

УДК 621.384.3

*А.В. Опіч, студент гр. ПО-62м, к.т.н., доц. Кучеренко О.К.
КПІ ім. Ігоря Сікорського*

ВИЗНАЧЕННЯ ВИМОГ ДО ТОЧНОСТІ БАЗУВАННЯ ІНФРАЧЕРВОНИХ ОБ'ЄКТИВІВ ПРИ ВИМІРЮВАННІ МОДУЛЯЦІЙНОЇ ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ

Анотація. В роботі визначаються вимоги до точності базування інфрачервоних об'єктивів при вимірюванні 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. При базуванні об'єктива в стенді для визначення МПФ можливі похибки розташування аналізатора якості зображення по відношенню до площини найкращої установки. Автори визначають вимоги до точності базування типових інфрачервоних об'єктивів в стенді вимірювання МПФ.

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

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 побудови зображення об'єктивом 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 по стандартизації (International Organization for Standardization - ISO) прийняла його як основний для оцінки якості ОС.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

В роботі було поставлене завдання визначити які вимоги слід встановити при установці типових ІЧ об'єктивів в стенд для вимірювання МПФ, щоб похибка її визначення не перевищувала 5%. Для досліджень були використані запатентовані схеми ІЧ об'єктивів з різними значеннями фокусних відстаней та кутів поля зору [2–4]. Похибка, вплив якої аналізувався, стосувалася можливого зсуву об'єктива вздовж вісі вимірювального стенда, що приводить до розфокусування фотоприймального аналізатора якості зображення.

ПРИНЦИП ВИМІРЮВАННЯ МПФ ТА ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Математично оптична передавальна функція (ОПФ), складовою якої є МПФ є Фур'є-перетворенням від функції розсіювання крапки або лінії. При визначенні ФРЛ за допомогою матричного приймача використовується дискретне Фур'є-перетворення згідно співвідношення [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:

$$|T(v'_m)| = \sqrt{\left(\frac{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k} \cos\left(\frac{2\pi mk}{N}\right)}{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k}}\right)^2 + \left(\frac{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k} \sin\left(\frac{2\pi mk}{N}\right)}{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k}}\right)^2} \quad (2)$$

Вимірювання МПФ проводяться на стенді, схема якого представлена на рис.1.

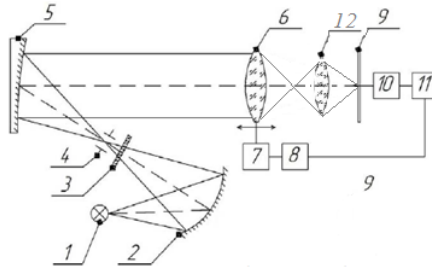


Рисунок. 1. Схема стенду для вимірювання МПФ об'єктів для ІЧ спектру.

Принцип вимірювання заснований на тому, що потік випромінювання від джерела випромінювання 1 ІЧ діапазону спектру конденсором 2 через світлофільтр 3, виділяє ділянку спектра необхідного спектрального діапазону, направляється на 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. Мікрооб'єктив 12 переносить зображення з фокальної площини випробувального об'єктива на аналізатор зображення мікроболометричну матрицю 9. Сигнал з матриці обробляється мікропроцесором 10, вводиться у комп'ютер 11, який по заданому алгоритму розраховує значення МПФ випробувального об'єктива.

У вимірювальних стендах для контролю зборки та юстування ІЧ-об'єктів можуть мати місце дефокусування, тобто неточність у взаємному положенні випробувального об'єктива та площини аналізатора зображення. Ці дефокусування можуть призвести до помилкових результатів при вимірюванні МПФ та можуть бути сприйняті як результат похибки пов'язаної з збурою об'єктива.

МПФ при дефокусуванні випадку симетричної зінічної функції, може бути розрахована наступним чином [5]:

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

де $R = \nu \lambda K$ – просторова частота у відносних одиницях, Δ – дефокусування, ν – просторова частота в лініях/мм, λ – робоча довжина хвилі об'єкта, $K = \frac{f'}{D}$ – діафрагмове число, $a = \frac{\pi R \Delta}{\lambda K^2}$, $\Theta = \arccos R$, n – порядок ф-ції Беселя $J_n(a)$.

З (3) видно, що дефокусування має значний вплив на вимірювальну МПФ ІЧ-об'єкта.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для визначення вимог до точності базування ІЧ об'єктів при вимірюванні МПФ у стендах контролю якості збірки та юстування ІЧ об'єктів було проведено комп'ютерне моделювання, яке дозволяє оцінити вплив дефокусування на похибку вимірювання МПФ. Для моделювання були взяті конструктивні параметри трьох типових ІЧ об'єктів, які працюють в діапазоні довжин хвиль 8-12 мкм. Значення цих параметрів показані в табл. 1-3. [2–4]

Таблиця 1. Конструктивні параметри випробувального об'єкта з $f' = 36,98$ мм, діафрагмове число $K = 1:1,24$, поле зору $2\omega = 12^\circ$.

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	

Таблиця 2. Конструктивні параметри випробувального об'єкта з $f' = 50,1$ мм, діафрагмове число $K = 1:1$, поле зору $2\omega = 12^\circ$.

Номер поверхні	Радіус кривизни, мм	Товщина по осі, мм	Матеріал
R1	55,56	6,59	IKC25
R2	158,63	5,42	
R3	505,84	3,59	ZnSe
R4	92,63	43,32	
R5	20,65	7,15	IKC25
R6	21,41	8,19	

Таблиця 3. Конструктивні параметри другого випробувального об'єкта з $f' = 85,77$ мм, діафрагмове число $K = 1:1$, поле зору $2\omega = 8^\circ$.

Номер поверхні	Радіус кривизни, мм	Товщина по осі, мм	Матеріал
R1	90,92	10,54	IKC25
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	

Моделювання проводилося з використанням програми ZEMAX. Розрахунки відхилень значення МПФ в залежності від розфокусувань проводилося на частоті Найквіста. Максимально допустимий зсув мікроболометричної матриці фотоприймального пристрою визначався з припущення, що похибка вимірювання МПФ не повинна перевищувати $\pm 5\%$. На рис. 2–4 представлені графіки МПФ при розрахунковому положенні приймача і при можливих розфокусуваннях.

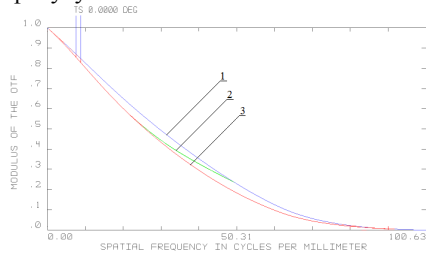


Рисунок 2. Графіки МПФ при 1 – розрахунковому положенні приймача, 2 – при розфокусуванні в -0,026мм, 3 – при розфокусуванні в +0,018мм.

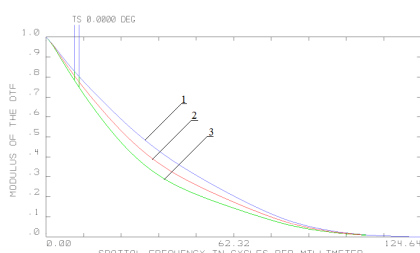


Рисунок 3. Графіки МПФ при 1 – розрахунковому положенні приймача, 2 – при розфокусуванні в -0,005мм, 3 – при розфокусуванні в +0,007мм.

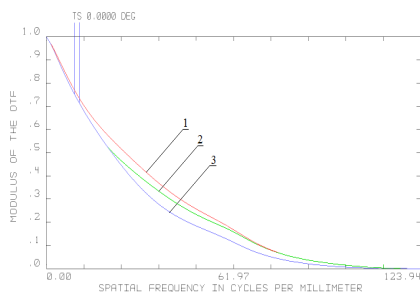


Рисунок 4. Графіки МПФ при 1 – в розрахунковому положенні приймача, 2 – при розфокусуванні в -0,01971мм, 3 – при розфокусуванні в +0,0166мм.

Як видно з графіків, при похибці визначення МПФ на частоті Найквіста 5% допустимі розфокусування складають:

– для об'єктива з $f' = 36,98$,
 $\Delta z = 0.044$ мм;

– для об'єктива з $f' = 50,1$,
 $\Delta z = 0.012$ мм;

– для об'єктива з $f' = 85,77$,
 $\Delta z = 0.03635$ мм;

ВИСНОВКИ

Похибка базування об'єктива у вимірювальному стенді суттєво впливає на результат вимірювання МПФ. Найбільш шкідливим є можливе пересування матричного приймача в напрямку до об'єктива який досліджується. Допустимі значення похибок базування знаходяться в межах від 0.005мм до 0.026мм при зсуві матриці до об'єктива і від 0.007мм до 0.018мм при зсуві в протилежному напрямку. Подальші дослідження будуть спрямовані на оцінку інших похибок вимірювального стенда.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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. Патент 116386 UA, МПК G02B 9/12 (2006.01) G02B 13/14 (2006.01) G02B 13/16 (2006.01) Інфрачервоний світлосильний трилінзовий об'єктив / Банделюк О. В., Гусєв А. Ю., Колобродов В. Г. ; заявник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». — № u 201606546 ; заявл. 15.06.2016 ; опубл. 25.05.2017, Бюл. № 10, 2017 р.

3. Патент 118054 UA, МПК G02B 13/14 (2006.01) Інфрачервоний об'єктив з термостабілізованою якістю зображення / Муравйов О. В., Романюк Т. А. ; заявники Муравйов Олександр Володимирович, Романюк Тетяна Анатоліївна. — № u 201613027 ; заявл. 20.12.2016 ; опубл. 25.07.2017, Бюл. № 14, 2017 р.

4. Патент 108282 UA, МПК G02B 9/14 (2006.01) G02B 13/14 (2006.01) Трилінзовий атермальний світлосильний об'єктив для інфрачервоного діапазону спектру / Тягур В. М., Лихоліт М. І., Варьонова Г. Л. ; заявник Казенне підприємство спеціального приладобудування «Арсенал». — № u 201308394 ; заявл. 04.07.2013 ; опубл. 12.01.2015, Бюл. № 11, 2015 р

5. Шульман М.Я. Автоматическая фокусировка оптических систем /М.Я. Шульман – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1990. – 224с.