

ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 535.21

В.І. Гордієнко, В.Г. Колобродов

ПРОЕКТУВАННЯ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ТЕПЛОВІЗОРА

Вступ

Тепловізори знаходять своє широке застосування в різних сферах виробництва, космосі і військовій техніці [1–3]. Головне їх призначення – формування на екрані дисплея зображення теплоконтрастних об'єктів, тобто перетворення яскравості об'єктів з інфрачервоної області спектра у видиме зображення на екрані. Вони, як правило, складаються з таких основних елементів: оптичної системи (ОС), приймача випромінювання (ПВ), блоків аналогової і цифрової обробки відеосигналу та дисплея. Проектуванню ОС присвячено багато підручників і монографій, в основі яких лежать габаритний та абераційний розрахунки [1, 4]. В той же час, нема досліджень з проектування ОС, яка б забезпечила задані узагальнені характеристики тепловізора.

Постановка задачі

Метою даної статті є розробка методу проектування інфрачервоної оптичної системи, яка забезпечує необхідні узагальнені характеристики тепловізора – кутового поля зору, температурної чутливості і просторового розділення.

Вихідні положення

Оптичні системи тепловізорів формують інфрачервоне зображення об'єкта в площині ПВ (при цьому забезпечується необхідне просторове розділення – якість зображення і енергетичне розділення – світлосила) та забезпечують оптично-механічний просторовий аналіз у заданому полі зору (якщо в цьому є потреба) [1].

Першу функцію виконує об'єктив, а другу – система сканування. Основна вимога до ОС – щоб вона мала великий (достатній) коефіцієнт пропускання в робочому спектральному діапазоні 8–14 мкм. Оптичній системі належить забезпечити температурну чутливість і просторове розділення тепловізора.

Температурну чутливість тепловізора будемо визначати еквівалентною шуму різницею температур (ЕШРТ) NETD (Noise Equivalent Temperature Difference). ЕШРТ – це різниця температур між стандартним тест-об'єктом і фоном, які випромінюють як абсолютно чорне тіло. За такої різниці температур відношення пікового значення сигналу до шуму на виході стандартного еталонного фільтра дорівнює одиниці. Для розрахунку ЕШРТ будемо використовувати формулу [5]

$$\text{NETD} = \frac{4k_{\text{eff}}^2}{\tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda} \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}}, \quad (1)$$

де k_{eff} і τ_o – ефективне діафрагмове число і середній коефіцієнт пропускання ОС, відповідно; $D^*(\lambda)$ – питома виявлювальна здатність ПВ; $M_\lambda(\lambda, T)$ – функція Планка; Δf – ефективна шумова смуга пропускання еталонного фільтра; A_D – площа пікселя ПВ.

Синтез оптичної системи

Виходячи з умови використання тепловізора і доцільності, вибираємо ПВ, а ОС задаємо такими параметрами, як робочий спектральний діапазон λ_1 – λ_2 , фокусна відстань f'_o , діаметр вхідної зіниці D_p та мінімальне кутове розділення $\delta\omega_o$. В основу проектування (синтезу) ОС, який складається з п'яти етапів, покладемо рівняння (1).

Перший етап проектування – це вибір оптимального робочого спектрального діапазону на основі критерію максимального температурного розділення. З рівняння (1) матимемо, що для отримання мінімального значення ЕШРТ необхідно забезпечити максимальне значення інтеграла

$$\text{MD} = \max \left\{ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda \right\} \left(\frac{\sqrt{\Gamma_{\text{ц}}}}{\text{К-см}} \right). \quad (2)$$

Другий етап полягає в перевірці можливості реалізації потрібної ОС. Усі параметри ОС у формулі (1), які впливають на температурне розділення, об'єднаємо в коефіцієнти

$$\text{OS} = \frac{\tau_o}{k_{\text{eff}}}. \quad (3)$$

З рівнянь (1) і (3) випливає вимога, яку повинна забезпечити ОС:

$$OS \geq \frac{4}{NETD \cdot MD} \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}}. \quad (4)$$

Якщо значення параметра не задовольняє умову (4), то задана температурна чутливість може бути досягнута при використанні іншого ПВ з більш високою питомою виявлювальною здатністю $D^*(\lambda)$, а значення параметра MD повинно розраховуватися по-новому — за формулою (2).

Третім етапом буде вибір фокусної відстані об'єктива, для якого має виконуватись умова

$$f'_0 \geq \frac{\max\{V_D, W_D\}}{\delta\omega_s}, \quad (5)$$

де $V_D \times W_D$ — розмір пікселя ПВ; $\delta\omega_s$ — кутове розділення тепловізора.

Четвертим етапом буде аналіз технологічних можливостей виготовлення даної ОС. При цьому діаметр входної зіниці об'єктива оцінюватиметься за формулою

$$D_p \geq f'_0 \sqrt{\frac{OS}{\tau_0}}. \quad (6)$$

Це співвідношення випливає з (3). Середній коефіцієнт пропускання ОС τ_0 можна наближено визначити, виходячи з вибраної оптичної схеми об'єктива (лінзового, дзеркально-лінзового або дзеркального). Якщо D_p набуває значень, які технологічно не виконуються, то необхідна температурна чутливість може бути досягнута за рахунок вибору іншого ПВ з більш високою питомою виявлювальною здатністю.

На п'ятому етапі уточнюються дані з просторового розділення. Для випадку, коли модуляційні передавальні функції ОС і ПВ узгоджені між собою і мають однаковий контраст, який дорівнює 0,5, на одній і тій самій просторовій частоті, то кутове розділення тепловізора визначатиметься за формулою [5]

$$\delta\omega_{0,5} = \frac{1,66 \max\{V_D, W_D\}}{f'_0}. \quad (7)$$

Кутове розділення $\delta\omega_{0,5}$ відповідає ОС з контрастом 0,5. Фокусна відстань і діаметр входної зіниці ОС мають вибиратися більшими, ніж граничні, що необхідно для забезпечення тем-

пературної чутливості в разі зображення поза-осьових точок поля зору.

Поле зору тепловізора визначається розміром ПВ $l_{Dx} \times l_{Dy}$, фокусною відстанню ОС f'_0 та збільшенням телескопічної насадки Γ_{ts} . Для матричного ПВ воно розраховується за формулами

$$2\omega_{sx} = 2\arctg \frac{l_{Dx}}{2f'_0} \text{ і } 2\omega_{sy} = 2\arctg \frac{l_{Dy}}{2f'_0}. \quad (8)$$

За наявності оптично-механічної розгортки поле зору визначається параметрами сканування, які залежать від типу розгортки [1]. У деяких тепловізорах використовується насадка у вигляді телескопа Кеплера, кутове збільшення якого визначається фокусними відстанями компонентів: $\Gamma_{ts} = f'_1/f'_2$. При цьому ефективне значення фокусної відстані ОС збільшується в Γ_{ts} разів, а поле зору настільки ж зменшується.

Для забезпечення кутового поля зору $2\omega_{sx} \times 2\omega_{sy}$, яке визначається формулою (8), осесиметрична ОС повинна мати поле зору

$$2\omega_0 = \sqrt{(2\omega_{sx})^2 + (2\omega_{sy})^2}. \quad (9)$$

Приклад проектування оптичної системи

Як приклад застосування наведеної вище методики розглянемо тепловізор Catherine-FC, який виготовляється фірмою "Thales" (Франція). Цей тепловізор має такі узагальнені характеристики:

- 1) температурна чутливість $NETD = 180$ мК;
- 2) широке поле зору $2\omega_x \times 2\omega_y = 9^\circ \times 6,7^\circ$;
- 3) формат кадру $p \times q = 754 \times 576$.

У тепловізорі Catherine-FC використовується матричний приймач випромінювання SOFRADIR IRCCD 288×4 (ID TL061-XX), який має відповідні параметри:

- 1) розмір матриці $l_{Dx} \times l_{Dy} = 0,38 \times 8,06$ мм²;
- 2) розмір пікселя $V_D \times W_D = 25 \times 28$ мкм²;
- 3) формат матриці $p_D \times q_D = 4 \times 288$;
- 4) робочий спектральний діапазон $\lambda_1 - \lambda_2 = 7,7 - 10,3$ мкм;
- 5) питома виявлювальна здатність $D^*(\lambda_2) =$

$$= 1,5 \cdot 10^{11} \text{ Jones } \left(\frac{\text{см} \sqrt{\Gamma_{\Pi}}}{\text{Вт}} \right);$$

б) діаметр і діафрагмове число холодної діафрагми $D_D = 7,2$ мм і $k_D = 1,67$, відповідно.

Для визначення фокусної відстані f'_o , діаметра вхідної зіниці D_p , поля зору $2\omega_o$ і кутового розділення $\delta\omega_o$ виконаємо відповідні розрахунки.

1. Кутове поле зору ОС обчислимо за формулою (9):

$$2\omega_o = \sqrt{9^2 + 6,7^2} = 11,2^\circ.$$

2. Еквівалентну фокусну відстань f'_o визначимо таким чином: число рядків у кадрі $q = 576$ забезпечимо послідовно-паралельним скануванням матричним приймачем випромінювання з числом рядків $q_D = 288$ за два проходи. Це означає, що поле зору $2\omega_y = 6,7^\circ$ буде забезпечуватись двома розмірами ПВ: $2l_{Dy} = 16,12$ мм. Тому $\text{tg } \omega_y = l_{Dy} / f'_o$, звідки $f'_o = \frac{l_{Dy}}{\text{tg } \omega_y} = \frac{8,06}{\text{tg } 3,35^\circ} = 138$ мм.

3. Кутове розділення ОС, узгоджене з розміром пікселя, визначатимемо з (5) як

$$\delta\omega_o = \frac{\max\{V_D, W_D\}}{f'_o} = \frac{28 \cdot 10^{-3}}{138} = 0,2 \text{ мрад}.$$

4. Діаметр вхідної зіниці D_p ОС будемо визначати в певній послідовності.

4.1. Спочатку розрахуємо параметр MD за формулою (2). Для фотонного ПВ ID TL061-XX, який використовується в тепловізорі Catherine-FC, формулу (2) подамо у вигляді [5]

$$MD = \frac{c_2 D^*(\lambda_2)}{\lambda_2 T_t^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_\lambda(\lambda, T_t) d\lambda, \quad (10)$$

де $D^*(\lambda_2) = 1,5 \cdot 10^{11}$ см $\sqrt{\text{Гц}}/\text{Вт}$ — питома виявлювальна здатність ПВ; $c_2 = 14388$ мкм $\cdot$ К — сталий коефіцієнт у формулі Планка; $T_t = 288$ К — температура тест-об'єкта згідно із стандартом НАТО 4347 [5]; $\lambda_1 - \lambda_2 = 7,7 - 10,3$ мкм — робочий спектральний діапазон ПВ. Розрахунок за формулою (10) в MathCAD дасть такий результат:

$$MD = 1,6 \cdot 10^7 \sqrt{\text{Гц}} / (\text{К} \cdot \text{см}).$$

4.2. Для забезпечення заданої температурної чутливості $\text{NETD} = 180$ мК має виконуватись умова (4), де $A_D = 7 \cdot 10^{-6}$ см 2 — площа чутливої площадки пікселя. Система розгортки визначає ефективну шумову смугу, яку можна обчислити за формулою [5]

$$\Delta f = \frac{pqf_f}{2q_D}, \quad (11)$$

де $p \times q = 754 \times 576$ — формат кадру; $f_f = 100$ Гц — частота кадрів; $q_D = 288$ — число рядків у ПВ. Тоді $\Delta f = 75,4$ кГц.

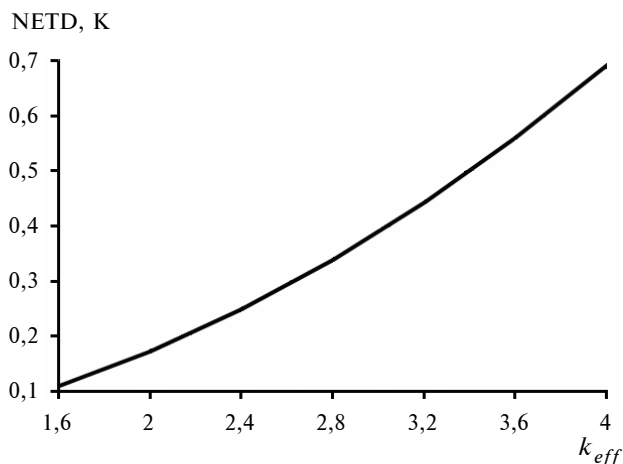
У цьому випадку умова (4) матиме вигляд $\text{OS} \geq 0,15$.

4.3. Діаметр вхідної зіниці знайдемо за формулою (6) при умові, що для складної ОС тепловізора $\tau_o = 0,6$. Тоді $D_p \geq 69$ мм.

Аналіз результатів проектування ОС

Розглянемо потенційні можливості тепловізора Catherine-FC. Максимально можливий відносний отвір ОС визначається відносним отвором або діафрагмовим числом ПВ, тобто $k_{eff} \geq k_D = 1,67$. Якщо ОС складається з кількох оптичних елементів з просвітленими поверхнями, то її коефіцієнт пропускання може досягати значень $\tau_o \geq 0,8$. Підставимо граничні значення параметрів $k_{eff} = 1,67$ і $\tau_o = 0,8$ у формулу (3): $\text{OS} = 0,48$. Для такої ОС температурна чутливість тепловізора (1) матиме значення $\text{NETD} > 0,087$ К. В деяких перспектах тепловізор Catherine-FC має еквівалентну шуму різницю температур $\text{NETD} = 80$ мК. Цей факт підтверджує достовірність розробленої методики проектування ОС тепловізорів.

Залежність температурної чутливості NETD від ефективного діафрагмового числа ОС k_{eff} при незмінних раніше наведених параметрах тепловізора подано на рисунку. Аналіз цієї залежності свідчить про те, що зменшення діафрагмового числа є найефективнішим способом зменшення ЕШРТ (збільшення температурної чутливості). Однак при цьому слід пам'ятати, що зменшення k_{eff} призводить до ускладнення ОС і збільшення її вартості. Тому при проектуванні ОС необхідно шукати компроміс між вартістю тепловізора і його температурною чутливістю.



Залежність температурної чутливості тепловізора Catherine-FC від діафрагмового числа оптичної системи

Висновки

1. Розроблений метод дає можливість визначити такі параметри оптичної системи, як

поле зору, фокусну відстань, діаметр вхідної зіниці і кутове розділення, які забезпечують задані просторове та енергетичне (температурне) розділення тепловізора.

2. Застосування методу до проектування оптичної системи тепловізора Catherine-FC і порівняння отриманих результатів з паспортними даними тепловізора підтвердили достовірність запропонованого методу.

3. Підвищити температурну чутливість або зменшити еквівалентну шуму різницю температур можна за рахунок зменшення ефективного діафрагмового числа оптичної системи. Однак це число обмежене відносним отвором вхідної апертури приймача випромінювання.

У подальшому доцільно дослідити шляхи створення оптичної системи тепловізора з високим коефіцієнтом пропускання і малим діафрагмовим числом.

В.И. Гордиенко, В.Г. Колобродов

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОВИЗОРА

Предложен метод проектирования оптической системы тепловизора, которая обеспечивает его заданные характеристики. Рассмотрен пример расчета поля зрения, фокусного расстояния, диаметра входного зрачка и углового разрешения объектива.

V.I. Gordienko, V.G. Kolobrodov

DESIGNING OF THE OPTICAL SYSTEM FOR THE THERMAL IMAGER

The paper presents a method of designing of the optical system which provides set characteristics of the thermal imager. Crucially, we illustrate a sample of calculation of a FOV, a focal length, an entrance pupil diameter and the angular resolution of the objective.

1. Колобродов В.Г., Шустер Н. Тепловізійні системи (фізичні основи, методи проектування і контролю, застосування): Підручник для вузів. — К.: Тираж, 1999. — 340 с.
2. Орлов В.А., Петров В.И. Приборы наблюдения ночью и при ограниченной видимости. — М.: Воениздат, 1989. — 212 с.
3. Белозёров А.Ф., Иванов В.М. Современные зарубежные тепловизионные приборы // Опт. журн. — 2003. — 70, № 10. — С. 62–71.

4. Ллойд Дж. Системы тепловидения / Пер. с англ. — М.: Мир, 1978. — 416 с.
5. Колобродов В.Г., Лихолім М.І. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження: Підручник. — К.: НТУУ "КПІ", 2007. — 364 с.