

Методика расчета компактных внеосевых трехзеркальных объективов с зеркалами Манжена

© В.И. Заварзин, С.О. Кравченко, С.А. Морозов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Для активного развития космической аппаратуры дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) требуется создать компактные оптические системы с повышенными характеристиками качества изображения. Одним из основных условий, определяющих облик современных приборов ДЗЗ, является их размещение на малом космическом аппарате, что накладывает жесткие массогабаритные ограничения при проектировании, в том числе и объективов. Выбор и обоснование оптической схемы объектива, а также его габаритно-абберационный расчет являются важными этапами проектирования аппаратуры. В статье рассмотрена методика такого расчета для трехзеркальных оптических систем с зеркалами Манжена и эксцентрично расположенным полем изображения. В этом поле проводится определение конструктивных параметров, продольных и поперечных габаритов системы исходя из условий не только исправления хроматических и монохроматических aberrаций и получения требуемого качества изображения, но и соблюдения некоторых заранее заданных соотношений между параметрами, характеризующими габариты системы.

На начальном этапе проектирования, задаваясь воздушными промежутками объектива или соотношениями между ними, оптическими силами элементов, необходимо решить задачу исправления хроматической aberrации положения и вторичного спектра, а затем, на втором этапе, исправить четыре монохроматические aberrации. Для коррекции хроматических aberrаций следует решить систему уравнений, в которой первая хроматическая сумма и сумма вторичного спектра приравняются к некоторым наперед заданным значениям. Для исправления четырех монохроматических aberrаций, сферической, комы и астигматизма решают систему уравнений, в которой первые четыре суммы Зейделя приравняются к нулю или некоторым близким к нулю значениям. При последовательном решении данных систем уравнений определяют параметры P , W и C каждого компонента схемы, а через них – конструктивные параметры для дальнейшей оптимизации в оптических САПР. Применение разработанной методики в практике создания оптических систем позволяет расширить количество анализируемых схем, повысить качество изображения окончательного варианта и ускорить процесс проектирования аппаратуры ДЗЗ.

Ключевые слова: *зеркальные объективы, зеркально-линзовые объективы, трехзеркальные объективы, зеркала Манжена, aberrации, габаритные соотношения.*

Введение. В целях активного развития аппаратуры дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) необходимо создать компактные оптические системы с повышенными характеристиками качества изобра-

ражения. Одним из основных условий, определяющих облик современных приборов ДЗЗ, является их размещение на малом космическом аппарате, что накладывает жесткие массогабаритные ограничения при проектировании, в том числе и объективов.

В настоящее время актуальной задачей является разработка съемочной аппаратуры среднего пространственного разрешения (размер проекции пикселя на поверхность Земли составляет 2...10 м) в целях создания топографической основы для обновления цифровых топографических карт масштабов 1:10 000—1:200 000. Подобную аппаратуру строят по схеме объектив + приемник изображения, реализуют схему «щелевой» съемки, когда сканирование поверхности Земли осуществляется вдоль направления полета космического аппарата, а объектив формирует изображение подстилающей поверхности на светочувствительных элементах приемника.

Выбор и обоснование оптической схемы объектива, а также его габаритно-абберационный расчет являются важными этапами проектирования аппаратуры ДЗЗ. В результате такого расчета на основе требований к качеству оптического изображения и заранее заданных габаритных ограничений определяют конструктивные параметры, продольные и поперечные габариты системы.

Постановка задачи. В работе [1] приведена методика расчета параметров трехзеркальной схемы с зеркалами Манжена и эксцентрично расположенным полем изображения для аппаратуры среднего разрешения (рис. 1) исходя из требований исправления хроматических и монохроматических аббер-

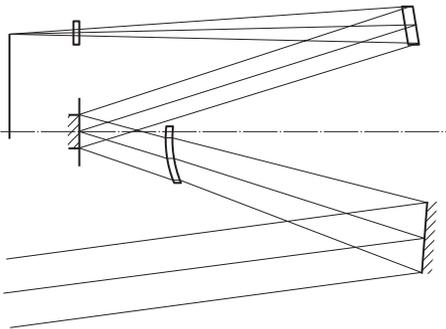


Рис. 1. Оптическая схема зеркально-линзового объектива

раций и монохроматических аббераций и обеспечения высокого качества изображения. Однако условие получения заранее заданных соотношений между параметрами, характеризующими габариты системы, в явном виде выражено не было, поэтому рассмотрим методику абберационной коррекции оптической системы с требуемыми габаритными соотношениями.

На начальном этапе проектирования, задавая воздушные промежутки объектива и оптические силы элементов, необходимо решить задачу исправления хроматической абберации положения и вторичного спектра, а затем, на втором этапе, исправить четыре монохроматические абберации.

Методика решения задачи. Исправление хроматических аббераций. Рассматриваемую оптическую систему удобно представить как систему, состоящую из тонких компонентов, которые разде-

лены между собой воздушными промежутками конечной толщины. На рис. 2 приведена эквивалентная схема объектива. Ход лучей справа налево использован для того, чтобы можно было воспользоваться общепринятыми [2] условиями нормировки первого и второго вспомогательных лучей, не прибегая к уточнению формул сумм Зейделя.

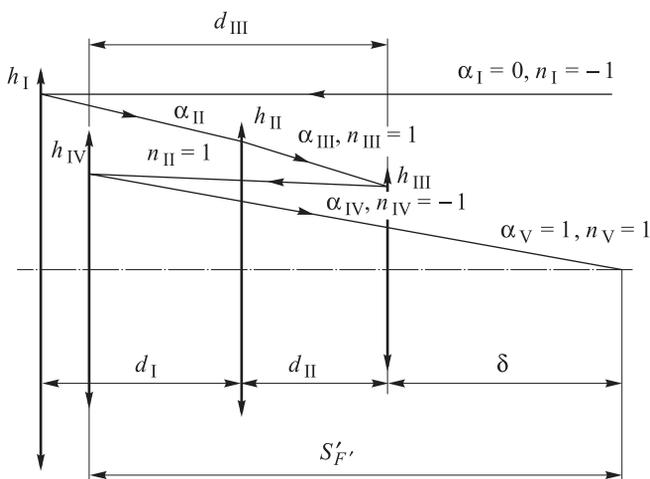


Рис. 2. Эквивалентная схема объектива

Для исследования влияния габаритных соотношений в рассматриваемой системе на качество изображения введем следующие обозначения:

$$k_1 = \frac{d_{II}}{d_I}; \quad k_2 = \frac{d_{III}}{d_I + d_{II}}, \quad (1)$$

где d_I , d_{II} и d_{III} — приведенные воздушные промежутки между компонентами объектива (см. рис. 2).

Для упрощения рассуждений будем считать, что материалы линзовых компонентов заданы и их показатели преломления и коэффициенты дисперсии известны. Также зададимся приведенными оптическими силами второго и четвертого компонентов Φ_{II} , Φ_{IV} и высотой первого вспомогательного луча на последнем компоненте, согласно условиям нормировки, равной заднему фокальному отрезку объектива, $h_{IV} = \overline{s'_F} = s'_F / f'$. Тогда сразу можем определить угол первого вспомогательного луча α_{IV} между третьим и четвертым компонентами схемы:

$$\alpha_{IV} = h_{IV} \Phi_{IV} - 1. \quad (2)$$

Для получения апохроматической степени коррекции aberrаций, согласно [3, 4], необходимо решить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} S_{I_{xp}} = 0; \\ S_{I_{в.с}} = 0, \end{cases} \text{ или } \begin{cases} S_{I_{xp}} = S_{I_{xp}}^*; \\ S_{I_{в.с}} = S_{I_{в.с}}^*, \end{cases} \quad (3)$$

где $S_{I_{xp}}^*$ и $S_{I_{в.с}}^*$ — некоторые заранее заданные значения соответственно приведенных первой хроматической суммы системы и первой хроматической суммы вторичного спектра. В рассматриваемой системе источниками хроматизма являются два линзовых элемента: одиночная линза и зеркало Манжена. Поэтому хроматические суммы всего объектива определяются сложением сумм этих компонентов $S_{I_{xp.л}}$ и $S_{I_{xp.м}}$:

$$S_{I_{xp}} = S_{I_{xp.л}} + S_{I_{xp.м}}; \quad S_{I_{в.с}} = S_{I_{в.с.л}} + S_{I_{в.с.м}}. \quad (4)$$

Как известно [3], первая хроматическая сумма и первая хроматическая сумма вторичного спектра одиночной тонкой линзы записываются в виде

$$S_{I_{xp.л}} = -\frac{h_{II}^2 \varphi_{II}}{\nu_{II}}; \quad S_{I_{в.с.л}} = -\frac{h_{II}^2 \varphi_{II} \gamma_{II}}{\nu_{II}}. \quad (5)$$

Для зеркала Манжена эти суммы определяются выражениями

$$\begin{aligned} S_{I_{xp.м}} &= -\frac{h_{IV}^2 \varphi_{IV}}{\nu_{IV}} + \frac{h_{IV}}{\nu_{IV}} \left(2\alpha_{IV_{вн}} + \frac{\alpha_{в} - \alpha_{IV}}{n_{IV}} \right); \\ S_{I_{в.с.м}} &= -\frac{h_{IV}^2 \varphi_{IV} \gamma_{IV}}{\nu_{IV}} + \frac{h_{IV} \gamma_{IV}}{\nu_{IV}} \left(2\alpha_{IV_{вн}} + \frac{\alpha_{в} - \alpha_{IV}}{n_{IV}} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

В формулах (5) и (6) h_i и H_i — приведенные высоты первого и второго вспомогательных лучей на линзовых компонентах соответственно; φ_i — приведенные оптические силы; ν_i — средние дисперсии; γ_i — относительные частные дисперсии; $i = II, IV$ — номера компонентов; α_{IV} , $\alpha_{в}$ — углы первого вспомогательного луча соответственно на входе и выходе из зеркала Манжена; $\alpha_{IV_{вн}}$ — угол первого вспомогательного луча в зеркале Манжена до отражения от зеркальной поверхности; n_{IV} — показатель преломления материала зеркала Манжена.

Тогда систему уравнений (3) можно записать в виде

$$\begin{cases} -\frac{h_{II}^2 \varphi_{II}}{\nu_{II}} - \frac{h_{IV}^2 \varphi_{IV}}{\nu_{IV}} + \frac{h_{IV}}{\nu_{IV}} \left(2\alpha_{IV_{вн}} + \frac{\alpha_{в} - \alpha_{IV}}{n_{IV}} \right) = S_{I_{xp}}^*; \\ -\frac{h_{II}^2 \varphi_{II} \gamma_{II}}{\nu_{II}} - \frac{h_{IV}^2 \varphi_{IV} \gamma_{IV}}{\nu_{IV}} + \frac{h_{IV} \gamma_{IV}}{\nu_{IV}} \left(2\alpha_{IV_{вн}} + \frac{\alpha_{в} - \alpha_{IV}}{n_{IV}} \right) = S_{I_{в.с}}^*. \end{cases} \quad (7)$$

Неизвестными величинами здесь являются $\alpha_{IV\text{BH}}$ и h_{II} , поэтому после преобразований можно получить следующие выражения:

$$\alpha_{IV\text{BH}} = \frac{S_{I\text{B.C}}^* - \gamma_{II} S_{I\text{XP}}^* + \frac{h_{IV}^2 \varphi_{IV} (\gamma_{IV} - \gamma_{II})}{v_{IV}} - \frac{h_{IV} (\gamma_{IV} - \gamma_{II}) (\alpha_V - \alpha_{IV})}{v_{IV} n_{IV}}}{\frac{2h_{IV}}{v_{IV}} (\gamma_{IV} - \gamma_{II})}; \quad (8)$$

$$h_{II} = \pm \sqrt{\frac{v_{II}}{\varphi_{II}} \left[-S_{I\text{XP}}^* - \frac{h_{IV}^2 \varphi_{IV}}{v_{IV}} + \frac{h_{IV}}{v_{IV}} \left(2\alpha_{IV\text{BH}} + \frac{\alpha_V - \alpha_{IV}}{n_{IV}} \right) \right]}. \quad (9)$$

Углы первого вспомогательного луча внутри зеркала Манжена связаны между собой следующим соотношением:

$$\alpha_{V\text{BH}} = \alpha_{IV\text{BH}} + \frac{\alpha_V - \alpha_{IV}}{n_{IV}}, \quad (10)$$

где $\alpha_{V\text{BH}}$ — угол первого вспомогательного луча после отражения от зеркальной поверхности.

Определив углы α_{IV} , $\alpha_{IV\text{BH}}$, $\alpha_{V\text{BH}}$, α_V , получим все величины, необходимые для расчета конструктивных параметров зеркала Манжена. Зная $\alpha_{IV\text{BH}}$, можно найти параметры P_{IV} и W_{IV} этого элемента:

$$\begin{aligned} P_{IV} &= A_3 \alpha_{IV\text{BH}}^3 + B_3 \alpha_{IV\text{BH}}^2 + C_3 \alpha_{IV\text{BH}} + D_3; \\ W_{IV} &= \alpha_{IV\text{BH}} V_1 + V_2. \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь

$$\begin{aligned} A_3 &= -\frac{2n_{IV}}{(1-n_{IV})^2}; \quad B_3 = -\frac{n_{IV}}{(1-n_{IV})^2} [3k - (n_m + 2)(\alpha_{IV} + \alpha_V)]; \\ C_3 &= \frac{-n_{IV} \{ \alpha_{IV}^2 (1 + 2n_{IV}) + (\alpha_V - k) [\alpha_V (1 + 2n_{IV}) + 3k] \}}{(1-n_{IV})^2} + \frac{n_{IV} k^2}{2}; \\ D_3 &= -\frac{n_{IV}}{(1-n_{IV})^2} \left[-\alpha_{IV}^3 n_{IV} + (\alpha_V - k)^2 (k - \alpha_V n_{IV}) \right] + \frac{n_{IV} k^3}{4}; \\ V_1 &= \frac{1+n_{IV}}{n_{IV}} (\alpha_{IV} - \alpha_V); \quad V_2 = \frac{(1+n_{IV})(\alpha_V - \alpha_{IV})}{1-n_{IV}} \times \\ &\times \left[\frac{\alpha_V}{n_{IV}} - \frac{\alpha_V - \alpha_{IV}}{2n_{IV}^2} - \frac{n_{IV}}{1+n_{IV}} (\alpha_V + \alpha_{IV}) \right]; \quad k = \frac{\alpha_V - \alpha_{IV}}{n_{IV}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Получив из выражения (9) h_{II} можем последовательно определить расстояния между компонентами системы и высоту h_{III} первого вспомогательного луча на втором зеркале:

$$d_1 = \frac{h_{II} - h_{IV} - k_1(1 - h_{II})}{k_1 h_{II} \varphi_{II} + k_2(1 + k_1)(h_{IV} \varphi_{IV} - 1)}; \quad (13)$$

$$h_{III} = d_1 k_2 (1 + k_1) (h_{IV} \varphi_{IV} - 1) + h_{IV}; \quad (14)$$

$$d_{II} = d_1 k_1; \quad (15)$$

$$d_{III} = d_1 k_2 (1 + k_1). \quad (16)$$

Используя уравнение масштаба, рассчитаем приведенную оптическую силу первого компонента

$$\varphi_I = \frac{1 + S_{IV}^* h_{III} - \varphi_{II}(h_{II} + h_{III}) - \varphi_{IV}(h_{IV} - h_{III})}{1 - h_{III}}. \quad (17)$$

Тогда из условий нормировки следует, что угол α_{II} первого вспомогательного луча после первого зеркала

$$\alpha_{II} = \varphi_I. \quad (18)$$

Из условия исправления кривизны Петцваля находим приведенную оптическую силу третьего компонента

$$\varphi_{III} = -S_{IV}^* - \varphi_I + \varphi_{II} - \varphi_{IV}. \quad (19)$$

Угол α_{III} первого вспомогательного луча с оптической осью после преломления на одиночной линзе определяется формулой

$$\alpha_{III} = h_{II} \varphi_{II} + \varphi_I. \quad (20)$$

Теперь имеем все величины, необходимые для расчета параметров P и W зеркальных элементов:

$$P_I = \frac{\alpha_{II}^3}{4}; \quad W_I = \frac{\alpha_{II}^2}{2}; \quad (21)$$

$$P_{III} = -\frac{(\alpha_{IV} - \alpha_{III})^2 (\alpha_{IV} + \alpha_{III})}{4}; \quad W_{III} = \frac{\alpha_{IV}^2 - \alpha_{III}^2}{2}.$$

Методика решения задачи. Исправление монохроматических аберраций. Для исправления трех первых монохроматических аберраций, сферической, комы и астигматизма в общем случае необходимо решить систему уравнений, в которой первые три суммы Зейделя приравняются к нулю или некоторым близким к нулю значениям:

$$\begin{cases} S_I = 0; \\ S_{II} = 0; \\ S_{III} = 0, \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} S_I = S_I^*; \\ S_{II} = S_{II}^*; \\ S_{III} = S_{III}^*. \end{cases} \quad (22)$$

Кроме того, при решении системы необходимо учитывать, что параметры P_{II} и W_{II} одиночной тонкой линзы связаны между собой следующим соотношением:

$$P_{II} = Q_{11}W_{II}^2 + Q_{12}W_{II} + Q_{13}, \quad (23)$$

где

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{n_{II}(n_{II} + 2)}{(\alpha_{III} - \alpha_{II})(n_{II} + 1)^2}, \\ Q_{12} &= \frac{-n_{II}(\alpha_{II} + \alpha_{III})}{(n_{II} + 1)^2}, \\ Q_{13} &= \frac{n_{II}^2(\alpha_{II} + \alpha_{III})(\alpha_{II}^2 - \alpha_{III}^2)(n_{II}^2 + n_{II} + 1)}{(n_{II}^2 - 1)^2} + \frac{n_{II}^2(\alpha_{III}^3 - \alpha_{II}^3)}{(n_{II} - 1)^2}. \end{aligned} \quad (24)$$

Здесь n_{II} — показатель преломления материала линзы.

Помимо этого, существует также взаимосвязь между высотами второго вспомогательного луча на первом H_I и втором H_{II} компонентах системы:

$$H_{II} = H_I(1 - d_1\varphi_1) + d_1. \quad (25)$$

Дополняя (22) уравнениями (23) и (25), а также раскрывая выражения для сумм Зейделя, получим в итоге систему, решение которой обеспечит коррекцию монохроматических aberrаций в объективе:

$$\begin{cases} P_I + h_{II}P_{II} + h_{III}P_{III} + h_{IV}P_{IV} = S_I^*; \\ H_I P_I + H_{II}P_{II} + H_{IV}P_{IV} - W_I - W_{II} - W_{III} - W_{IV} = S_{II}^*; \\ H_I^2 P_I + \frac{H_{II}^2}{h_{II}} P_{II} + \frac{H_{IV}^2}{h_{IV}} P_{IV} - 2H_I W_I - 2\frac{H_{II}}{h_{II}} W_{II} - 2\frac{H_{IV}}{h_{IV}} W_{IV} + \\ + \varphi_I + \varphi_{II} + \varphi_{III} + \varphi_{IV} = S_{III}^*; \\ P_{II} = Q_{11}W_{II}^2 + Q_{12}W_{II} + Q_{13}; \\ H_{II} = H_I(1 - d_1\varphi_1) + d_1. \end{cases} \quad (26)$$

Неизвестными величинами являются параметры P_{II} и W_{II} одиночной линзы, а также высоты H_I , H_{II} , и H_{IV} второго вспомога-

тельного луча на соответствующих компонентах системы. Данную систему уравнений можно решить аналитически с помощью последовательных подстановок. В итоге получаем расчетные формулы:

$$W_{II} = \frac{-Q_{12} \pm \sqrt{Q_{12}^2 - 4Q_{11}(Q_{13} - P_{II})}}{2Q_{11}}; \quad (27)$$

$$P_{II} = Q_{11}W_{II}^2 + Q_{12}W_{II} + Q_{13};$$

$$H_I = \frac{-B_8 \pm \sqrt{B_8^2 - 4A_8C_8}}{2A_8}; \quad (28)$$

$$H_{II} = H_I(1 - d_1\varphi_1) + d_1;$$

$$H_{IV} = A_7H_I + B_7. \quad (29)$$

Здесь

$$A_7 = \frac{1}{P_{IV}}(d_1\varphi_1P_{II} - P_I - P_{II});$$

$$B_7 = \frac{1}{P_{IV}}(S_{II}^* + W_I + W_{II} + W_{III} + W_{IV} - d_1P_{II});$$

$$A_8 = P_I + \frac{P_{II}(1 - d_1\varphi_1)^2}{h_{II}} + \frac{A_7^2P_{IV}}{h_{IV}}; \quad (30)$$

$$B_8 = \frac{2}{h_{II}}(1 - d_1\varphi_1)(d_1P_{II} - W_{II}) + \frac{2A_7}{h_{IV}}(B_7P_{IV} - W_{IV}) - 2W_I;$$

$$C_8 = \frac{1}{h_{II}}(d_1^2P_{II} - 2d_1W_{II}) + \frac{1}{h_{IV}}(B_7^2P_{IV} - 2B_7W_{IV}) + \varphi_I + \varphi_{II} + \varphi_{III} + \varphi_{IV} - S_{III}^*.$$

Имея параметр W_{II} и углы первого вспомогательного луча на входе и выходе из одиночной линзы α_{II} и α_{III} , определяем угол внутри линзы

$$\alpha_{II \text{ вл}} = \frac{W_{II} \left(1 - \frac{1}{n}\right) - \alpha_{III}^2 + \alpha_{II}^2}{(\alpha_{II} - \alpha_{III}) \left(1 + \frac{1}{n}\right)}. \quad (31)$$

Методика позволяет осуществлять расчет систем, в которых зеркалом Манжена является не только четвертый по ходу луча оптический элемент, но и любой другой зеркальный компонент. На рис. 3

Для волны длиной $\lambda = 656,3$ нм аберрации объектива составляют не более:

0,007 мм — поперечная сферическая аберрация широких наклонных пучков в пределах всего углового поля;

0,050 мм — меридиональный астигматический отрезок;

0,055 мм — сагиттальный астигматический отрезок;

0,25 % — дисторсия;

0,047 мм — хроматизм положения.

Модуляционная передаточная функция (МПФ) показывает, что качество изображения оптической системы близко к дифракционному (рис. 4).



Рис. 4. Полихроматическая МПФ дифракционно ограниченной системы (а) и рассчитанного объектива (б) в меридиональном (1) и сагиттальном (2) направлениях

Закключение. Предложена методика расчета параметров трехзеркальной оптической схемы с зеркалами Манжена и эксцентрично расположенным полем изображения исходя из условий не только исправления двух хроматических и четырех монохроматических аберраций, но и соблюдения некоторых заранее заданных соотношений между параметрами, характеризующими габариты системы. Применение разработанной методики в практике проектирования оптических систем позволяет расширить количество анализируемых схем, повысить качество изображения окончательного варианта и ускорить процесс проектирования аппаратуры ДЗЗ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Заварзин В.И., Кравченко С.О., Морозов С.А. Методика расчета объективов с зеркалами Манжена на основе трехзеркальной системы с эксцентрично расположенным полем изображения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 1 (13). URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optical/521.html>
- [2] Заказов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. *Теория оптических систем*. Москва, Машиностроение, 1992, 448 с.

- [3] Дубовик А.С., Апенко М.И., Дурейко Г.В. Жилкин А.М., Запрягаева Л.А., Романов Д.А., Свешникова И.С. *Прикладная оптика*. Москва, Недра, 1982, 612 с.
- [4] Слюсарев Г.Г. *Расчет оптических систем*. Ленинград, Машиностроение, 1975, 640 с.
- [5] Архипов С.А., Заварзин В.И., Заварзина В.В., Кравченко С.О., Морозов С.А., Сенник Б.Н. *Зеркально-линзовый объектив (варианты)*. Пат. 2461030 Российская Федерация, МПК G02В 17/08, опубл. 10.09.2012, бюл. № 25. 14 с.

Статья поступила в редакцию 24.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Заварзин В.И., Кравченко С.О., Морозов С.А. Методика расчета компактных внеосевых трехзеркальных объективов с зеркалами Манжена. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 7.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/819.html>

Заварзин Валерий Иванович родился в 1956 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1980 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Оптико-электронные приборы научных исследований», декан факультета «Оптико-электронное приборостроение» МГТУ им. Н. Э. Баумана. Автор более 100 научных публикаций в области оптического приборостроения. e-mail: zavarzin@bmstu.ru

Кравченко Станислав Олегович родился в 1990 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2012 г. Аспирант кафедры «Оптико-электронные приборы научных исследований» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор четырех научных публикаций в области оптического приборостроения.

Морозов Сергей Александрович родился в 1982 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2006 г. Аспирант кафедры «Оптико-электронные приборы научных исследований» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 15 научных публикаций в области оптического приборостроения. e-mail: s.morozov@mail.ru