

О.К. КУЧЕРЕНКО, Б.В. КИРИЧУК

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИЗНАЧЕННЯ ВИМОГ ДО ПОЗИЦІОНУВАННЯ ІНФРАЧЕРВОНИХ ОБ'ЄКТИВІВ ПІД ЧАС ВИМІРЮВАННЯ МОДУЛЯЦІЙНОЇ ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ

Мета статті – визначення вимог до точності пристроїв базування інфрачервоних об'єктивів в стендах для вимірювання модуляційної передавальної функції (МПФ). Важливість питання пов'язана з поширенням інфрачервоної техніки, зокрема до якості зображення, що створюють інфрачервоні об'єктиви. Основною характеристикою якості зображення є МПФ. Сучасні стенди визначення МПФ побудовані на експериментальному вимірюванні функції розсіювання лінії (ФРЛ) з наступним виконанням перетворення Фур'є. ФРЛ вимірюється в фокальній площині об'єктива. Внаслідок похибок конструктивних параметрів задній фокальний відрізок об'єктива має відхилення від розрахункового значення в межах 3-4 %. Це призводить до похибки вимірювання МПФ. Тому в конструкції вимірювального стенда передбачені пристрої ручного або автоматичного фокусування об'єктива в площину предметів фотоприймального пристрою. В роботі поставлене завдання визначити вимоги, які слід встановити до пристроїв ручного або автоматичного фокусування при базуванні типових ІЧ об'єктивів в стенд для вимірювання МПФ, щоб похибка її визначення не перевищувала 5 %.

Ключові слова: інфрачервоні об'єктиви, модуляційна передавальна функція, стенди вимірювання МПФ, точність вимірювання.

О.К. KUCHERENKO, B.V. KYRYCHUK

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

DETERMINATION OF THE REQUIREMENTS FOR THE POSITIONING OF INFRARED LENSES IN THE MEASUREMENT OF THE MODULATION TRANSMISSION FUNCTION

The purpose of the article is to determine the accuracy requirements of infrared lens based devices in stands for measuring modulation transfer function. The importance of the issue has to do with the proliferation of infrared technology, including the quality of images produced by infrared lenses. The main characteristic of image quality is the modulation transfer function. Modern stands for determining the modulation-transfer function are based on the experimental measurement of the line scattering function, followed by the Fourier transform. Line scattering is measured in the focal plane of the lens. Constructional parameters errors cause the posterior focal length of the lens to deviate from the calculated value by 3-4%. This results in the measurement error of the modulation transfer function. Therefore, the design of the measuring stand includes devices for manual or automatic focusing of the lens in the plane of the objects of the photodetector. In order to reduce the impact of the error in determining the modulation transfer function, the measuring stand must have devices for accurately positioning the lens being monitored. The most detrimental cases are when the focal length of the lens is increased relative to the calculated value., so that the error of its determination does not exceed 5%.

Keywords: infrared lenses, modulation transfer function, MPF measurement stands, measurement accuracy.

Вступ

Стрімкий розвиток та застосування інфрачервоних (ІЧ) оптичних систем у вимірювальній, навігаційній, аграрній, військовій та авіаційно-космічній техніці для отримання точної та детальної інформації про об'єкт спостереження супроводжується проблемою передачі високоякісного зображення через оптичну систему (ОС) в цій спектральній області. Такі системи передбачають використання об'єктивів з високою, майже дифракційною, якістю зображення. Для контролю якості зображення об'єктива використовують атестаційні стенди. Принцип дії сучасних стендів побудований на вимірюванні функції розсіювання об'єктива з подальшим застосуванням перетворення Фур'є для визначення МПФ. МПФ універсальний критерій, який повністю характеризує якість ОС. Вона показує, як ОС відтворює різні просторові частоти. Міжнародна організація зі стандартизації (International Organization for Standardization – ISO) прийняла його як основний для оцінки якості ОС.

Постановка завдання

Вимірювання МПФ треба проводити в фокальній площині об'єктива, який випробується. Внаслідок похибок конструктивних параметрів задній фокальний відрізок об'єктива має відхилення від розрахункового значення в межах 3-4 %. Це призводить до похибки вимірювання МПФ. Тому в конструкції вимірювального стенда передбачені пристрої ручного або автоматичного фокусування об'єктива в площину предметів фотоприймального пристрою. В роботі поставлене завдання визначити вимоги, які слід встановити до пристроїв ручного або автоматичного фокусування в ході базування типових ІЧ об'єктивів в стенд для вимірювання МПФ, щоб похибка її визначення не перевищувала 5 %. Принцип вимірювання заснований на використанні коліматорної установки з неперіодичним тест-об'єктом для експериментального визначення функції розсіювання лінії (ФРЛ) об'єктивів, що випробуються [1]. За результатами декількох вимірювань осереднені значення ФРЛ надходять до комп'ютера, який за певною програмою визначає середні значення МПФ. Для досліджень були використані типові схеми ІЧ об'єктивів з різними значеннями фокусних відстаней, діаметрів вхідної зіниці та кутів поля зору. Похибка, вплив якої аналізується, стосується вимог до чутливості пристроїв ручного або автоматичного фокусування ІЧ об'єктивів, при якій похибка вимірювання МПФ буде знаходитись в межах 5 %.

Принцип вимірювання МПФ та основні теоретичні положення

Схема вимірювального стенда наведена на рис. 1 [1]. Вимірювання засноване на тому, що потік випромінювання від джерела випромінювання 1 (рис. 1) ІЧ діапазону спектру конденсором 2 через світлофільтр 3, що виділяє ділянку спектра необхідного спектрального діапазону, направляється на тест-об'єкт щілину 4, яка розташована у фокальній площині коліматорного об'єктива 5. Випробувальний об'єкт 6 розташований у паралельному пучку променів та встановлений на автоматизований привід 7, який керується через контролер 8 комп'ютером 11. Зображення тест-об'єкта проєктується об'єктивом 6 в площину фокусування фотоприймального пристрою, який містить еталонний мікрооб'єкт і мікробалометричну матрицю 9. Сигнал з матриці обробляється мікропроцесором 10, вводиться у комп'ютер 11, який з використанням перетворення Фур'є за заданим алгоритмом розраховує значення МПФ випробувального об'єктива.

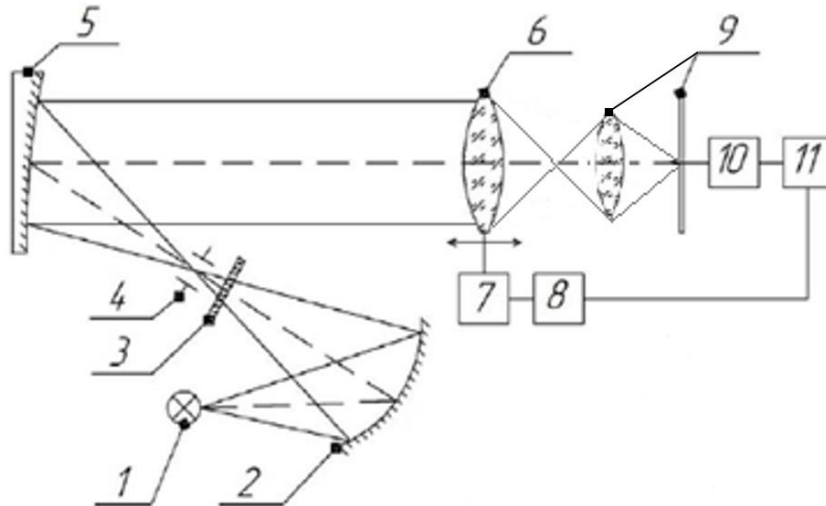


Рис. 1. Схема стенду для вимірювання МПФ інфрачервоних об'єктів

Математично оптична передавальна функція (ОПФ), складовою якої є МПФ, є Фур'є-перетворенням від функції розсіювання крапки або лінії. Під час визначення ФРЛ за допомогою матричного приймача використовується дискретне Фур'є-перетворення згідно зі співвідношенням [1]:

$$\tilde{S}(v'_m) = T \sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k} \exp\left\{-\frac{j2\pi mk}{N}\right\}, \quad (1)$$

де T – період дискретизації значень ФРЛ; $S_{x'k}$ – нормоване значення ФРЛ; $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ – номер відліку у масиві ФРЛ; $m = 0, 1, 2, \dots$ – номер дискретного значення просторової частоти; x' – лінійна координата в площині зображення.

З урахуванням (1) та формули Ейлера МПФ як модуль ОПФ дорівнює:

$$\tilde{S}(v'_m) = \sqrt{\left(\frac{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k} \cos\left(\frac{2\pi mk}{N}\right)}{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k}}\right)^2 + \left(\frac{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k} \sin\left(\frac{2\pi mk}{N}\right)}{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k}}\right)^2}. \quad (2)$$

Якщо площина вимірювання МПФ зсунута по відношенню до фокальної площини ІЧ об'єктива на величину Δ , то значення МПФ відрізняється від розрахункового і визначається зі співвідношення [2]

$$\tilde{S}(R, \Delta) = \frac{4}{\pi a} \cos aR \left\{ \theta J_1(a) - \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{(-1)^n}{2n} \sin(2n\theta) \cdot [J_{2n-1}(a) - J_{2n+1}(a)] \right\} - \frac{4}{\pi a} \sin aR \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \sin[(2n+1)\theta] \cdot [J_{2n}(a) - J_{2n+2}(a)], \quad (3)$$

де $R = \nu \lambda K$ – просторова частота у відносних одиницях; Δ – розфокусування; V – просторова частота в лініях на мм; λ – робоча довжина хвилі об'єктива; $K = \frac{f'}{D}$ – діафрагменне число; $a = \frac{\pi R \Delta}{\lambda K^2}$, $\theta = \arccos R$,

$J_n(a)$ – функції Бесселя n -го порядку.

Співвідношення (3) було використане під час проведення математичного моделювання для визначення вимог до точності пристроїв ручного або автоматичного фокусування ІЧ об'єктивів в стенді вимірювання МПФ.

Результати дослідження

Моделювання проводилось для типових схем ІЧ об'єктивів. Для прикладу конструктивні параметри трьох схем ІЧ об'єктивів [3–5], які працюють в діапазоні довжин хвиль $8\div 12$ мкм, наведені в табл. 1÷3

Таблиця 1

Конструктивні параметри об'єктива № 1

Номер поверхні	Радіус кривизни, мм	Товщина по осі, мм	Матеріал
R1	56,4	6,59	Ge
R2	85,0	5,42	-
R3	-23,0	3,59	Ge
R4	-26,658	43,32	-
R5	23,0	7,15	Ge
R6	27,0	8,19	-
R7	∞	1,0	Ge
R8	∞	2,366	
$f' = 36,98$ мм, діафрагмове число $K = 1:1,24$, поле зору $2\omega = 12^\circ$			

Таблиця 2

Конструктивні параметри об'єктива № 2

Номер поверхні	Радіус кривизни, мм	Товщина по осі, мм	Матеріал
R1	55,56	6,59	ІКС25
R2	158,63	5,42	-
R3	505,84	3,59	ZnSe
R4	92,63	43,32	-
R5	20,65	7,15	ІКС25
R6	21,41	8,19	
$f' = 50,1$ мм, діафрагмове число $K = 1:1$, поле зору $2\omega = 12^\circ$			

Таблиця 3

Конструктивні параметри об'єктива № 3

Номер поверхні	Радіус кривизни, мм	Товщина по осі, мм	Матеріал
R1	90,92	10,54	ІКС25
R2	291,28	8,88	-
R3	1017,81	6,13	ZnSe
R4	151,95	71,90	-
R5	30,92	5,55	Ge
R6	31,17	13,89	
$f' = 85,77$ мм, діафрагмове число $K = 1:1$, поле зору $2\omega = 8^\circ$			

Моделювання проводилося з використанням програми ZEMAX. До уваги приймалися залежності, за яких зсув Δ площини вимірювання МПФ спричиняв появу похибки її вимірювання в межах $\pm 5\%$. На рис. 2÷4 представлені графіки МПФ при розрахунковому положенні фокальної площини об'єктивів 1÷3 і при її зсувах, що спричиняють похибку вимірювання МПФ в межах 5%.

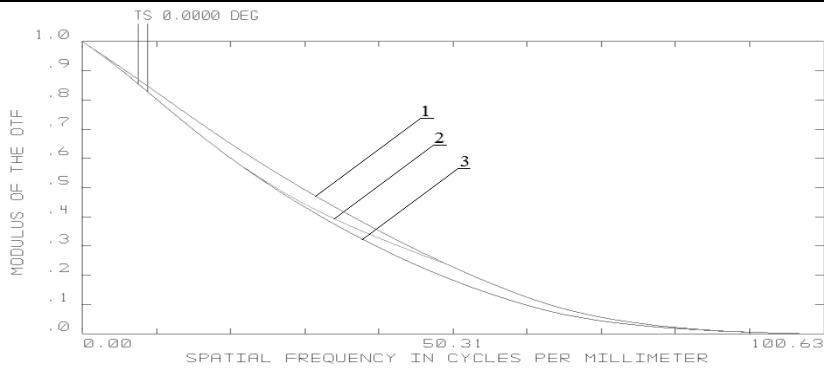


Рис. 2. Графік МПФ об'єктива 1: 1 – розрахункове положення фокального відрізка, 2 – зменшення фокального відрізка на 0.009 мм, 3 – збільшення фокального відрізка на 0.007 мм

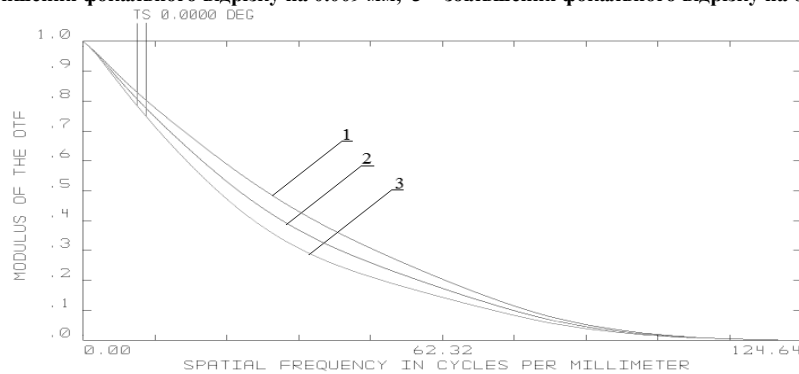


Рис. 3. Графік МПФ об'єктива 2: 1 – розрахункове положення фокального відрізка, 2 – зменшення фокального відрізка на 0.019 мм, 3 – збільшення фокального відрізка на 0.016 мм

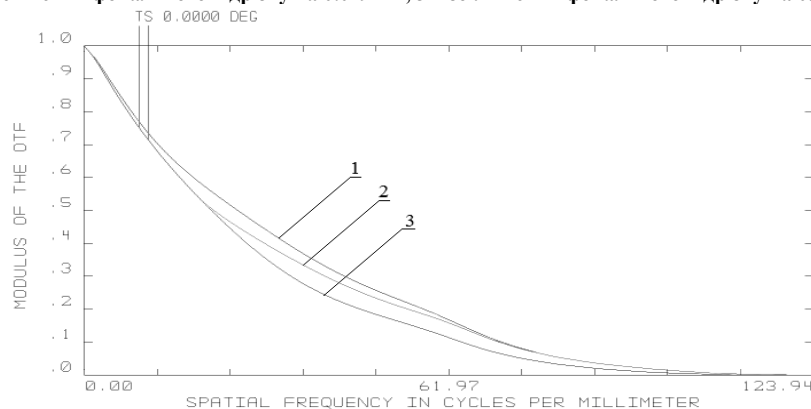


Рис. 4. Графік МПФ об'єктива 3: 1 – розрахункове положення фокальної площини, 2 – зменшення фокального відрізка на 0.026 мм, 3 – збільшення фокального відрізка на 0.018 мм

Математичне моделювання показало наступне:

- існують певні вимоги до пристроїв позиціонування ІЧ об'єктивів в стенді для вимірювання МПФ, що обумовлюють точність вимірювання в межах 5 %;
- зі зменшенням фокального відрізка об'єктива точність пристроїв позиціонування повинна бути підвищена;
- вимоги до пристроїв позиціонування в разі збільшення фокального відрізка жорсткіші і знаходяться в межах 7÷18 мкм;
- вимоги до пристроїв позиціонування в разі зменшення фокального відрізка знаходяться в межах 9÷26 мкм.

Висновки

Можливі відхилення фокального відрізка ІЧ об'єктивів від розрахункового значення, обумовлені похибками конструктивних параметрів, призводять до похибки визначення МПФ. Для зменшення впливу похибки визначення МПФ вимірювальний стенд повинен мати пристрої точного позиціонування об'єктива, який контролюється. Найбільш шкідливими є випадки, коли фокальний відрізок об'єктива збільшується по відношенню до розрахункового значення. Математичне моделювання показало, що похибка пристроїв позиціонування для забезпечення похибки вимірювання МПФ в 5 % повинна не перебільшувати 7÷9 мкм.

Література

1. Кучеренко О. К. Контроль качества сборки и юстировки объективов тепловизионных систем / О.К. Кучеренко И.А. Медведь // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2012. – № 1. – С. 26–30.

2. Шульман М.Я. Автоматическая фокусировка оптических систем / Шульман М.Я. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1990. – 224 с.
3. Патент 116386 Укр, МПК G02B 9/12. Інфрачервоний світлосильний трилінзовий об'єктив / Банделюк О. В., Гусев А. Ю., Колобродов В. Г. – № u 201606546 ; заявл. 15.06.2016 ; опубл. 25.05.2017, Бюл. № 10.
4. Патент 118054 Укр, МПК G02B 13/14. Інфрачервоний об'єктив з термостабілізованою якістю зображення / Муравйов О. В., Романюк Т. А. – № u 201613027 ; заявл. 20.12.2016 ; опубл. 25.07.2017, Бюл. № 14.
5. Патент 108282 Укр, МПК G02B 9/14. Трилінзовий атермальний світлосильний об'єктив для інфрачервоного діапазону спектру / Тягур В. М., Лихоліт М. І., Варьонова Г. Л. – № u 201308394 ; заявл. 04.07.2013 ; опубл. 12.01.2015, Бюл. № 11.

References

1. Kucherenko O. K. Kontrol kachestva sborki i yustirovki obektivov teplovizionnyh sistem / O.K. Kucherenko I.A. Medved // Vimiryuvalna ta obchislyuvalna tehnika v tehnologichnih procesah. – 2012. – № 1. – S. 26–30.
2. Shulman M.Ya. Avtomaticheskaya fokusirovka opticheskikh sistem / Shulman M.Ya. – L. : Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1990. – 224 s.
3. Patent 116386 Ukr, MPK G02B 9/12. Infrachervonyi svitlosylnyi trylinzovyi obiektyv / Bandeliuk O. V., Husiev A. Yu., Kolobrodov V. H. – № u 201606546 ; zaiavl. 15.06.2016 ; opubl. 25.05.2017, Biul. № 10.
4. Patent 118054 Ukr, MPK G02B 13/14. Infrachervonyi obiektyv z termostabilizovanoiu yakistiu zobrazhennia / Muraviov O. V., Romaniuk T. A. – № u 201613027 ; zaiavl. 20.12.2016 ; opubl. 25.07.2017, Biul. № 14.
5. Patent 108282 Ukr, MPK G02B 9/14. Trylinzovyi atermalnyi svitlosylnyi obiektyv dlia infrachervonoho diapazonu spektru / Tiahur V. M., Lykholit M. I., Varonova H. L. – № u 201308394 ; zaiavl. 04.07.2013 ; opubl. 12.01.2015, Biul. № 11.

Рецензія/Peer review : 24.12.2019 р.

Надрукована/Printed : 16.01.2020

Рецензент: к.т.н. Сокуренько В.М.