

ТЕРМОАБЕРРАЦИИ В ИНФРАКРАСНЫХ ДИОПТРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТИВАХ И ИХ КОМПЕНСАЦИЯ

Муравьев А.В.

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени И. Сикорского»
Киев, Украина*

Инфракрасные (ИК) оптические системы получают все более широкое распространение, как в гражданской, так и в военной сферах применения тепловизионной аппаратуры. Эксплуатационные требования к данной технике обязательно включают температурный диапазон работы приборов, который может достигать значений от -50°C до $+60^{\circ}\text{C}$.

Качество изображения объективов оптико-электронных приборов (ОЭП) определяется мерой исправления aberrаций и условиями работы. Изменение температуры окружающей среды приводит к появлению термоаббераций в изображении оптической системы [1]. Особенно существенно влиянию этого фактора подвержены диоптрические ИК объективы, что обусловлено высокой температурной зависимостью свойств оптических материалов, прозрачных в этой области спектра. Воздействие температуры может привести к значительному ухудшению качества изображения ИК объектива, что обусловлено следующими факторами:

- изменением радиусов кривизны и формы оптической поверхности линз (сферические поверхности в ряде случаев становятся асферическими);
- изменением габаритных размеров линз (осевых толщин и диаметров);
- изменением преломляющих свойств оптических материалов;
- возникновением внутренних напряжений компонентов оптической системы, что приведет к деформациям и возникновению эффекта двулучепреломления.

Основным параметром оптического материала, характеризующим степень зависимости его свойств от температуры, является термооптическая постоянная V_t , которая определяется следующим образом [2]:

$$V_t = \frac{\beta_\lambda}{n_\lambda - 1} - \alpha,$$

где β_λ – коэффициент температурного приращения показателя преломления для длины волны излучения λ ; α – температурный коэффициент линейного расширения материала; n_λ – показатель преломления материала на длине волны λ .

Выполнить анализ влияния температуры на aberrационные свойства и качество изображения

оптической системы с высокой точностью позволяют современные системы автоматического проектирования (САПР). Одним из таких программных пакетов является САПР Zemax, дающая возможность провести математическое моделирование с учетом нелинейности зависимости характеристик оптических материалов от температуры и длины волны излучения.

Типичным оптическим материалом для ИК объективов является германий, обладающий широким спектральным диапазоном пропускания излучения, простотой технологической обработки и хорошими механическими качествами. Однако наряду с этим свойства данного материала обладают чрезвычайной зависимостью от температуры, на порядок более существенной, чем у материалов видимого диапазона спектра и в разы превышающими значения V_t для большинства ИК материалов.

Для исследования закономерностей проявления термоаббераций изображения проведен анализ ряда диоптрических ИК объективов [3]. Рассмотрим результат такого анализа на примере типичного германиевого объектива [4], имеющего следующие основные характеристики: угол поля зрения $2\omega = 25^{\circ}$, фокусное расстояние $f = 38,55$ мм, относительное отверстие 1:0,75, спектральный диапазон работы 8-14 мкм. Качество изображения оптической системы характеризуется минимальными aberrациями и разрешающей способностью близкой к дифракционному пределу в случае, когда плоскость анализа совпадает с параксиальной фокальной плоскостью. При повышении температуры объектива с 20°C до 60°C положение этой плоскости изменится вследствие терморасфокусировки, которая составит 190 мкм. Это приведет к тому, что при условии отсутствия в конструкции фотоприемного узла устройства автоматической компенсации терморасфокусировки разрешающая способность оптической системы снизится в три-четыре раза.

Подробную информацию о результатах анализа влияния температуры на aberrационные характеристики объектива содержит таблица 1. Приведенные значения радиуса кружка рассеяния представляют собой среднеквадратическую величину для заданных длин волн, а значения aberrации кома взяты при максимальном размере кружка рассеяния.

Таблица 1. Значения aberrаций германиевого объектива при температурах 20 и 60 °С

| Температура, °С | λ , мкм | Сферическая продольная, мм | Радиус кружка рассеяния, мкм | | Астигматизм, мм | | Кома, мкм | Дисторсия, % | Хроматизм положения, мкм | Хроматизм увеличения, мкм |
|-----------------|-----------------|----------------------------|------------------------------|------------------|-----------------|--------|--|--------------|--------------------------|---------------------------|
| | | | на оси | на краю | L_m | L_s | | | | |
| 20 | 8 | 0,002 | 9,452 | 22,531 | -0,038 | -0,029 | $\Delta x'=29,08$ $\Delta y'=24,9$ | -2,434 | 57,34 | -20,39 |
| | 11 | 0,039 | | | 0,004 | 0,009 | | | | |
| | 14 | 0,061 | | | -0,028 | 0,03 | | | | |
| 60 | 8 | -0,19 | 9,73* 38,810 | 22,65* 75,825 | -0,256 | -0,224 | $\Delta x'=126,5$ $\Delta y'=68,27$ | -2,376 | 57,26 | -20,51 |
| | 11 | -0,152 | | | -0,213 | -0,186 | | | | |
| | 14 | -0,32 | | | -0,189 | -0,165 | | | | |

*Значения определены по отношению к параксиальной фокальной плоскости исследуемой системы.

Проведенный анализ позволил установить, что наиболее существенно при температурном воздействии в диоптрическом ИК объективе изменяется продольная сферическая aberrация. При изменении температуры в такой оптической системе всего на несколько десятков градусов произойдет существенное снижение качества изображения даже для объектива с высокой степенью минимизации aberrаций. Однако характер зависимости полевых aberrаций от радиуса входного зрачка или угла поля зрения системы останется неизменным. Следовательно, при термостабилизации заднего фокального отрезка оптической системы все термоaberrации также будут скомпенсированы.

Компенсация терморасфокусировки возможна при использовании термокомпенсаторов активного или полуактивного типов. На данный момент наиболее популярным является применение шаговых электродвигателей для автоматического перемещения фотоприемного устройства и ручная юстировка элементов объектива. Однако если первый вариант существенно усложнит конструкцию фокусирующего узла фотоприемного устройства, то второй может быть в принципе не возможен при определенных условиях эксплуатации ОЭП.

Проблема термостабилизации заднего фокального отрезка также может быть решена при разработке атермализованных ИК объективов, когда в ходе синтеза оптической системы для её компонентов подбираются материалы с разными знаками термооптической постоянной для взаимной компенсации терморасфокусировки отдельных линз.

Разработанные методы пассивной оптической атермализации [5, 6] позволяют синтезировать композиции ИК объективов со стабилизированными в широком температурном диапазоне характеристиками и высоким качеством изображения. К преимуществам использования данных

методов можно отнести: простоту конструкции, надежность, отсутствие подвижных деталей, минимизацию массы и габаритов объектива. В ходе атермализации оптической системы происходит одновременная компенсация aberrаций изображения. Единственным недостатком методов пассивной оптической атермализации является необходимость использования минимум двух оптических материалов в конструкции ИК объектива.

1. Jamison, T.H. Thermal effects in optical systems / T.H. Jamison // Opt. Eng. – 1981. – Vol. 20. – P. 156-160.
2. Кучеренко, О.К. Влияние температуры на терморасфокусировку фокусирующего узла в инфракрасных системах / О.К. Кучеренко, А.В. Муравьев, В.Н. Куцурук // Вісник НТУУ „КПІ”. – сер. Приладобудування. – 2010. – вип. 40. – С. 32-37.
3. Кучеренко, О.К. Вплив температури на aberrаційні властивості ІЧ-об'єктивів / О.К. Кучеренко, О.В. Муравйов, Д.О. Остапенко // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2013. – №1. – С. 99-105.
4. Сокольский, М.Н. Светосильный объектив для инфракрасной области спектра / М.Н. Сокольский, И.Е. Совз. – Патент России № 2449327. – 2010.
5. Тягур, В.М. Пассивная оптическая атермализация инфракрасного трехлинзового ахромата / В.М. Тягур, О.К. Кучеренко, А.В. Муравьев, // Оптический журнал. – 2014. – том 81. – №4. – С. 42-47.
6. Кучеренко, О.К. Ахроматизація та атермалізація об'єктивів інфрачервоної техніки / О.К. Кучеренко, О.В. Муравйов, В.М. Тягур // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2012. – №5. – С. 114-117.