

УДК 537.533.3

**ДОВЖУК Д.В.**, начальник науково-дослідної лабораторії, кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник

**ЛОГВИНЕНКО М.М.**, старший науковий співробітник

**ВАБІЩЕВИЧ О.В.**, науковий співробітник

## **ЗАСТОСУВАННЯ ДВОХ СПЕКТРАЛЬНИХ ДІАПАЗОНІВ У ТЕПЛОВІЗІЙНИХ ПРИЛАДАХ**

*Розглядається можливість отримання теплового зображення об'єктів шляхом застосування співвідношення сигналів у двох рознесених спектральних діапазонах.*

*Ключові слова: спектральний діапазон, тепловізійний прилад, безперешкодний рух вночі і вдень.*

У воєнно-технічній галузі тепловізійні прилади використовуються для спостереження за полем бою та об'єктами на ньому, а також для прицілювання при стрільбі по цих об'єктах з будь-якої зброї, організації самонаведення керованих засобів ураження. Крім того, тепловізійні прилади використовуються на літальних апаратах як засіб, що забезпечує безперешкодний рух вночі і вдень у складних метеорологічних умовах та під час застосування противником організованих активних або пасивних засобів протидії і маскування.

Сучасні авіаційні тепловізійні прилади дозволяють виявляти, спостерігати та супроводжати замасковані об'єкти за їх тепловим контрастом [1].

Принцип дії тепловізійного приладу полягає у перетворенні тривимірного простору інфрачервоних випромінювачів у двовимірне видиме зображення за законами термографії та лінійної оптики, а саме, отриманні зображення об'єктів, розподіл видимої яскравості у яких пропорційний розподілу енергетичної яскравості у інфрачервоній зоні спектру. Це перетворення виконується шляхом послідовного аналізу об'єкта миттєвим полем зору оптичної системи тепловізійного приладу площею  $S$ .

Миттєве поле зору вибирається відносно малим та таким, яке швидко рухається по об'єкту спостереження. Розподіл інфрачервоної яскравості  $L(y, z)$  об'єкта, що залежить від просторового розподілу його температури  $T(y, z)$  та коефіцієнта випромінювання  $e(y, z)$ , сканується площиною  $S$  та перетворюється у електричний сигнал  $U(t)$  приймачем випромінювання, амплітуда якого змінюється у часі відповідно зі зміною розподілу температури об'єкта.

За допомогою відповідного кодування, що залежить від закону сканування, електричний сигнал  $U(t)$  перетворюється у відеосигнал. Після підсилення відеосигнал  $U(t)$  надходить у блок візуалізації, розгортка у якому синхронізована зі скануванням під час аналізу. Отримане зображення має видиму яскравість, пропорційну інфрачервоній яскравості у відповідній точці об'єкта спостереження [2].

Для визначення відповідності між амплітудою відеосигналу  $U_a$  та температурою  $T_0$  об'єкту повинні бути побудовані градуїруючі (узгоджувальні) залежності, що обумовлені характеристиками елементів системи: об'єктива, спектрального фільтру, приймача випромінювання та іншими.

Для градуювання тепловізійної системи використовують джерело випромінювання на базі чорного тіла з каліброваними отворами, за допомогою чого досягається можливість визначення кожній величині відеосигналу відповідне значення температури чорного тіла. Ця температура називається енергетичною або радіаційною  $T_p$ . Для сірих випромінювачів співвідношення між реальною  $T_0$  і радіаційною  $T_p$  температурами має вигляд [3]

$$T_p = T_0 \sqrt[4]{e_0}, \quad (1)$$

де  $e_0$  - коефіцієнт випромінювання об'єкта.

Виходячи з того, що коефіцієнт випромінювання сірого випромінювача менш за 1,0, тому радіаційна температура  $T_p$ , що отримана при його спостереженні, завжди менша реальної температури  $T_0$  об'єкта [3].

При дослідженні розподілів теплових полів реальних об'єктів приладом, що працює в одному спектральному діапазоні  $\Delta I$ , неможливо визначити співвідношення між їх реальною температурою  $T_0$  та коефіцієнтом випромінювання  $e_0$ .

Це призводить до того, що візуалізоване за допомогою тепловізійного приладу зображення об'єкта спостереження не відповідає реальному розподілу температур.

Для того, щоб уникнути цього недоліку та більш достовірно визначити теплові характеристики об'єкта, у тепловізійному приладі використовують двоспектральний метод обробки сигналу. Суть цього методу полягає в тому, що тепловізійний прилад має два приймача теплового випромінювання, які працюють у різних спектральних діапазонах  $\Delta I_1$  і  $\Delta I_2$ . При цьому формуються два відеосигнали  $U_1(t)$  і  $U_2(t)$ , що синхронізовані між собою в часі, а для візуалізації використовується один з них [2].

На відміну від односпектрального метода - двоспектральний дозволяє спостерігати дві різні у тепловому відношенні зони. Якщо ці дві зони мають однакові значення щільності потоку випромінювання  $R_g$  у спектральному діапазоні  $\Delta I_1$ , притому, що більш висока температура однієї зони компенсується меншим для неї значенням коефіцієнта випромінювання, тоді у спектральному діапазоні  $\Delta I_2$  співвідношення указаних параметрів буде іншим. Таким чином, у спектральному діапазоні  $\Delta I_2$  між двома зонами буде спостерігатися тепловий контраст, відсутній в діапазоні  $\Delta I_1$ .

Енергетичне співвідношення для двох зон об'єкта характеризується значеннями температури і коефіцієнта випромінювання  $T_{01}$  і  $e_{01}$  та  $T_{02}$  і  $e_{02}$  відповідно.

Існує однозначний аналітичний зв'язок між температурою  $T_0$  об'єкта, коефіцієнтом випромінювання  $e_0$  та значенням щільності потоку випромінювання  $R_\epsilon$  у відповідному спектральному діапазоні  $\Delta l$  [2, 3]

$$R_\epsilon = e_0 \int_{l_1}^{l_2} R(l, T_0) dl . \quad (2)$$

Однак, якщо для одного діапазону  $\Delta l_1$  для двох пар значень  $T_{01}$  і  $e_{01}$ ,  $T_{02}$  і  $e_{02}$  щільності потоку випромінювання  $R_{\epsilon 1}$  та  $R_{\epsilon 2}$  будуть мати однакові значення

$$e_{01} \int_{l_1}^{l_2} R(l, T_{01}) dl = e_{02} \int_{l_1}^{l_2} R(l, T_{02}) dl , \quad (3)$$

то для іншого діапазону  $\Delta l_2$ , при тих же значеннях  $T_{01}$  і  $e_{01}$  та  $T_{02}$  і  $e_{02}$ , щільності потоку випромінювання  $R_{\epsilon 1}$  та  $R_{\epsilon 2}$  напевно будуть відрізнятися

$$e_{01} \int_{l_3}^{l_4} R(l, T_{01}) dl \neq e_{02} \int_{l_3}^{l_4} R(l, T_{02}) dl , \quad (4)$$

де  $l_1$  і  $l_2$ ,  $l_3$  і  $l_4$  - границі спектральних діапазонів  $\Delta l_1$  і  $\Delta l_2$  відповідно.

Принцип дії двоспектрального тепловізійного приладу пояснимо наступним прикладом. Нехай два сірих тіла мають такі характеристики:  $T_{01} = 300K$ ,  $e_{01} = 0,95$  і  $T_{02} = 330K$ ,  $e_{02} = 0,62$  та створюють два теплових зображення, що мають загальну границю.

В спектральному діапазоні  $\Delta l_1 = 8K14mkm$  обидва об'єкти мають однакові значення щільності потоку випромінювання  $R_\epsilon$ , що визначаються за допомогою (2)  $R_{B1} = R_{B2} = 1,42 Bm / cm^2$ .

Зображення містить дві зони, які не відрізняються між собою за значеннями щільності потоку випромінювання  $R_{\epsilon 1}$  та  $R_{\epsilon 2}$ .

А в спектральному діапазоні  $\Delta l_2 = 3K5mkm$  значення щільності потоків випромінювання, що створено об'єктами спостереження, відрізняються між собою  $R_{B1} = 5,67 * 10^{-4} Bm / cm^2$ ,  $R_{B2} = 1,00 * 10^{-3} Bm / cm^2$ .

В цьому випадку візуалізоване зображення має дві зони, що відрізняються між собою.

Аналогічним чином можна підібрати такі пари значень температури і коефіцієнта випромінювання, при яких візуалізоване зображення двох об'єктів буде мати тепловий контраст в діапазоні довжин хвиль  $\Delta l_1 = 8K14mkm$ , а в діапазоні довжин хвиль  $\Delta l_2 = 3K5mkm$  значення щільності потоку випромінювання  $R_{B1}$  та  $R_{B2}$  не буде відрізнятися між собою.

Основним недоліком двоспектрального тепловізійного приладу, принцип дії

якого описаний в [2], є те, що при візуалізації теплового зображення в реальному масштабі часу неможливо одночасно використовувати сигнали двох спектральних діапазонів. Тому спочатку використовується сигнали одного спектрального діапазону, а потім другого. Однак, це може призвести до того, що оператор не завжди буде спроможним виявити теплоконтрастні об'єкти, а процес вимірювання температури не завжди дає точні результати. Для підвищення достовірності при проведенні термографічних досліджень об'єктів доцільно при формуванні відеосигналу використовувати не тільки абсолютні значення потоків випромінювання двох спектральних діапазонів, але й ще деякі співвідношення цих значень.

Аналіз аналітичних залежностей (2) та (3) показує, що значення амплітуди відеосигналу залежить тільки від абсолютної температури випромінювання. У цьому випадку амплітуда відеосигналу  $U_a$  визначається як співвідношення амплітуд вихідних сигналів  $U_a(\Delta I_1)$  та  $U_a(\Delta I_2)$  каналів, що працюють в спектральних діапазонах  $\Delta I_1$  і  $\Delta I_2$  відповідно

$$U_a = \frac{U_a(\Delta I_1)}{U_a(\Delta I_2)} \quad (4)$$

Значення вихідних сигналів  $U_a(\Delta I_1)$  та  $U_a(\Delta I_2)$  обох каналів тепловізійного приладу залежать від інтегральної чутливості  $S_{U_a(\Delta I_1)}$  і  $S_{U_a(\Delta I_2)}$  їх приймачів випромінювання та значення величини потоку інфрачервоного випромінювання, що створюється об'єктом спостереження на відстані  $L$  від тепловізійного приладу [4].

$$U_a(\Delta I_1) = \frac{t_{01} S_{o\delta 1} S_1 e_0 K_{\Delta I_1} S_{U(\Delta I_1)} \mathcal{S} T_0^4 L R_{B\Delta I_1}}{p L^2}; \quad (5)$$

$$U_a(\Delta I_2) = \frac{t_{02} S_{o\delta 2} S_2 e_0 K_{\Delta I_2} S_{U(\Delta I_2)} \mathcal{S} T_0^4 R_{B\Delta I_2}}{p L^2}, \quad (6)$$

де  $t_{01}$  і  $t_{02}$  - коефіцієнти пропускання випромінювання об'єктивом першого та другого каналів відповідно;  $S_{o\delta 1}$  і  $S_{o\delta 2}$  - площа вхідного отвору об'єктивів першого та другого каналів відповідно;  $S_1$  і  $S_2$  - площі об'єктів спостереження, на які спираються миттєві кути полів зору об'єктивів першого та другого каналів відповідно;  $K_{\Delta I_1}$  і  $K_{\Delta I_2}$  - коефіцієнти використання приймачем першого та другого каналів відповідно;  $R_{B\Delta I_1}$  і  $R_{B\Delta I_2}$  - частки потоків випромінювання, що приходяться на спектральні діапазони  $\Delta I_1$  і  $\Delta I_2$  відповідно.

За умови, що об'єктиви першого та другого каналів ідентичні, будуть мати місце рівності

$$S_{o\delta 1} = S_{o\delta 2}, S_1 = S_2, t_{01} = t_{02}. \quad (7)$$

Коефіцієнти використання приймачів випромінювання  $K_{\Delta I_1}$  і  $K_{\Delta I_2}$  враховують спектральний склад потоку випромінювання і спектральні характеристики пропускання випромінювання атмосферою.

Завдяки тому, що обидва приймачі працюють у вікнах прозорості атмосфери на невеликій відстані від об'єкта, можна прийняти допущення, що співвідношення коефіцієнтів  $K_{\Delta I_1}$  і  $K_{\Delta I_2}$  є сталою величиною.

Частки потоку випромінювання  $R_{B\Delta I_1}$  і  $R_{B\Delta I_2}$ , що приходяться на кожний зі спектральних діапазонів  $\Delta I_1$  і  $\Delta I_2$  відповідно, визначаються шляхом інтегрування виразів, які відповідають закону Планка

$$R_{B\Delta I_1} = \int_{I_1}^{I_2} C_1 \cdot I^{-5} \cdot \left( e^{\frac{C_2}{I \cdot T_0}} - 1 \right)^{-1} \cdot dI, \quad (8)$$

$$R_{B\Delta I_2} = \int_{I_{13}}^{I_4} C_1 \cdot I^{-5} \cdot \left( e^{\frac{C_2}{I \cdot T_0}} - 1 \right)^{-1} \cdot dI. \quad (9)$$

Значення цих величин залежать тільки від спектрального діапазону роботи приймачів випромінювання та реальної температури об'єкта спостереження.

Таким чином, з урахуванням (7) та запроваджуючи позначення

$$K_n = K \cdot \frac{K_{\Delta I_1} \cdot S_{U(\Delta I_1)}}{K_{\Delta I_2} \cdot S_{U(\Delta I_2)}}, \quad (10)$$

вираз (4) прийме вигляд

$$U_a = K_n \cdot \frac{R_{B\Delta I_1}}{R_{B\Delta I_2}}. \quad (11)$$

Формула (11) показує, що амплітуда відеосигналу утворена шляхом співвідношення електричних сигналів з двох каналів, що працюють в різних спектральних діапазонах і залежить тільки від реальної температури об'єкта спостереження  $T_0$ .

В таблиці 1 наведено результати розрахунків значень  $R_{B\Delta I_1}$  та  $R_{B\Delta I_2}$  і їх відношень (прямого  $R_{B\Delta I_1}/R_{B\Delta I_2}$  та зворотного  $R_{B\Delta I_2}/R_{B\Delta I_1}$  - для відповідних значень температур об'єкта  $400\text{K} \leq T_0 \leq 1400\text{K}$  в спектральних діапазонах  $\Delta I_2 = 3\text{К}5\text{мкм}$  і  $\Delta I_1 = 8\text{К}14\text{мкм}$ ).

Таблиця 1.

Значення відносних спектральних щільностей потоків випромінювання та їх відношень

$T_0, K$	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
$R_{\epsilon(3K5)} \cdot 10^{-2}$	6,46	14,85	23,38	25,01	34,05	35,88	36,05	35,08	33,38	30,54	29,18
$R_{\epsilon(8K14)} \cdot 10^{-2}$	39,0	32,7	26,3	20,9	16,6	13,0	10,6	9,1	7,1	5,9	4,9
$(R_{\epsilon(3K5)} / R_{\epsilon(8K14)}) \cdot 10^{-2}$	16,5	45,4	88,8	119,8	205,2	275,4	341,0	386,7	469,4	516,6	586,2
$(R_{\epsilon(8K14)} / R_{\epsilon(3K5)}) \cdot 10^{-2}$	604,9	220,2	112,4	83,4	48,7	36,3	29,3	25,8	21,3	19,3	17,1

Проаналізуємо залежність прямого та зворотного відношень відносних спектральних щільностей потоків випромінювання в спектральних діапазонах  $\Delta I_2 = 3K5_{\mu m}$  і  $\Delta I_1 = 8K14_{\mu m}$  від температури  $T_0$  об'єкта.

Як видно з наведених графіків (рис.1), відношення  $R_{\epsilon(8K14)} / R_{\epsilon(3K5)}$  (графік 2) зі змінною інтенсивністю зменшується при збільшенні температури об'єкта. Тому в діапазоні температур  $400K \leq T_0 \leq 700K$  це зменшення відбувається приблизно в 5 разів, за наступні 400K - лише в 2,85 рази. А величина  $R_{\epsilon(3K5)} / R_{\epsilon(8K14)}$  (графік 1) у тому ж температурному діапазоні навпаки, майже рівномірно зростає. Тому наведені графічні залежності мають точку перетину, яка відповідає температурі  $T_0 = 640K$ . Цей факт є доказом того, що при даній температурі відносні спектральні щільності потоків випромінювання в обох спектральних діапазонах мають однакові значення.

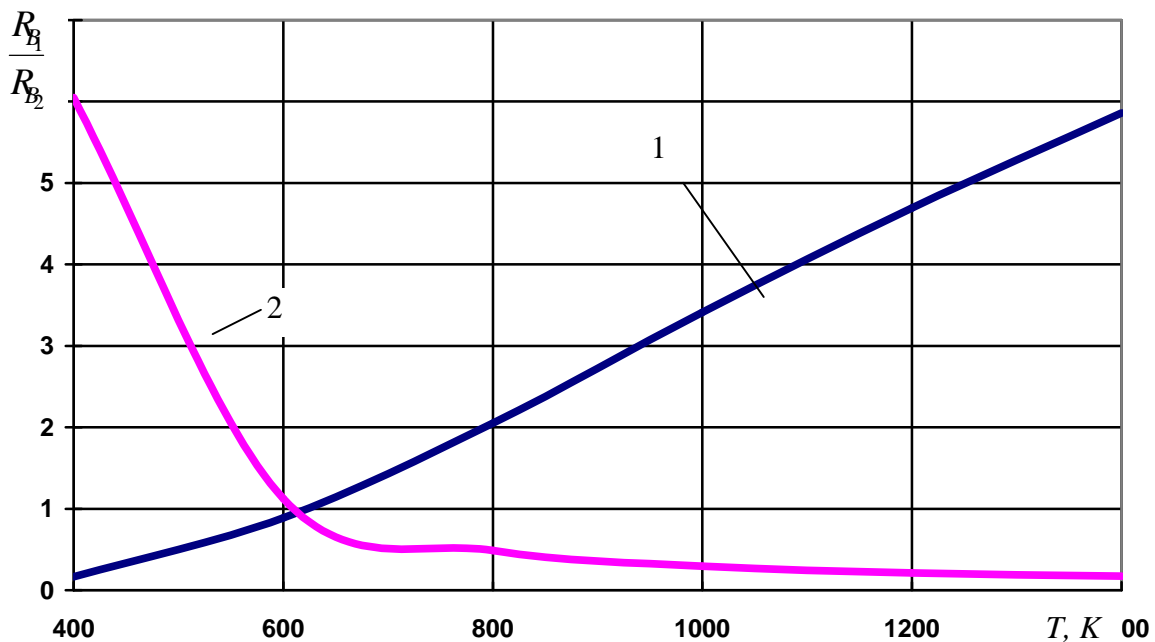


Рис.1. Залежність відношення відносних спектральних щільностей потоків випромінювання від температури об'єкта

Таким чином, якщо тепловізійний прилад побудувати за двоканальною схемою приймання випромінювання, причому значення амплітуди сукупного відеосигналу утворювати не за рахунок значень амплітуд електричних сигналів, що надходять з двох працюючих в різних спектральних діапазонах приймачів, а за рахунок співвідношень (прямого або зворотного) амплітуд цих сигналів, тоді значення амплітуди отриманого сукупного відеосигналу буде залежати тільки від реальної температури об'єкта спостереження, а візуалізована картина об'єкта буде відповідати реальному розподілу його температурних градієнтів.

## **ЛІТЕРАТУРА**

1. Орлов В.А., Петров В.И. Приборы наблюдения ночью и при ограниченной видимости. - М.: Воениздат, 1989. – 254 с.
2. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. – М.: Мир, 1988. – 416 с.
3. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. – Л.: Машиностроение, 1983. – 696 с.
4. Криксунов Л.З. Инфракрасные координаторы цели. – М.: КВИАВУ ВВС, 1968. – 334 с.

*Надійшла до редакції 28.10.2011*