

## Методика расчета объективов с зеркалами манжена на основе трехзеркальной системы с эксцентрично расположенным полем изображения

В.И. Заварзин<sup>1</sup>, С.О. Кравченко<sup>1</sup>, С.А. Морозов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

*Рассмотрена методика расчета трехзеркальных оптических систем с зеркалами Манжена и эксцентрично расположенным полем изображения, позволяющая уменьшить порядок асферических поверхностей, используемых в трехзеркальных объективах, а в некоторых случаях и отказать от них. Приведены расчетные формулы и пример одного из новых объективов, разработанных по данной методике.*

**E-mail:** s.a.morozov@outlook.com

**Ключевые слова:** зеркальные объективы, зеркально-линзовые объективы, трехзеркальные объективы, трехзеркальные анастигматы, зеркала Манжена, эксцентричное поле изображения.

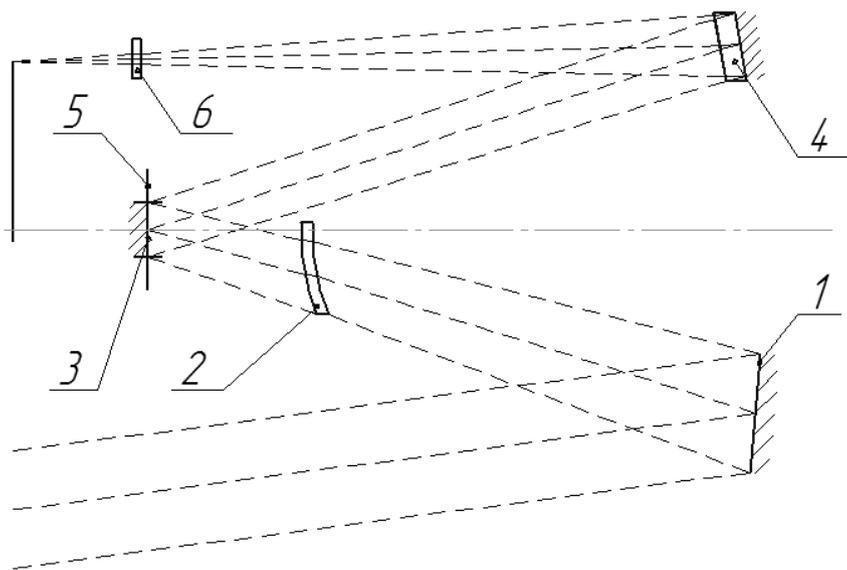
В настоящее время наблюдается повышенный интерес к использованию данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса в различных областях народного хозяйства. Наряду с использованием этих данных в интересах Министерства обороны, нефтегазовой промышленности, геологических, океанических, лесных, сельскохозяйственных предприятий, все чаще они находят применение в городском, муниципальном и региональном управлении, в землеустройстве, картографии, обнаружении и ликвидации чрезвычайных ситуаций и многом другом. В связи с этим возрастает потребность в приборах и аппаратуре ДЗЗ из космоса.

Для космической аппаратуры ДЗЗ необходимы небольшие по массе и компактные по габаритам оптические системы, но при этом они должны иметь высокое качество изображения, в общем случае близкое к дифракционному. В последние годы все более устойчивой становится тенденция к увеличению поля изображения с целью получения большей ширины полосы захвата. Возможностей традиционных оптических систем — крупногабаритных длиннофокусных линзовых объективов и зеркально-линзовых систем с центральным экранированием — для решения этой задачи уже недостаточно. Необходимы новые типы оптических систем. Поэтому в течение трех прошедших десятилетий большое внимание разработчиков как в России, так и за рубежом, уделялось особому типу систем — системам с эксцентрично расположенным полем изображения. Наибольшее распространение среди них получили трехзеркальные анастигматы, в которых отсутствует центральное экранирование, но удается получать качество

изображения, близкое к дифракционному для угловых полей до  $15^\circ$  и относительных отверстий до 1:3—1:4. В общем случае зеркала таких объективов представляют собой сложные асферические поверхности высоких порядков, зачастую смещенные в направлениях, перпендикулярных оптической оси, и повернутые вокруг этих направлений на некоторые небольшие углы. Такое построение оптической системы создает значительные трудности при ее сборке, юстировке и контроле. К тому же, изготовление внеосевых асферических зеркал является трудоемким и дорогим процессом. Соответственно, встает задача упрощения конструкции трехзеркальных объективов с эксцентрично расположенным полем изображения с целью повышения их технологичности и упрощения сборки, юстировки и контроля.

Одним из путей решения этой задачи является использование в составе таких объективов линзовых и зеркально-линзовых оптических элементов, и, в частности, зеркал Манжена. Применение этих элементов позволит уменьшить порядок используемых асферических поверхностей, а в некоторых случаях — полностью от них отказаться и тем самым избежать многих трудностей, сопряженных с их изготовлением. К тому же, это откроет возможность использования давно известных и хорошо отработанных технологических процессов изготовления, сборки, юстировки и контроля линзовых оптических систем.

Рассмотрим систему, приведенную на рис. 1. Она состоит из первого 1 и второго 3 зеркал, внеосевого мениска 2, образованного из осесимметричного мениска удалением части его, лежащей выше оптической оси, а также зеркала Манжена 4, представляющего собой внеосевой фрагмент осесимметричного зеркала Манжена. Объектив ра-



**Рис. 1. Оптическая схема трехзеркального объектива с зеркалом Манжена**

ботает следующим образом. Свет от источника излучения попадает на первое зеркало, затем, отразившись от него, проходит через мениск и претерпевает отражение на втором зеркале. Благодаря тому, что часть мениска, лежащая выше оптической оси, удалена, свет после второго зеркала проходит мимо этой линзы и попадает сразу на зеркало Манжена. Преломившись на первой поверхности, отразившись от второй и вновь преломившись на первой поверхности зеркала Манжена, свет проходит через плоскопараллельную пластину  $\delta$ , имитирующую защитное стекло приемника излучения, и фокусируется в плоскости изображения. Центры кривизны всех оптических поверхностей объектива расположены на общей оптической оси. Апертурная диафрагма  $5$  расположена на втором зеркале, причем ее центр совпадает с его вершиной. Все поверхности в системе сферические.

Использование в системе линзовых элементов позволяет отказаться от асферических поверхностей, но при этом встает задача коррекции хроматических aberrаций. В настоящей работе представлена методика расчета трехзеркального объектива с зеркалом Манжена (рис. 1), исправленного в отношении как хроматических, так и монохроматических aberrаций.

Расчет проводили в два этапа. На первом этапе рассчитываются конструктивные параметры зеркальной части объектива, исходя из условия исправления четырех монохроматических aberrаций: сферической, комы, астигматизма и кривизны поля. На втором этапе, исходя из условия исправления хроматических aberrаций, рассчитывали конструктивные параметры зеркала Манжена и одиночной линзы и уточняли параметры первого и второго зеркал.

Расчет зеркальной части объектива можно осуществить с учетом методики, изложенной в [1]. Эквивалентная схема объектива приведена на рис. 2.

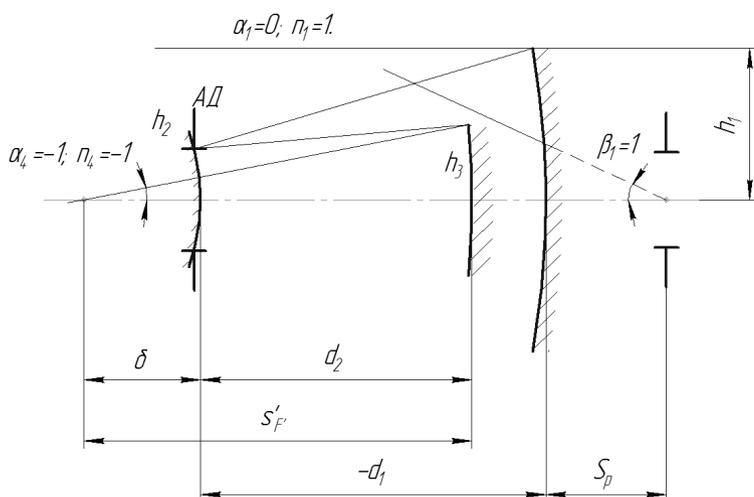


Рис. 2. Эквивалентная схема трехзеркального объектива

Условия нормировки имеют вид:

$$\alpha_1 = 0; \alpha_4 = -1; h_1 = 1; \beta_1 = 1; H_1 = s_p; I = -n_1\alpha_1(s_1 - s_p) = -1. \quad (1)$$

В соответствии с работой [2] запишем выражения для первых четырех сумм Зейделя объектива с учетом асферичности первых двух поверхностей:

$$\begin{aligned} S_I &= P_1 + B_1 + h_2(P_2 + B_2) + h_3P_3; \\ S_{II} &= s_p(P_1 + B_1) + H_2(P_2 + B_2) + H_3P_3 + W_1 + W_2 + W_3; \\ S_{III} &= s_p^2(P_1 + B_1) + \frac{H_2^2}{h_2}(P_2 + B_2) + \frac{H_3^2}{h_3}P_3 + 2s_pW_1 + 2\frac{H_2}{h_2}W_2 + \\ &+ 2\frac{H_3}{h_3}W_3 + (-\alpha_2) + \frac{1}{h_2}(\alpha_3 + \alpha_2) + \frac{1}{h_3}(1 - \alpha_3); \\ S_{IV} &= \Pi_1 + \frac{\Pi_2}{h_2} + \frac{\Pi_3}{h_3}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $\alpha_i$  — угол между первым вспомогательным лучом и оптической осью объектива;  $\beta_1$  — угол между вторым вспомогательным лучом и оптической осью на входе в объектив;  $h_i$  и  $H_i$  — соответственно приведенные к единичному фокусному расстоянию высоты первого и второго вспомогательных лучей на поверхностях;  $s_p$  и  $s_1$  — приведенные расстояния от первой поверхности объектива до входного зрачка и до предметной плоскости;  $n_1$  — показатель преломления среды на входе в систему;  $i$  — номер поверхности в системе по ходу луча,  $i = 1-3$ .

Поверхностные коэффициенты  $P_k$ ,  $W_k$ ,  $B_k$ , и  $\Pi_k$  определяются из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} P_1 &= -\frac{\alpha_2^3}{4}; \quad P_2 = \frac{(\alpha_3 - \alpha_2)^2(\alpha_3 + \alpha_2)}{4}; \quad P_3 = \frac{(\alpha_3 + 1)^2(1 - \alpha_3)}{4}; \\ W_1 &= \frac{\alpha_2^2}{2}; \quad W_2 = \frac{\alpha_3^2 - \alpha_2^2}{2}; \quad W_3 = \frac{1 - \alpha_3^2}{2}; \\ B_1 &= \frac{\alpha_2^3}{4}e_1^2; \quad B_2 = -e_2^2 \frac{(\alpha_3 + \alpha_2)^3}{4}; \\ \Pi_1 &= \alpha_2; \quad \Pi_2 = -(\alpha_3 + \alpha_2); \quad \Pi_3 = -(1 - \alpha_3). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $e_1$  и  $e_2$  — эксцентриситеты первого и второго зеркал.

Для расчета объектива необходимо решить систему уравнений, в которой первые четыре суммы Зейделя приравниваются нулю или некоторым близким к нулю значениям:

$$\begin{cases} S_I = 0; \\ S_{II} = 0; \\ S_{III} = 0; \\ S_{IV} = 0, \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} S_I = S_I^*; \\ S_{II} = S_{II}^*; \\ S_{III} = S_{III}^*; \\ S_{IV} = S_{IV}^*. \end{cases} \quad (4)$$

При решении необходимо учитывать, что в схеме соблюдаются следующие габаритные соотношения для приведенных воздушных промежутков и высот:

$$d_1 = \frac{1-h_2}{\alpha_2}; \quad d_2 = \frac{\delta+h_2}{1+\alpha_3}; \quad h_3 = \frac{h_2-\alpha_3\delta}{1+\alpha_3}, \quad (5)$$

где  $\delta$  — приведенное расстояние от второго зеркала до плоскости изображения.

Введем коэффициент  $k = d_1 / d_2$ . Решая систему (4) относительно  $k$  и  $\delta$ , определяем значения  $h_2$  и  $d_1$ , затем  $d_2$  и по формулам (5) — величины  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $h_3$ , далее — приведенные радиусы кривизны поверхностей зеркал  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ .

Поскольку в трехзеркальную систему вводятся линзовые элементы, необходимо рассмотреть вопрос коррекции хроматических аберраций. На данном этапе объектив, изображенный на рис. 1, удобно представить как систему, состоящую из четырех бесконечно тонких компонентов, разделенных между собой воздушными промежутками конечной толщины.

Как известно из литературы [3, 4], различают несколько степеней исправления хроматических аберраций: ахромат, апохромат, супер-апохромат. Для достижения ахроматической степени коррекции аберраций и исправления хроматизма увеличения в системе должны выполняться следующие условия:

$$\begin{cases} S_{I \text{ xp}} = -\sum_{i=1}^{IV} \frac{h_i^2 \varphi_i}{\nu_i} = 0; \\ S_{II \text{ xp}} = -\sum_{i=1}^{IV} \frac{H_i h_i \varphi_i}{\nu_i} = 0, \end{cases} \quad (6)$$

где  $S_{I \text{ xp}}$  и  $S_{II \text{ xp}}$  — приведенные первая и вторая хроматические суммы системы;  $h_i$  и  $H_i$  — соответственно приведенные высоты первого и второго вспомогательных лучей на линзовых компонентах;  $\varphi_i$  — приведенные оптические силы линзовых компонентов;  $\nu_i$  — средние дисперсии компонентов;  $i$  — номер компонента,  $i = I - IV$ .

Условие получения апохроматической коррекции записывается в следующем виде:

$$\begin{cases} S_{I_{xp}} = -\sum_{i=1}^{IV} \frac{h_i^2 \varphi_i}{v_i} = 0; \\ S_{I_{B.C}} = -\sum_{i=1}^{IV} \frac{h_i^2 \varphi_i \gamma_i}{v_i} = 0, \end{cases} \quad (7)$$

где  $S_{I_{B.C}}$  — приведенная первая хроматическая сумма вторичного спектра [3];  $\gamma_i$  — относительные частные дисперсии компонентов.

В нашем случае необходимо рассматривать систему в виде четырех бесконечно тонких компонентов, разделенных между собой воздушными промежутками конечной толщины. При этом удобно направить лучи справа налево, тогда условия нормировки для углов первого вспомогательного луча будут соответствовать общепринятым (см. например [2]), а, следовательно, приведенные в литературе формулы для сумм Зейделя системы, состоящей из нескольких тонких компонентов, не потребуют уточнения. Расчетная схема объектива приведена на рис. 3.

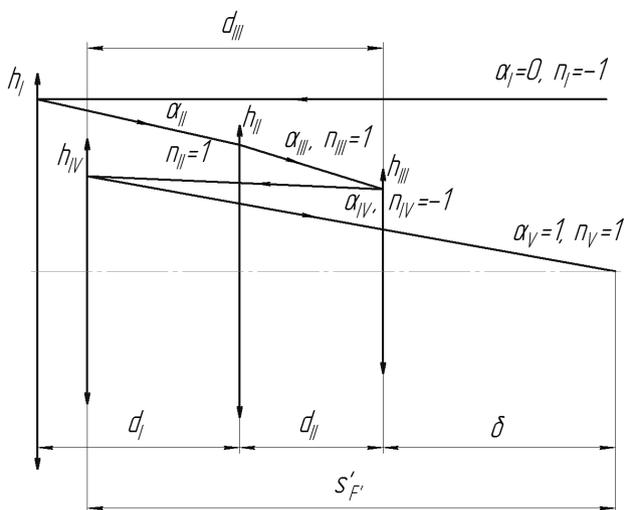


Рис. 3. Расчетная схема объектива

Четвертая сумма Зейделя системы определяется по формуле

$$S_{IV} = -\varphi_I + \varphi_{II} - \varphi_{III} - \varphi_{IV}. \quad (8)$$

Отсюда, задаваясь значениями оптических сил трех первых элементов системы, определим из этого равенства оптическую силу четвертого элемента:

$$\varphi_{IV} = -S_{IV} - \varphi_I + \varphi_{II} - \varphi_{III}. \quad (9)$$

Часто требуется, чтобы хроматические суммы не строго равнялись нулю, а принимали некоторые требуемые значения. Для рассматриваемой системы это условие имеет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{h_{II}^2 \varphi_{II}}{\nu_{II}} - \frac{h_{IV}^2 \varphi_{IV}}{\nu_{IV}} = S_{I_{xp}}^*; \\ -\frac{H_{II} h_{II} \varphi_{II}}{\nu_{II}} - \frac{H_{IV} h_{IV} \varphi_{IV}}{\nu_{IV}} = S_{I_{xp}}^*; \\ -\frac{h_{II}^2 \varphi_{II} \gamma_{II}}{\nu_{II}} - \frac{h_{IV}^2 \varphi_{IV} \gamma_{IV}}{\nu_{IV}} = S_{I_{в.с.}}^*. \end{array} \right.$$

Решая данную систему уравнений, можно получить формулы для определения высот первого вспомогательного луча на линзовых компонентах системы:

$$\begin{aligned} h_{IV} &= \sqrt{\frac{\nu_{IV}(S_{I_{в.с.}} - \gamma_{II} S_{I_{xp}})}{\varphi_{IV}(\gamma_{II} - \gamma_{IV})}}; \\ h_{II} &= \pm \sqrt{-\left(S_{I_{xp}} + \frac{h_{IV}^2 \varphi_{IV}}{\nu_{IV}}\right) \frac{\nu_{II}}{\varphi_{II}}}. \end{aligned} \quad (11)$$

Из уравнения масштаба находим

$$h_{III} = \frac{1 - \varphi_I - h_{II} \varphi_{II} - h_{IV} \varphi_{IV}}{\varphi_{III}}. \quad (12)$$

Теперь имеются все данные, необходимые для вычисления углов первого вспомогательного луча:

$$\begin{aligned} \alpha_{II} &= \frac{h_I \varphi_I + \alpha_I n_I}{n_{II}} = \varphi_I; \\ \alpha_{III} &= \frac{h_{II} \varphi_{II} + \alpha_{II} n_{II}}{n_{III}} = h_{II} \varphi_{II} + \alpha_{II}; \\ \alpha_{IV} &= \frac{\alpha_V n_V - h_{IV} \varphi_{IV}}{n_{IV}} = h_{IV} \varphi_{IV} - 1. \end{aligned} \quad (13)$$

Воздушные промежутки в системе можно рассчитать по формулам

$$d_I = \frac{1 - h_{II}}{\alpha_{II}}; \quad d_{II} = \frac{h_{II} - h_{III}}{\alpha_{III}}; \quad d_{III} = \frac{h_{III} - h_{IV}}{\alpha_{IV}}. \quad (14)$$

Высоты второго вспомогательного луча определим, исходя из условия нормировки  $H_I = s_p$ . Одним из основных требований к системе является размещение апертурной диафрагмы на третьем компоненте, т. е. втором зеркале, поскольку в этом случае оно получается осесимметричным и круглым, а габариты первого и третьего зеркал минимальны. Тогда

$$\begin{aligned} H_{III} &= 0; \quad \beta_{II} = -1 + H_I \varphi_I; \\ H_{II} &= H_I - d_I \beta_{II}; \quad \beta_{III} = \frac{H_{II}}{d_{II}}; \quad \beta_{IV} = -\beta_{III}; \\ H_{IV} &= -\frac{\nu_{IV}}{h_{IV} \varphi_{IV}} \left( S_{II \text{xp}} + \frac{H_{II} h_{II} \varphi_{II}}{\nu_{II}} \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Найдем параметры  $P$  и  $W$  нелиновых компонентов:

$$\begin{aligned} P_I &= \frac{\alpha_{II}^3}{4}; \quad W_I = \frac{\alpha_{II}^2}{2}; \\ P_{III} &= -\frac{(\alpha_{IV} - \alpha_{III})^2 (\alpha_{IV} + \alpha_{III})}{4}; \quad W_{III} = \frac{\alpha_{IV}^2 - \alpha_{III}^2}{2}. \end{aligned} \quad (16)$$

Для определения параметров  $P$  и  $W$  линзовых компонентов необходимо решить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} P_I + h_{II} P_{II} + h_{III} P_{III} + h_{IV} P_{IV} = S_I^*; \\ H_I P_I + H_{II} P_{II} + H_{IV} P_{IV} - W_I - W_{II} - W_{III} - W_{IV} = S_{II}^*, \end{cases} \quad (17)$$

где  $S_I^*$ ,  $S_{II}^*$ ,  $S_{III}^*$  — требуемые значения первых трех сумм Зейделя. Неизвестными в этой системе являются  $P_{II}$ ,  $W_{II}$  и  $P_{IV}$ ,  $W_{IV}$ .

Параметры  $P_{II}$  и  $W_{II}$  одиночной тонкой линзы связаны между собой квадратичной зависимостью:

$$P_{II} = Q_{11} W_{II}^2 + Q_{12} W_{II} + Q_{13}, \quad (18)$$

где

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{n(n+2)}{(\alpha_{III} - \alpha_{II})(n+1)^2}; \quad Q_{12} = \frac{-n(\alpha_{II} + \alpha_{III})}{(n+1)^2}; \\ Q_{13} &= \frac{n^2(\alpha_{II} + \alpha_{III})(\alpha_{II}^2 - \alpha_{III}^2)(n^2 + n + 1)}{(n^2 - 1)^2} + \frac{n^2(\alpha_{III}^3 - \alpha_{II}^3)}{(n-1)^2}. \end{aligned} \quad (19)$$

Здесь  $n$  — показатель преломления линзы.

Параметры  $P_{IV}$  и  $W_{IV}$  одиночного тонкого зеркала Манжена связаны следующим соотношением:

$$P_{IV} = A_5 W_{IV}^3 + B_5 W_{IV}^2 + C_5 W_{IV} + D_5, \quad (20)$$

где

$$\begin{aligned} A_5 &= \frac{A_3}{V_1^3}; \quad B_5 = \frac{B_3}{V_1^2} - \frac{3V_2 A_3}{V_1^3}; \quad C_5 = \frac{3V_2^2 A_3}{V_1^3} - \frac{2V_2 B_3}{V_1^2} + \frac{C_3}{V_1}; \\ D_5 &= -\frac{V_2^3 A_3}{V_1^3} + \frac{V_2^2 B_3}{V_1^2} - \frac{V_2 C_3}{V_1} + D_3; \quad A_3 = -\frac{2n_M}{(1-n_M)^2}; \\ B_3 &= -\frac{n_M}{(1-n_M)^2} (3k - (n_M + 2)(\alpha_{IV} + \alpha_V)); \\ C_3 &= \frac{-n_M}{(1-n_M)^2} (\alpha_{IV}^2 (1 + 2n_M) + (\alpha_V - k)(\alpha_V (1 + 2n_M) + 3k)) + \frac{n_M k^2}{2}; \quad (21) \\ D_3 &= -\frac{n_M}{(1-n_M)^2} (-\alpha_{IV}^3 n_M + (\alpha_V - k)^2 (k - \alpha_V n_M)) + \frac{n_M k^3}{4}; \\ V_1 &= \frac{1 + n_M}{n_M} (\alpha_{IV} - \alpha_V); \\ V_2 &= \frac{(1 + n_M)(\alpha_V - \alpha_{IV})}{1 - n_M} \left( \frac{\alpha_V}{n_M} - \frac{\alpha_V - \alpha_{IV}}{2n_M^2} - \frac{n_M}{1 + n_M} (\alpha_V + \alpha_{IV}) \right); \\ k &= \frac{\alpha_V - \alpha_{IV}}{n_M}. \end{aligned}$$

Здесь  $n_M$  — показатель преломления зеркала Манжена.

Дополняя условиями (18) и (20) систему (17), получим систему из четырех уравнений с четырьмя неизвестными:

$$\begin{cases} P_I + h_{II} P_{II} + h_{III} P_{III} + h_{IV} P_{IV} = S_I^*; \\ H_I P_I + H_{II} P_{II} + H_{IV} P_{IV} - W_I - W_{II} - W_{III} - W_{IV} = S_{II}^*; \\ P_{II} = Q_{11} W_{II}^2 + Q_{12} W_{II} + Q_{13}; \\ P_{IV} = A_5 W_{IV}^3 + B_5 W_{IV}^2 + C_5 W_{IV} + D_5, \end{cases} \quad (22)$$

которая сводится к уравнению шестой степени относительно  $W_{IV}$ :

$$A_6 W_{IV}^6 + B_6 W_{IV}^5 + C_6 W_{IV}^4 + D_6 W_{IV}^3 + E_6 W_{IV}^2 + F_6 W_{IV} + G_6 = 0, \quad (23)$$

где

$$A_6 = \frac{Q_{11} A_5^2}{T_3 T_1^2}; \quad B_6 = \frac{2Q_{11} A_5 B_5}{T_3 T_1^2}; \quad C_6 = \frac{Q_{11} (2A_5 (C_5 - T_1) + B_5^2)}{T_3 T_1^2}. \quad (24)$$

Решая уравнение (23) относительно  $W_{IV}$ , получим, в общем случае, шесть решений, среди которых могут быть как действительные, так и комплексные. Для действительных решений параметры  $P_{II}$ ,  $W_{II}$  и  $P_{IV}$  определяются по формулам:

$$\begin{aligned} W_{II} &= \frac{1}{T_1} (A_5 W_{IV}^3 + B_5 W_{IV}^2 + (C_5 - T_1) W_{IV} + D_5 - T_2); \\ P_{II} &= (S_1^* - P_1 - h_{III} P_{III} - h_{IV} P_{IV}) / h_{II}; \\ P_{IV} &= T_1 (W_{II} + W_{IV}) + T_2. \end{aligned} \quad (25)$$

Здесь

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{h_{II}}{h_{II} H_{IV} - H_{II} h_{IV}}; \\ T_2 &= \frac{h_{II} S_{II}^* - h_{II} H_I P_1 - H_{II} S_I^* + H_{II} P_1 + H_{II} h_{III} P_{III} + h_{II} W_I + h_{II} W_{III}}{h_{II} H_{IV} - H_{II} h_{IV}}; \\ T_3 &= -\frac{h_{II}}{h_{II} H_{IV} - H_{II} h_{IV}}; \quad T_4 = \frac{S_1^* - P_1 - h_{III} P_{III}}{h_{II}} - \frac{h_{IV}}{h_{II}} T_2. \end{aligned} \quad (26)$$

Для расчета радиусов кривизны одиночной линзы необходимо вычислить угол преломления первого вспомогательного луча внутри линзы:

$$\alpha_{II_{BH}} = \frac{W_{II} (n - 1) - n (\alpha_{III}^2 - \alpha_{II}^2)}{(\alpha_{II} - \alpha_{III}) (n + 1)}. \quad (27)$$

Для расчета определения радиусов кривизны зеркала Манжена вычислим углы преломления первого вспомогательного луча:

$$\begin{aligned} \alpha_{IV_{BH}} &= \frac{W_{IV} - V_2}{V_1}; \\ \alpha_{V_{BH}} &= \alpha_{IV_{BH}} + \frac{\alpha_V - \alpha_{IV}}{n_M}. \end{aligned} \quad (28)$$

Зная углы  $\alpha_{II}$ ,  $\alpha_{II_{BH}}$ ,  $\alpha_{III}$ ,  $\alpha_{IV}$ ,  $\alpha_{IV_{BH}}$ ,  $\alpha_{V_{BH}}$ ,  $\alpha_V$ , можно найти радиусы поверхностей одиночной линзы и зеркала Манжена.

С помощью данной методики было рассчитано несколько вариантов объективов, отличающихся расположением и количеством использованных зеркал Манжена [5].

В таблице приведены конструктивные параметры объектива, изображенного на рис. 1.

## Конструктивные параметры объектива с зеркалом Манжена

Радиус, мм	Толщина, мм	Показатель преломления
$r_1 = -165,711$	—	1
$r_2 = 18,862$	$d_1 = -35,19$	-1
$r_3 = 19,134$	$d_2 = -0,92$	ТК14
$r_4 = -59,359$	$d_3 = -11,85$	-1
$r_5 = -84,270$	$d_4 = 45,81$	1
$r_6 = -88,270$	$d_5 = 1,60$	ЛК6
$r_7 = -84,270$	$d_6 = -1,60$	ЛК6
$r_8 = \infty$	$d_7 = -46,30$	-1
$r_9 = \infty$	$d_8 = -0,74$	ЛК6
	$s'_{\text{ПНИ}} = -9,259$	-1

Характеристики объектива:

фокусное расстояние 100 мм;

относительное отверстие 1:10,8;

угловое поле в меридиональном направлении  $\omega_{y0} = 7,4^\circ$ ,  $\omega_{y\max} = 7,85^\circ$ ;

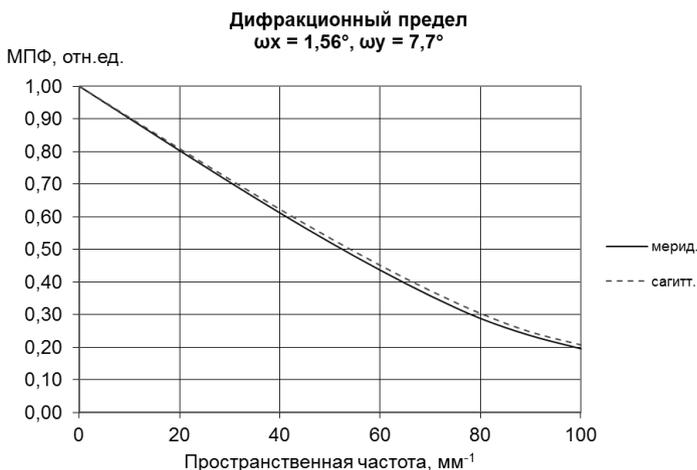
угловое поле в сагиттальном направлении  $2\omega_x = 3,12^\circ$ ;

рабочий спектральный диапазон  $\Delta\lambda = 400 \dots 1\,000$  нм.

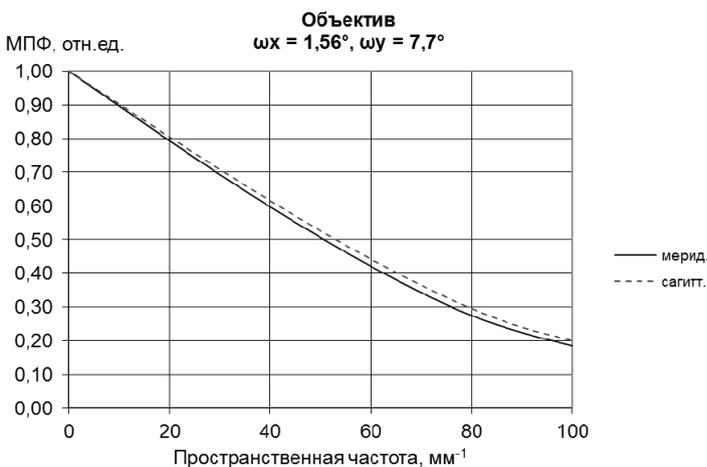
Аберрации объектива для длины волны  $\lambda = 656,3$  нм составляют:

- поперечная сферическая аберрация широких наклонных пучков в пределах всего углового поля — не более 0,005 мм;
- меридиональный астигматический отрезок — не более 0,072 мм;
- сагиттальный астигматический отрезок — не более 0,046 мм;
- дисторсия — не более 0,8%;
- хроматизм положения в спектральном диапазоне 0,4...1,0 мкм — не более 0,064 мм.

На рисунке 4, а приведена полихроматическая модуляционная передаточная функция (МПФ) дифракционно ограниченной системы с параметрами, аналогичными параметрам рассматриваемого объектива, а на рис. 4, б — полихроматическая МПФ объектива для крайней точки поля в пространстве изображений. Видно, что качество изображения оптической системы близко к дифракционному.



а



б

**Рис. 4. Полихроматическая МПФ дифракционно ограниченной системы и объектива по схеме, представленной на рис. 1**

Основное преимущество данной методики состоит в том, что по ней можно рассчитать зеркально-линзовый объектив с внеосевым полем изображения, свободный от асферических поверхностей и более технологичный при производстве. К тому же, рассчитанные по этой методике объективы обладают широкими возможностями модернизации, поскольку можно заменить не только одну зеркальную поверхность на зеркало Манжена, но и все три. Это добавляет в схему дополнительные коррекционные параметры и позволяет получать оптические системы, способные удовлетворить самым жестким требованиям к качеству изображения и габаритам. Однако следует помнить, что наличие в системе линзовых элементов, помимо необходимости коррекции хрома-

тизма, поднимает целый ряд вопросов, связанных со сложностями, возникающими при разработке конструкции объектива: как оптические, так и конструкционные материалы подвержены температурному расширению, а показатель преломления оптических материалов зависит от температуры и атмосферного давления. Поэтому в случае применения системы с зеркалами Манжена в реальной аппаратуре ДЗЗ необходимо проводить подробный термобарический анализ схемы с учетом предполагаемой конструкции объектива.

Таким образом, предложена методика расчета зеркальных и зеркально-линзовых оптических систем, основанных на трехзеркальной схеме с эксцентрично расположенным полем изображения, особенностью которых является использование в качестве коррекционных элементов одиночных линз и зеркал Манжена. Разработанная методика позволила создать ряд новых схемных решений центрированных зеркально-линзовых объективов, которые отличаются относительной простотой изготовления, повышенной технологичностью, удобством сборки, юстировки и контроля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Токарев А.А. Длиннофокусные объективы с эксцентрично расположенным полем изображения // Известия вузов. Сер. Приборостроение. 1988. Т. XXXI. № 7. С. 74—79.
2. Заказнов Н.П., Кирюшкин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1992. 448 с.
3. Прикладная оптика / А.С. Дубовик, М.И. Апенко, Г.В. Дурейко и др. М.: Недра, 1982. 612 с.
4. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1975. 640 с.
5. Пат. России 2461030 Российская Федерация, МПК G02В 17/08. Зеркально-линзовый объектив (вариант) / С.А. Архипов, В.И. Заварзин, В.В. Заварзина, С.О. Кравченко, С.А. Морозов, Б.Н. Сенник; заявитель и патентообладатель ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева». № 201111978/28; заявл. 18.05.2011; опубл. 10.09.2012., Бюл. № 25. 14 с.

Статья поступила в редакцию 16.10.2012