

УДК 528.8

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО АППАРАТА С ПРИЗМЕННЫМ ДИСПЕРГИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ**В.И. Заварзин, А.В. Ли**МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: alvik87@gmail.com

В последние годы в мире появляется все больше гиперспектральной аппаратуры, устанавливаемой на авиационных и космических носителях. Космическая гиперспектральная аппаратура уже побывала на орбитах Луны и Марса. В процессе проектирования такой аппаратуры после разработки основных схематехнических и конструктивных решений необходимо провести оценку их влияния на формируемое изображение и подтвердить заявленные тактико-технические характеристики. Предложена методика определения характеристик гиперспектральной съемочной аппаратуры (угловой и линейной дисперсии, спектрального разрешения, модуляционной передаточной функции, кривизны спектральных линий) на основе модели аппаратной функции и расчета хода лучей через оптическую систему гиперспектральной съемочной аппаратуры.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, гиперспектральная аппаратура, спектральное разрешение, дисперсия, аппаратная функция.

PERFORMANCE CALCULATIONS OF HYPERSPECTRAL INSTRUMENT WITH PRISMATIC DISPERSIVE DEVICE**V.I. Zavarzin, A.V. Li**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: alvik87@gmail.com

In recent years, all over the world the authors have noted the appearance of growing number hyperspectral instruments installed on the aircraft and space vehicles. A spacecraft hyperspectral instruments has already been on orbit of the Moon and Mars. During the design process instruments after development of the main schematic design and constructive decisions it is necessary to assess their impact on formed image and confirm stated tactical and technical characteristics. The authors have proposed a method of determining the characteristics of hyperspectral imaging instrument (angular and linear dispersion, spectral resolution, the modulation transfer function, the curvature of the spectral lines) based on the model of instrument function and raytracing through an optical system of hyperspectral imaging instrument with a prismatic dispersive device.

Keywords: remote sensing, hyperspectral instrument, spectral resolution, dispersion, instrument function.

В настоящее время происходит постоянное наращивание космической группировки спутников с оптико-электронной аппаратурой для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). На борту таких спутников располагается и гиперспектральная съемочная аппаратура (ГСА), преимуществом которой является возможность одновременного получения изображения объекта во множестве узких спектральных каналов.

Гиперспектральная аппаратура предназначена для решения различных социально-экономических и военных задач. Данные, получаемые с помощью такой ГСА, используются Министерством чрезвычайных ситуаций РФ, Росреестром, Роснедра, Министерством обороны РФ и др. Таким образом, применение ГСА играет важную роль в решении актуальных задач, стоящих перед государством.

В процессе проектирования ГСА после разработки основных схемотехнических и конструктивных решений аппаратуры необходимо оценить их влияние на формируемое ГСА изображение. Важная задача для ГСА – расчет спектральных тактико-технических характеристик прибора: угловой дисперсии; линейной дисперсии; спектрального разрешения прибора.

Рассмотрим методику расчета характеристик спектральных приборов, работающих с призмным диспергирующим устройством. Большинство существующих ГСА построено на основе схемы классического спектрометра с входной щелью, коллимирующим и фокусирующим объективами, призмным диспергирующим устройством и матричным фотоприемником [1].

Схема классического щелевого спектрометра приведена на рис. 1. Входной объектив, или изображающий объектив, формирует движущееся (по направлению оси OY) изображение подстилающей поверхности на входную щель, установленную в его фокальной плоскости. Ширина щели по направлению оси OY равна размеру элемента приемника изображения, а по направлению оси OX определяется требованием к захвату аппаратуры.

Коллимирующий объектив образует параллельный пучок лучей от изображения на щели, который в свою очередь раскладывается в спектр с помощью призмного диспергирующего устройства (УД). Разложенное в спектр излучение проецируется фокусирующим объективом на фотоприемное устройство (ФПУ).

В схемах ГСА могут использоваться различные типы призмных систем: двух-, трех- и более призмные, с двойным прохождением лучей.

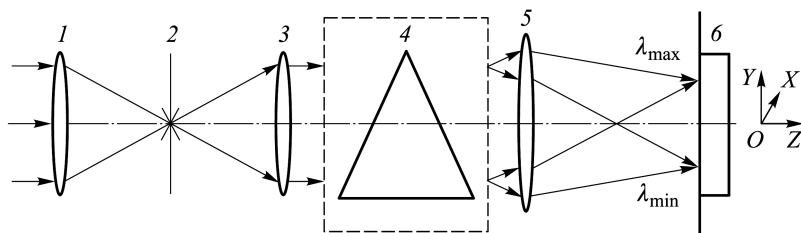


Рис. 1. Схема щелевого спектрометра:

1 – изображающий объектив; 2 – щель; 3 – коллимирующий объектив; 4 – диспергирующее устройство; 5 – фокусирующий объектив; 6 – фотоприемное устройство

Следует отметить, что изображение, получаемое с помощью спектрального аппарата, не является абсолютной копией изображения сцены съемки. Это связано с размытием мелких деталей объектов. Величина такого размытия определяется общей функцией рассеяния, которая также называется аппаратной функцией прибора $A(x, y)$.

Анализируя аппаратную функцию, можно реализовать несколько способов оценки качества оптического изображения: модуляционная передаточная функция (МПФ); пространственное разрешение; спектральное разрешение [2].

В общем случае выходной сигнал можно представить сверткой входного сигнала $I_0(x, y)$ и аппаратной функции [3]

$$I(w, r) = \iint_W I_0(x, y)A(w - x, r - y)dx dy,$$

где $A(w - x, r - y)$ — смещенный на величины w и r отклик аппарата; W — диапазон координат, в котором отклик аппарата существенен.

В спектральных аппаратах каждой отдельной длине волны λ в фокальной плоскости соответствует определенная координата y , в направлении которой располагается информация о спектральном составе регистрируемого излучения. Поэтому аппаратная функция по оси OY может быть записана (в виде $A(x, \lambda)$) для каждой фиксированной длины волны λ и будет называться спектральной аппаратной функцией.

Для ГСА аппаратная функция представляет собой свертку [4]

$$A_{\text{общ}}(x, y) = PSF_{\text{опт}} * PSF_{\text{щель}} * PSF_{\text{ПИ}} * PSF_{\text{смещ}} * PSF_{\text{эл}},$$

где $PSF_{\text{опт}}$ — оптическая функция рассеяния точки (ФРТ); $PSF_{\text{щель}}$ — функция, учитывающая влияние щели на общую функцию рассеяния; $PSF_{\text{ПИ}}$ — функция, учитывающая влияние приемника излучения (ПИ); $PSF_{\text{смещ}}$ — функция рассеяния, связанная со смещением изображения относительно щели; $PSF_{\text{эл}}$ — функция, учитывающая влияние электроники.

Оптическая ФРТ определяется как пространственное энергетическое распределение освещенности в изображении точечного источника. Оптическая система никогда не бывает “идеальной”, поэтому энергия от такого источника рассеивается и распределяется в фокальной плоскости в пределах некоторой небольшой области. Степень рассеяния зависит от многих факторов, в том числе от дифракции, aberrаций и качества механической сборки оптической системы.

Общей базовой моделью оптической ФРТ $PSF_{\text{опт}}$ с хорошей точностью служит двумерная функция Гаусса: $PSF_{\text{опт}}(x, y) = \exp(-x^2/a^2) \times \exp(-y^2/b^2)$. Здесь a, b — коэффициенты, вычисляемые исходя из

требований к полуширине ФРТ,

$$a = \sqrt{-\frac{\delta_x^2}{4 \ln(0,5)}}; \quad b = \sqrt{-\frac{\delta_y^2}{4 \ln(0,5)}},$$

где δ_x, δ_y — полуширина оптической ФРТ, определяется как ширина функции на уровне половины от ее максимального значения, соответственно по координатам x и y .

Применяя преобразование Фурье к ФРТ, находим оптическую передаточную функцию $TF_{\text{опт}}(\nu_x, \nu_y) = \exp(-\pi^2 a^2 \nu_x^2) \exp(-\pi^2 b^2 \nu_y^2)$, где ν_x, ν_y — пространственные частоты.

Если известны конструктивные характеристики оптической схемы, то ожидаемое (расчетное) значение оптической ФРТ с большой точностью может быть получено путем моделирования в программах автоматизированного расчета оптических систем.

Функция, учитывающая влияние щели на общую ФРТ, описывает пространственное размытие, связанное с конечным размером входной щели ГСА. Эта функция имеет следующий вид: $PSF_{\text{щель}}(y) = \text{rect}(y/h)$, где h — ширина щели. Фурье-образ такой функции: $TF_{\text{щель}}(\nu_y) = \text{sinc}(\pi h \nu_y)$.

Функция, учитывающая влияние ПИ, описывает пространственное размытие, связанное с ненулевыми размерами чувствительных элементов приемника: $PSF_{\text{ПИ}}(x, y) = \text{rect}(x/d_x) \text{rect}(y/d_y)$, где d_x, d_y — размеры элемента приемника изображения поперек (вдоль строки ФПУ) и вдоль (вдоль столбца ФПУ) маршрута. Передаточная функция элемента ПИ в частотной области имеет вид $TF_{\text{ПИ}}(\nu_x, \nu_y) = \text{sinc}(\pi d_x \nu_x) \text{sinc}(\pi d_y \nu_y)$.

Функция рассеяния, связанная со смещением изображения относительно щели, учитывает размытие изображения, происходящее в том случае, если в течение времени, пока идет интегрирование сигнала для данного пикселя, изображение смещается от одного детекторного элемента к другому. Такое смещение моделируется одномерной ФРТ в виде прямоугольного импульса $PSF_{\text{смещ}}(y) = \text{rect}(y/s)$, где s — пространственное размытие изображения в фокальной плоскости, определяемое как сдвиг изображения, выраженный в долях пикселя за время интегрирования.

Выполнив преобразование Фурье функции смещения изображения, получим $TF_{\text{смещ}}(\nu_y) = \text{sinc}(\pi s \nu_y)$.

Электронный тракт аппаратуры во время накопления и переноса зарядов, оцифровки сигнала, усиления и т.д. вносит искажения, влияющие на аппаратную функцию. **Функция, учитывающая влияние электроники**, рассчитывается или измеряется для каждого конкретного случая.

Для вычисления аппаратной функции необходимо определить общую передаточную функцию. Используя теорему о свертке, можно получить ее как произведение фурье-образов всех передаточных функций основных элементов функции рассеяния $TF_{\text{общ}}(\nu_x, \nu_y) = TF_{\text{опт}} TF_{\text{щель}} TF_{\text{ПН}} TF_{\text{щель}} TF_{\text{эл}}$.

Особенность работы ГСА — разделение аппаратной функции на продольную ($A_{\parallel}(y)$) и поперечную ($A_{\perp}(x)$) составляющие. В направлении продольной составляющей измеряются пространственные характеристики сцены съемки, а в направлении поперечной составляющей — информация о спектральном составе изображения местности ограниченного входной щелью спектрометра:

$$TF_{\text{общ}}(\nu_x) = \exp(-\pi^2 a^2 \nu_x^2) \text{sinc}(\pi d_x \nu_x);$$

$$TF_{\text{общ}}(\nu_y) = \exp(-\pi^2 b^2 \nu_y^2) \text{sinc}(\pi h \nu_y) \text{sinc}(\pi d_y \nu_y) \text{sinc}(\pi s \nu_y).$$

Наибольший интерес для оценки качества изображения представляет амплитудная составляющая передаточной функции — МПФ. Введем обозначение MTF и запишем выражение $MTF_{\text{общ}} = |TF_{\text{общ}}| = MTF_{\text{опт}} MTF_{\text{щель}} MTF_{\text{ПН}} MTF_{\text{смещ}} MTF_{\text{эл}}$.

Применив обратное преобразование Фурье к общей передаточной функции, можно получить формулы для вычисления аппаратной функции $A_{\text{общ}}(x) = \tilde{F}^{-1}(TF_{\text{общ}}(\nu_x))$; $A_{\text{общ}}(y) = \tilde{F}^{-1}(TF_{\text{общ}}(\nu_y))$, где \tilde{F}^{-1} — оператор обратного преобразования Фурье.

Получив аппаратную передаточную функцию, определим спектральное разрешение прибора как произведение полуширины $\delta y(\lambda)$ спектральной аппаратной функции для каждой длины волны и обратной линейной дисперсии $\delta \lambda = \Delta y(\lambda) \frac{1}{D_i(\lambda)}$ [5].

Для этого необходимо рассчитать линейную дисперсию спектрального прибора. В случае использования призмного диспергирующего устройства такая характеристика может быть определена из угловой дисперсии: $D_i(\lambda) = f'_{\text{фок}} \text{tg}(D_{\phi}(\lambda))$, где $f'_{\text{фок}}$ — фокусное расстояние фокусирующего объектива.

Угловая дисперсия находится расчетом осевого полихроматического пучка лучей в меридиональной плоскости системы. В области $\Delta \lambda$ для длины волны λ угловая дисперсия вычисляется по формуле

$$D_{\phi}(\lambda) = \frac{\arccos(A_{\lambda+\Delta\lambda}(z)) - \arccos(A_{\lambda}(z))}{\Delta\lambda},$$

где $A_{\lambda}(z)$ — координата луча света с длиной волны λ на выходе диспергирующего устройства по оси OZ ; $\Delta \lambda$ — приращение длины волны.

Каждый луч с длиной волны λ рассчитывается последовательным определением угловых координат на каждой поверхности раздела сред диспергирующего устройства.

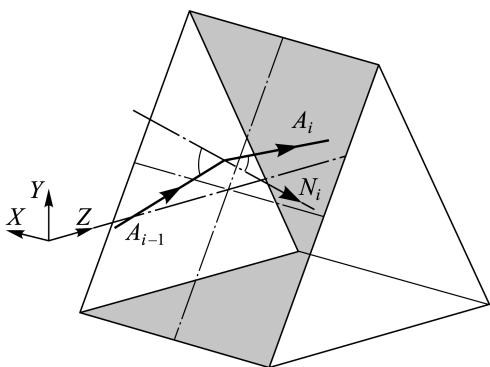


Рис. 2. Схема преломления луча света на поверхности границы раздела сред

поверхности призмы. Нормали к границам раздела сред направлены в сторону преломленных лучей. Воздушный промежуток вводится (при необходимости) как очередная среда с показателем $n_i(\lambda) = 1$ и со своей поверхностью границы раздела, имеющей нормаль.

Рассмотрим преломление монохроматического луча света на какой-либо поверхности границы раздела сред. Орт входного луча \mathbf{A}_{i-1} , падающий на границу раздела двух сред, орт преломленного луча \mathbf{A}_i и нормаль к поверхности призмы \mathbf{N}_i , которую можно представить ортом

$$\mathbf{N}_i = \begin{pmatrix} 0 \\ -\sin q_i \\ \cos q_i \end{pmatrix},$$

показаны на рис. 2.

Угол между падающим лучом и нормалью к поверхности вычисляется из их скалярного произведения по формуле

$$\cos \alpha_{i-1} = \frac{\mathbf{A}_{i-1} \cdot \mathbf{N}_i}{|\mathbf{A}_{i-1}| \cdot |\mathbf{N}_i|} = A_{i-1}(x)N_i(x) + A_{i-1}(y)N_i(y) + A_{i-1}(z)N_i(z).$$

Согласно закону геометрической оптики, синус угла между преломленным лучом и нормалью рассчитывается как

$$\sin \alpha_i = \frac{n_{i-1}(\lambda)}{n_i(\lambda)} \sin \alpha_{i-1},$$

где α_i — угол между преломленным лучом и нормалью в точке падения; α_{i-1} — угол между падающим лучом и нормалью в точке падения.

Векторное выражение для орта преломленного луча в основной системе координат можно записать в удобном для расчетов виде [6]:

$$\mathbf{A}_i = \frac{n_{i-1}}{n_i} \mathbf{A}_{i-1} + \mathbf{N}_i \left(\cos \alpha_i - \frac{n_{i-1}}{n_i} \cos \alpha_{i-1} \right).$$

Расчеты выполняются в правой системе координат $OXYZ$. Ось OX параллельна входной щели, ось OZ совпадает с оптической осью, ось OY определяет направление разложения спектра. Коллимирующий и фокусирующий объективы рассматриваются как бесконечно тонкие, расположенные в однородной среде, среды разделены плоскостями, в данном случае это

В диспергирующем устройстве возможно применение автоколлимационных или ломающих оптическую ось плоских зеркал.

В случае отражения света от зеркальной поверхности орт нормали будет направлен в сторону отраженного луча (рис. 3). При развороте зеркальной поверхности на угол q_i орт нормали имеет вид

$$N_i = \begin{pmatrix} 0 \\ \sin q_i \\ -\cos q_i \end{pmatrix}.$$

Согласно закону отражения, направление распространения луча после отражения меняется на противоположное, угол отражения по абсолютному значению равен углу падения, падающий и отраженный лучи вместе с нормалью к точке падения принадлежат одной плоскости. С учетом изложенного и расположения векторов в основной системе координат (см. рис. 3) угол между ортом нормали и отраженным лучом определяется по формуле $\alpha_i = \pi - \alpha_{i-1}$.

Векторное выражение для орта отраженного луча $A_i = A_{i-1} - 2N_i(A_{i-1} \cdot N_i)$, где $(A_{i-1} \cdot N_i)$ – скалярное произведение ортов A_{i-1} и N_i [6].

Задавая входной луч как $A_0 = A_{вх}$ и последовательно проводя расчет хода луча на каждой поверхности границы раздела сред, определяем координаты на выходе диспергирующего устройства $A_{вых}$. При этом в общем случае падающий луч задается единичным вектором с координатой x на прямой, проходящей через середину входной щели, координаты которого можно записать так:

$$A_{вых}(x, \gamma) = \begin{pmatrix} -\frac{x \cos \gamma}{\sqrt{f_{кол}'^2 + x^2 \cos^2 \gamma}} \\ -\frac{f_{кол}' \sin \gamma}{\sqrt{f_{кол}'^2 + x^2 \cos^2 \gamma}} \\ \frac{f_{кол}' \cos \gamma}{\sqrt{f_{кол}'^2 + x^2 \cos^2 \gamma}} \end{pmatrix}.$$

Другая важная характеристика ГСА – прогиб спектральной линии на длине волны λ (рис. 4). Эта характеристика оценивается сдвигом стрелки прогиба и получается расчетом монохроматического пучка лучей, равномерно распределенных по всему полю изображения. Определенный результат в виде набора точек (x, y) пересечения

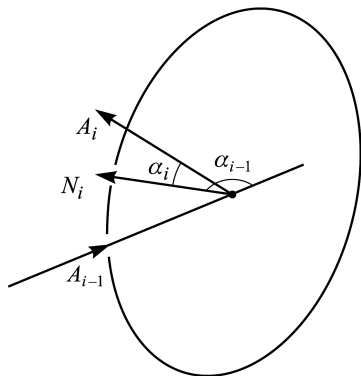


Рис. 3. Схема отражения луча света от плоской зеркальной поверхности

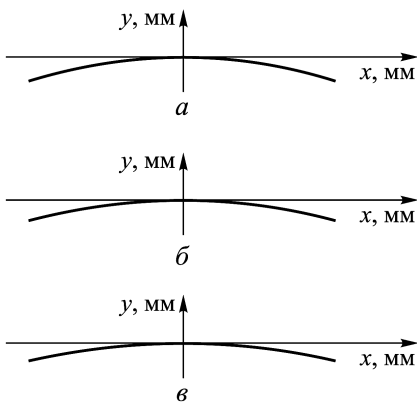


Рис. 4. Прогиб спектральных линий на длине волны λ_0 (а), λ_1 (б) и λ_2 (в)

лучей с плоскостью изображения необходимо аппроксимировать полиномом, например второй степени, который представляет собой уравнение спектральной линии на длине волны λ : $Y = AX^2 + BX + C$, где A, B, C – коэффициенты полинома.

Сдвиг стрелки прогиба оценивается по формуле $S_y = y_{\text{край}} - y_{\text{центр}}$, где $y_{\text{край}}$ и $y_{\text{центр}}$ – координаты пересечения крайнего и главного (центрального) лучей с плоскостью изображения.

Методику расчета характеристик ГСА можно свести к алгоритму (рис. 5), который достаточно легко реализуется

в широко распространенных программных комплексах MathCAD, Matlab и т.п., а также используется для проведения анализа тактико-технических характеристик и оптимизации схмотехнических и конструктивных решений при разработке ГСА в целях повышения качества изображения.

Выводы. Предложена методика расчета основных характеристик ГСА, работающих с призмным диспергирующим устройством. Методика включает в себя расчет угловой и линейной дисперсии, сдвиг стрелок прогиба спектральных линий, спектрального разрешения и

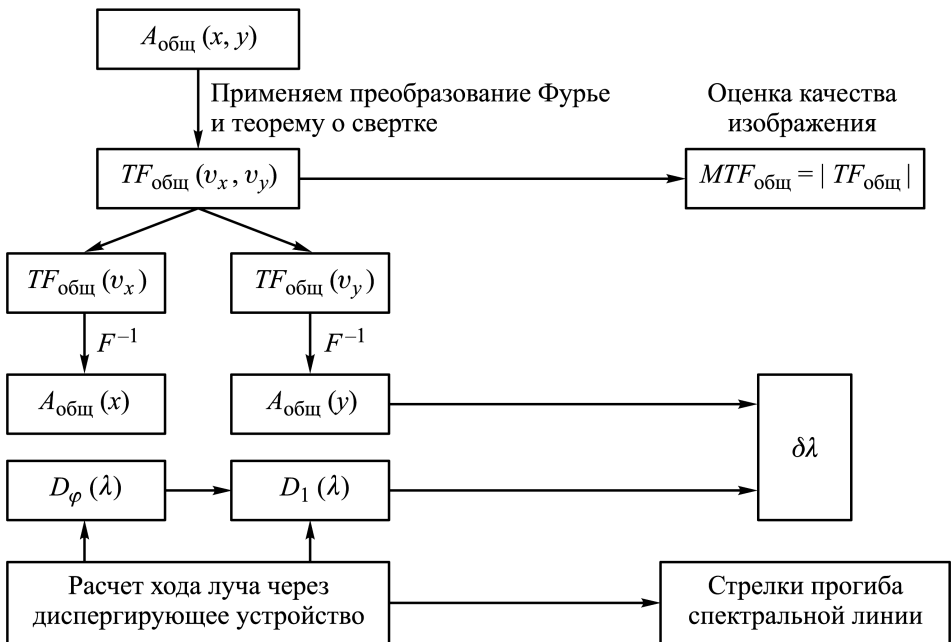


Рис. 5. Блок-схема алгоритма методики расчета основных характеристик ГСА

МПФ. Применение методики на практике проектирования ГСА позволяет повысить за счет алгоритма оптимизации спектральные тактико-технические характеристики аппаратуры, что в свою очередь дает возможность поднять на новый уровень решение задач в области ДЗЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Оптические системы современных космических видеоспектрометров: варианты и особенности схемных решений* / С.А. Архипов, А.В. Ли, В.М. Линько, С.А. Морозов // Сборник материалов Восьмой науч.-техн. конф. “Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли”. 2011. С. 146–152.
2. *Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И.* Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1992. 448 с.
3. *Мосягин Г.М., Немтинов В.Б., Лебедев Е.Н.* Теория оптико-электронных систем. М.: Машиностроение, 1990. 432 с.
4. *Шовенгердт Р.А.* Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
5. *Пейсахсон И.В.* Оптика спектральных приборов. Л.: Машиностроение, 1975. 312 с.
6. *Погарев Г.В.* Юстировка оптических приборов. М.: Машиностроение, 1968. 292 с.

REFERENCES

- [1] Arkhipov S.A., Li A.V., Lin'ko V.M., Morozov S.A. Optical system of modern space imaging spectrometer: options and features of circuit decisions. *Sb. Mat. Vos'moy Nauch.-Tekhn. Konf. "Sistemy nablyudeniya, monitoringa i distantsionnogo zondirovaniya Zemli"* [Proc. of 8th. Sci.-Tech. Conf. "Observation systems, monitoring and Earth remote sensing"], Gelendzhik, 2011, pp. 146–152 (in Russ.).
- [2] Zakaznov N.P., Kiryushin S.I., Kuzichev V.I. Teoriya opticheskikh system [The theory of optical systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992. 448 p.
- [3] Mosyagin G.M., Nemtinov V.B., Lebedev E.N. Teoriya optiko-elektronnykh system [The theory of optical-electronic systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 432 p.
- [4] Shovengerdt R.A. Distantsionnoe zondirovanie. Modeli i metody obrabotki izobrazheniy [Remote sensing. Models and methods for image processing]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2010. 560 p.
- [5] Peysakhson I. V. Optika spektral'nykh priborov [Optics spectral instruments]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1975. 312 p.
- [6] Pogarev G.V. Yustirovka opticheskikh priborov [Adjustment of optical devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 292 p.

Статья поступила в редакцию 10.04.2014

Заварзин Валерий Иванович — д-р техн. наук, профессор кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы”, декан факультета “Оптико-электронное приборостроение” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных публикаций в области оптического приборостроения.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Zavarzin V.I. — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Laser and Opto-Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University, dean of “Opto-Electronic Devices Engineering” faculty of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of optical device engineering.
Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Ли Александр Викторович — аспирант кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 17 научных работ в области оптического приборостроения.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Li A.V. — post-graduate of “Laser and Opto-Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 17 publications in the field of optical device engineering.
Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.