_E \rightarrow 0$, и они уже не будут восприниматься раздельно. Поэтому при заданной разрешающей способности визуального прибора ϕ_m и дифракционном характере распределения энергии в изображении можно назначить требование к качеству ОС, ограничив значение диаметра допустимого кружка рассеяния условием $d_{к.р} \leq 2f_{ОС}^*\phi_m$.

Согласно экспериментально полученным данным [4] для решения задачи обнаружения, определения ориентации, опознавания или идентификации объекта наблюдения необходимо, чтобы в его определяющем размере a_o укладывалось требуемое число n элементов разрешения или соответствующее число $N = n/2$ периодов эквивалентной пространственной миры (рис. 2) в виде чередующихся светлых и темных полос с относительным яркостным контрастом, близким к единице (так называемый критерий разрешения по Джонсону). При этом для решения соответствующей задачи “наблюдения” с вероятностью

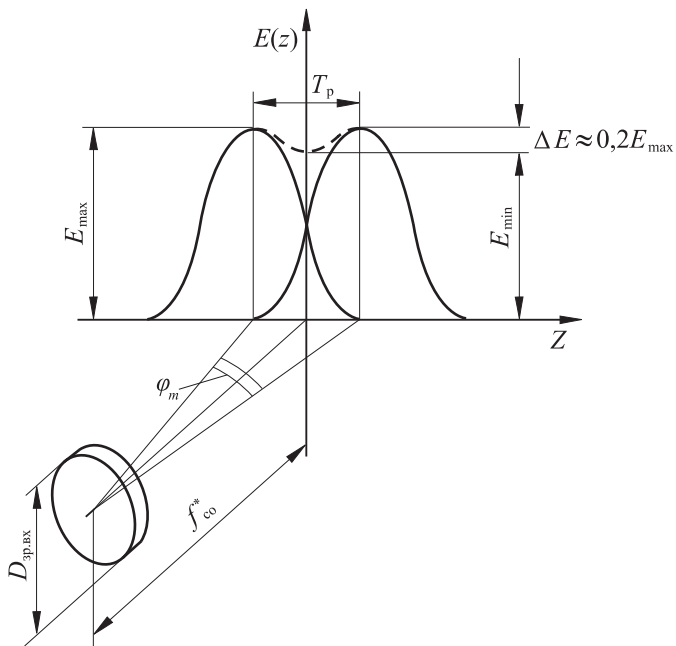


Рис. 1. Угловое разрешение ОС согласно критерию Рэлея

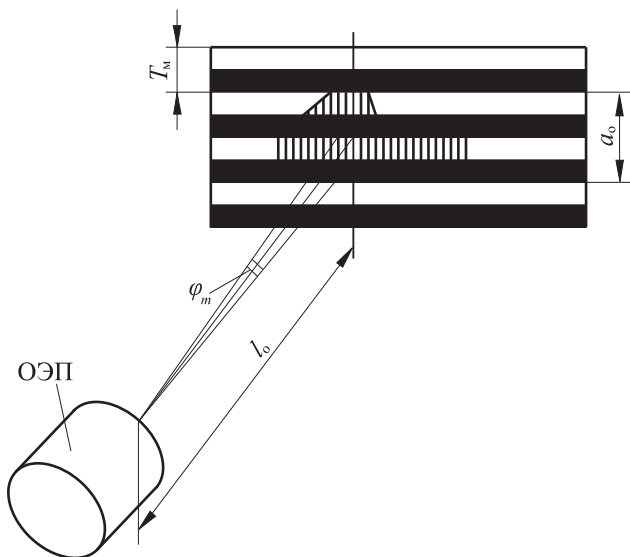


Рис. 2. Угловое разрешение ОЭП согласно критерию Джонсона

$P = 50\%$ необходимо, чтобы $n \geq 1, 2, 4$ и 6 . Поэтому зависимость $P = f(n)$ может быть аппроксимирована выражением

$$P(n) = 1 - \exp[-\alpha_i(n \pm 1)^2],$$

где α_i — коэффициент, определяющий характер решаемой задачи, и соответственно равный $0,690$; $0,173$; $0,043$ и $0,019$.

В таблице приведены значения n , которые необходимы для решения соответствующей задачи наблюдения с заданной вероятностью. При этом, естественно, предполагается, что между элементами изображения обеспечивается требуемый абсолютный контраст ΔE (или требуемое значение отношения сигнал/шум). Следует иметь в виду, что приведенные в таблице значения n хорошо определяют работу приборов, создающих безрастровое изображение (оптические визиры, приборы ночного видения), и несколько хуже — работу ОЭП с растровой структурой формирования визуализированного изображения (телевизиры, тепловизоры).

Таблица

Требуемая вероятность, %	Число n элементов разрешения, необходимое для			
	обнаружения	определения ориентации	опознавания	идентификации
50	1,00	2,00	4,00	6,0
75	1,41	3,00	5,65	8,5
90	1,82	3,65	7,25	11,0
95	2,08	4,15	8,35	12,5
98	2,57	5,12	10,3	15,5

Согласно критерию Джонсона для надежного решения задачи визуального восприятия объекта необходимо, чтобы ОЭП имел угловое разрешение, определяемое как (см. рис. 2)

$$\phi_p = a_o / (Nl_o) = 2a_o / (nl_o),$$

где l_o — удаление объекта наблюдения от прибора. Тогда для реализации такой разрешающей способности при $K_E \rightarrow 1$ ОС прибора должна обеспечивать $d_{к,р}$ с “гауссоидальным” распределением энергии в нем, который равен изображению одного периода T_p эквивалентной пространственной миры для приборов с безрастровой и одного ее элемента $T_p/2$ для приборов с растровой структурой формирования визуализированного изображения, т.е. соответственно

$$d_{к,р} \leq f_{ОС}^* \phi_m = f_{ОС}^* a_o / Nl_o \quad \text{и} \quad d_{к,р} \leq f_{ОС}^* \phi_m / 2 = f_{ОС}^* a_o / nl_o.$$

Последняя рекомендация является следствием теоремы отсчетов (теоремы Котельникова), согласно которой для минимизации искажений при формировании растровой картины период ее пространственной

дискретизации должен быть обратно пропорционален удвоенной максимальной частоте, содержащейся в пространственном спектре изображения.

Допустимое значение диаметра $d_{к.р}$ в автоматически работающих приборах определяется из условия получения требуемой точности слежения за объектом, а также соображениями обеспечения его необходимой помехозащищенности. Так, в случае использования в приборе одноплощадочного ПИ, $d_{к.р}$ следует принимать равным размеру элементарной ячейки раstra-анализатора, угловой размер которой, как показала практика эксплуатации таких ОЭП, не должна превышать $6 \dots 8$ угловых минут (это угловой размер большинства удаленных реальных целей), т.е. $d_{к.р} \leq f_{ОС}^* (6 \dots 8) \times 2,9 \times 10^{-4}$.

Применительно к приборам с многоплощадочными ПИ $d_{к.р}$ должен быть соизмерим с размерами одного элемента приемника, т.е. $d_{к.р} \approx a_{эл.пи}$.

Еще более совершенной характеристикой качества ОС является ее оптическая передаточная функция (ОПФ), нормированный модуль которой — модуляционная передаточная функция (МПФ) — определяет, с каким энергетическим контрастом ОС воспроизводит в создаваемом изображении содержащиеся в нем пространственно-частотные составляющие. Аналитически ОПФ — это результат двухмерного преобразования Фурье функции распределения облученности $E(y, z)$ в изображении точечного объекта, т.е.

$$H(\nu_y, \nu_z) = \iint E(y, z) \exp[-j2\pi(\nu_y y + \nu_z z)] dy dz.$$

Оптическая передаточная функция является универсальным показателем качества ОС, так как она учитывает как размер элемента изображения ($d_{к.р}$), так и распределение энергии в нем $E(y, z)$. Кроме того, ее объективно можно получить расчетным путем для вновь создаваемой или экспериментально измерить (с погрешностью не более $3 \dots 5\%$ [5]) для уже существующей ОС. Распределение энергии в точечном изображении чаще всего носит “гауссообразный” характер. Зная из абберрационного расчета ОС значение $d_{к.р}$, можно получить следующее выражение ее одномерной нормированной ОПФ (рис. 3):

$$\begin{aligned} H(\nu_z)_N &= \int \cos^2(\pi z/d_{к.р}) \exp(-j2\pi\nu_z z) dz = \\ &= \sin(\pi\nu_z d_{к.р}) / \pi\nu_z z (1 - \nu_z^2 d_{к.р}^2)^{-1}. \end{aligned}$$

Имея график $H(\nu_z)_N$ и требуемый уровень порогового контраста $K_{пор}$ в изображении, можно рассчитать как необходимую для его

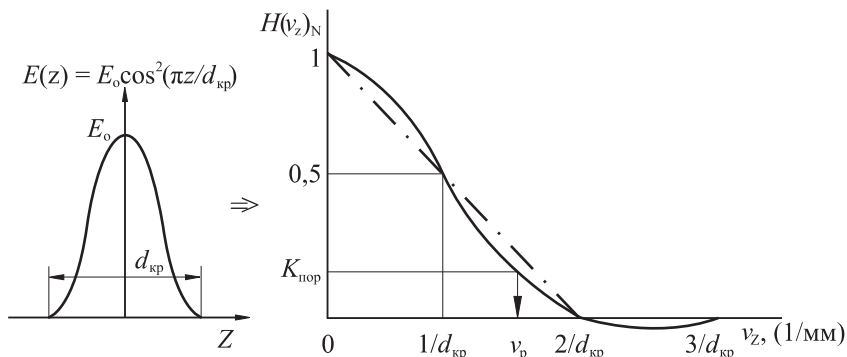


Рис. 3. Одномерная функция рассеяния ОС и ее ОПФ

достижения разрешающую способность ОС $\phi_{\text{ОС}} = (\nu_p f_{\text{ОС}}^*)^{-1}$, так и требуемое взаимное смещение двух его элементов $T_p = 1/\nu_p$, где ν_p — предельно разрешаемая частота в полном спектре изображения. Согласно рис. 3 при $K_{\text{пор}} \approx 0,2$ имеем $T_p \cong 0,68d_{\text{к.р}}$, т.е. ОС с “ \cos^2 ”-распределением энергии в пределах $d_{\text{к.р}}$ обеспечивает примерно на 13,5% меньшее разрешение по сравнению с ОС, имеющей дифракционное распределение энергии.

В ОЭП угловое поле редко превышает 10...15 градусов, поэтому основными видами aberrаций для них можно считать сферическую aberrацию, кому и хроматизм. Поэтому на стадии эскизного проектирования ОЭП еще до проведения aberrационного расчета его ОС можно использовать следующие эмпирически полученные зависимости для оценки значения ожидаемого кружка рассеяния $d_{\text{ож}}$. Оно рассчитывается как функция размера дифракционного кружка d_d и требуемых параметров ОС:

$$d_{\text{ож}} = 2,44\lambda_m/0,32[((D/f)/0,32)^2 + (D/f)/0,32 \times 2\omega/8]$$

— для линзовых ОС (с двумя и более линзами);

$$d_{\text{ож}} = 2,44\lambda_m/0,48[((D/f)/0,48)^2 + (D/f)/0,48 \times 2\omega/5]$$

— для зеркальных и комбинированных ОС, где 2ω в градусах, а (D/f) должно быть или более 0,32 или равно 0,48.

Следует заметить, что зависимости подобного типа А.П. Грамматин [6] получил аналитически. Как показала сравнительная оценка качества изображения, у более чем 20 ОС, разработанных в ГОИ им. Вавилова и на кафедре РЛ-3 МГТУ им. Н.Э. Баумана, предложенные эмпирические зависимости дают хорошее совпадение (с погрешностью не более 10...15%) с результатами aberrационного расчета при $(D/f) \leq 0,7$ и $2\omega \leq 15^\circ$ для линзовых и при $(D/f) \leq 1$ и

$2\omega \leq 10^\circ$ для комбинированных ОС. Видно, что первый множитель в этих выражениях косвенно учитывает рабочую спектральную область прибора, а слагаемые второго множителя определяют вклад в значение $d_{\text{ож}}$ соответственно сферической аберрации ОС и ее комы. Очевидно, что требуемое значение $d_{\text{к.р}}$ не должно быть меньше того значения, которое позволяет сделать предварительный вывод о возможности использования в разрабатываемом приборе выбранной ОС, а также о допустимых размерах элементарных ячеек раstra-анализатора или чувствительных площадок ПИ.

Таким образом, предложенные рекомендации и аналитические зависимости позволяют на стадии эскизного проектирования ОЭП предъявить технически обоснованные требования к важнейшим параметрам его ОС и пространственной структуре анализатора изображения или ПИ, а также убедиться в возможности их реализации без неоправданного усложнения прибора и увеличения стоимости его производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Илюхин И. М. Методика энергетического расчета оптико-электронного прибора пеленгационного класса // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Приборостроение”. – 2004. – № 1. – С. 27–36.
2. Проектирование оптико-электронных приборов / Под ред. Ю.Г. Якушенкова. – М.: Логос, 2000. – 488 с.
3. Мосягин Г. М., Немтинов В. Б., Лебедев Е. Н. Теория оптико-электронных систем. – М.: Машиностроение, 1990. – 432 с.
4. Ллойд Дж. Системы тепловидения. – М.: Мир, 1978. – 465 с.
5. Илюхин И. М. Расчет на ЭВМ точностных характеристик стенда для измерения оптической передаточной функции // Изв. вузов. Приборостроение. – 1991. – № 2. – С. 29–35.
6. Вычислительная оптика: Справочник / М.М. Русинов, А.П. Грамматин, П.Д. Иванов и др.; Под общей ред. М.М. Русинова. – Л.: Машиностроение, 1984. – 424 с.

Статья поступила в редакцию 18.03.2005



Игорь Михайлович Илюхин родился в 1937 г., окончил в 1961 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 49 научных работ в области проектирования и производства оптико-электронных приборов систем управления.

I.M. Ilyukhin (b. 1937) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1961. Ph.D.(Eng.), assoc. professor of “Laser and Optical and Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 49 publications in the field of design and manufacturing of optical and electronic devices for control systems.