

*А. В. Муравьев, к.т.н. (Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Украина)*

Компенсация влияния эксплуатационных факторов на качество работы оптико-электронных приборов аэрокосмического назначения

Условия эксплуатации аэрокосмической техники оказывают существенное влияние на качество изображения и характеристики бортовых оптико-электронных приборов и систем. Работа посвящена анализу влияния таких факторов на оптические системы и разработке методов их компенсации.

Оптические и оптико-электронные приборы часто эксплуатируются в сложных, а иногда и экстремальных условиях окружающей среды. В первую очередь к этой категории можно отнести устройства, применяемые в авиационной и космической технике. К такой аппаратуре относятся, например, сканеры для наблюдения за поверхностью Земли, космические телескопы, различные оптико-электронные датчики, бортовые системы наблюдения, навигации и ориентации. Условия работы приборов в космосе или на значительной высоте над поверхностью земли существенно отличаются от обычных условий, особенно если устройства или их элементы расположены за пределами обшивки корпуса аппарата. Здесь наблюдается значительный перепад температур и атмосферного давления, изменение оптических свойств окружающей среды. При высоких скоростях полета вследствие наличия трения об воздух элементы фюзеляжа могут нагреваться до значительных температур, вплоть до тысячи градусов. Влияние этих эксплуатационных факторов приводит к изменению основных конструктивных параметров фокусирующего узла, который является неотъемлемым атрибутом таких устройств, а именно радиусов кривизны поверхностей, толщин и диаметров компонентов, промежутков между отдельными деталями. Это, в свою очередь, приводит к расфокусировке оптической системы, появлению новых aberrаций и, как следствие, ухудшению качества изображения прибора [1]. Кроме того, под воздействием температурных полей происходит деформация линейных размеров оправ оптических деталей, а также корпусных элементов несущей конструкции. В результате взаимное расположение компонентов оптической системы может претерпеть существенных изменений. Комплексное влияние указанных факторов приведет к значительному ухудшению энергетических и частотных характеристик системы [2], а в некоторых случаях – к полной неработоспособности прибора или узла при определенных сложных условиях окружающей среды.

Целью данного исследования является анализ влияния эксплуатационных факторов на качество изображения типичных оптических систем, применяемых в оптико-электронных приборах аэрокосмического базирования, и разработка методов компенсации этого влияния. Для анализа работы фокусирующих узлов устройств в указанных условиях использовалась программная среда Zemax, а для механических деталей – система

автоматизированного проектирования SolidWorks. Особое внимание при этом было уделено использованию в конструкциях современных материалов с минимальной температурной деформацией, к которым можно отнести плавный кварц, ситаллы, оптическую керамику, инвар, титан и его сплавы.

Комплексный анализ влияния температурных полей на характеристики оптической системы опико-электронного прибора можно осуществить оценкой модуляционной передаточной функции (МПФ) объектива при изменении температуры фокусирующего узла. Результат такого анализа для типичного инфракрасного (ИК) диоптрического германиевого объектива [3] при разных углах поля зрения системы приведен на рис. 1.

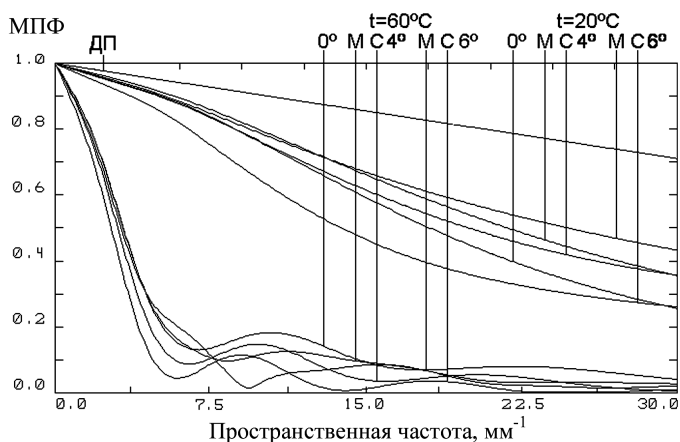


Рис. 1. МПФ германиевого объектива при температурах 20°C и 60°C. ДП – дифракционный предел, М, С – меридиональная и сагиттальная плоскости соответственно

Приведенный график демонстрирует падение уровня МПФ на частоте Найквиста для матричного приемника излучения с размером пикселя 25×25 мкм (пространственная частота 20 мм^{-1}) на 33% для сагиттальной и 54% для меридиональной плоскости при однородном изменении температуры на 40°C для края поля зрения системы. Изменение величины заднего фокального отрезка при этом составит 140 мкм, что приведет к снижению разрешающей способности системы в несколько раз.

На сегодняшний день для термостабилизации характеристик опико-электронных приборов наиболее широко применяются активные механические методы (например, микрометричные пошаговые двигатели) и ручная юстировка. В первом случае существенными преимуществами являются широкий диапазон температурной компенсации и высокая точность, а во втором – низкая стоимость реализации и простота полученной конструкции. Однако в аэрокосмической отрасли применение данных методов влечет за собой следующие сложности: наличие в конструкции прибора движущихся

элементов, увеличение массогабаритных свойств, снижение надежности и срока эксплуатации изделия. Указанных недостатков лишены методы пассивной оптической термостабилизации [4], применение которых рационально для высокоточных, ответственных приборов с отсутствием возможности прямого доступа для проведения ручной юстировки узлов во время эксплуатации изделия.

На основе проведенного анализа разработан метод пассивной оптической атермализации [5] с применением определенных композиций материалов оптических и механических деталей, при которых наблюдается минимальное температурное отклонение величины заднего фокального отрезка системы [6]. Примером применения данного метода является ИК атермализованный трехкомпонентный объектив, конструктивные параметры которого указаны в табл. 1, а график МПФ приведен на рис. 2.

Таблица 1

Конструктивные параметры атермализованного ИК объектива-триплета

| № | Радиус кривизны, мм | Толщина по оси, мм | Материал компонента | Световой диаметр, мм |
|---|---------------------|--------------------|---------------------|----------------------|
| 1 | 55.22 | 6.04 | ИКС25 | 51.7 |
| 2 | 173.43 | 5.12 | | 50.84 |
| 3 | 641.38 | 3.79 | ZnSe | 46.52 |
| 4 | 98.65 | 42.74 | | 43.72 |
| 5 | 20.05 | 4.24 | Ge | 21.12 |
| 6 | 19.77 | 8.09 | | 17.66 |

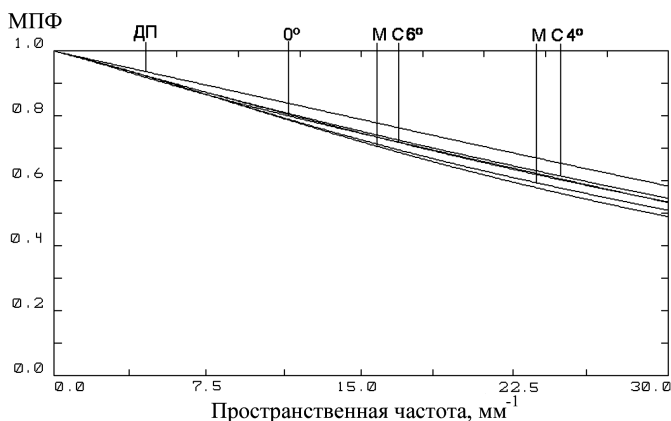


Рис. 2. МПФ атермализованного ИК объектива

Приведенный объектив обладает следующими параметрами: относительное отверстие 1:1, фокусное расстояние 50 мм, угол поля зрения 12°, спектральный диапазон работы 8-14 мкм. Изменение величины заднего фокального отрезка оптической системы в диапазоне температур от -20°С до

60°С лежит в пределах 4 мкм. Уровень МПФ объектива изменяется на 0.3% в указанном диапазоне температур.

Выводы

Компенсацию влияния эксплуатационных факторов на характеристики оптико-электронных приборов, использование которых планируется в сложных условиях окружающей среды, целесообразно проводить еще на этапе проектирования узлов таких устройств.

В случае, когда действие внешних факторов является значительным, для термостабилизации оптических систем рекомендуется применять активную атермализацию с использованием термокомпенсаторов различных конструкций. Однако, если необходимость минимизации массогабаритных свойств и повышение надежности прибора являются приоритетными задачами, следует отдать предпочтение методам пассивной атермализации.

Разработанный метод пассивной оптической атермализации позволяет синтезировать атермализованные диоптрические объективы с высоким качеством изображения, согласующимся с современными матричными приемниками излучения. Для реализации метода компоненты объектива должны быть выполнены минимум из двух различных оптических материалов. Терморасфокусировка таких объективов при изменении температуры в системе в диапазоне $\pm 40^\circ\text{C}$ составляет несколько микрометров, что подтверждает стабильность их характеристик и качества изображения при колебаниях температурного поля.

Список литературы

1. Jamison T. H. Athermalization of optical instruments from the optomechanical viewpoint / Т. Н. Jamison // *Optical Design*. – 1992. – Vol. 43. – pp. 131–159.
2. Кучеренко О. К. Методы пассивной атермализации и ахроматизации двухкомпонентных оптических систем / О. К. Кучеренко, А. В. Муравьев // *Вісник НТУУ «КПІ», серія Приладобудування*. – 2012. – вип. №43. – С. 46–53.
3. Хацевич Т. Н., Журавлев П. В. Инфракрасный светосильный трехлинзовый объектив / Т. Н. Хацевич, П.В. Журавлев // *Патент России № 2348953*. – 2009.
4. Кучеренко О. К. Ахроматизація та атермалізація об'єктивів інфрачервоної техніки / О. К. Кучеренко, О. В. Муравйов, В. М. Тягур // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. – 2012. – вип. №5. – С. 114–117.
5. Тягур В. М. Пассивная оптическая атермализация инфракрасного трехлинзового ахромата / В. М. Тягур, О. К. Кучеренко, А. В. Муравьев // *Оптический журнал*. – 2014. – том 81. – вып. №4. – С. 42–47.
6. Муравьев А. В. Композиции атермализованных трехкомпонентных инфракрасных объективов / А. В. Муравьев, О. К. Кучеренко // *Наука и техника*. – 2015. – № 4. – С. 32–37.