

УДК 535.21

ВИЗНАЧЕННЯ ДАЛЬНОСТІ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ТЕПЛОВІЗОРОМ З МІКРОБОЛОМЕТРИЧНОЮ МАТРИЦЕЮ

¹⁾Лихоліт М.І., ²⁾Колобродов В.Г., Овечкін В.С., ¹⁾“Казенне підприємство “ЦКБ “Арсенал”, м. Київ, Україна; ²⁾Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, м. Київ, Україна

Запропоновано нову методикау визначення максимальної дальності розпізнавання (MRR), заснована на NIIRS. Проведено розрахунок за викладеною методикою та зпівставлено з результатами, отриманими за іншими найбільш розповсюдженими методиками

Вступ

Події останніх років засвідчили велику перевагу використання систем, що працюють в інфрачервоному діапазоні спектра [1]. Тому виникла проблема адекватної оцінки ефективності таких систем. Для оглядових систем дуже важливо знати, на якій максимальній відстані можливо виявити й розпізнати той чи інший об'єкт. Було розроблено багато методик розрахунку таких дальностей [2 – 6]. Але авторами цих методик використовуються різні вихідні умови (пороговий контраст [5], порогове відношення сигнал/шум, яке сприймає оператор (SNR_{th} : threshold Signal to Noise Ratio) [6], критерій Джонсона і мінімально роздільна різниця температур (MRTD: Minimum Resolvable Temperature Difference) [3, 4]). Ці методики мають низку недоліків. Так методика визначення максимальної дальності розпізнавання за пороговим відношенням сигнал/шум SNR_{th} не враховує вплив властивостей сприйняття зображення зоровим аналізатором (ЗА) оператора. Методика, яка побудована на критерії Джонсона і мінімально роздільній різниці температур, найбільш повно характеризує тепловізійну систему спостереження (ТСС), враховуючи вплив усіх функціональних блоків ТСС та оператора. Але нові дослідження [4] показали, що основний вплив на виконання задач спостереження має атмосферне розмиття [7], а тому використання лише коефіцієнту пропускання атмосфери без врахування модуляційної передаточної функції атмосфери не є коректним на сучасному етапі. До того ж, деякі методики мають фіксовані значення ймовірності розпізнавання $P_r = 50\%$, що ускладнює використання їх для військової техніки. Також ці методики мають дуже суттєвий недолік – усі вони так чи інакше мають за основу критерій Джонсона і не враховують реальні об'єкти. Тому вчені зі Сполучених Штатів Америки розробили нову систему оцінки максимальної дальності при виявленні, розпізнаванні та ідентифікації об'єктів. Це національна інтерпретаційна оцінювальна шкала зображень (National Imagery Interpretability Rating Scale: NIIRS). Кожний рівень NIIRS відповідає різному об'єму інформації, що необхідний для виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта, і відмінний по сукупності виявлювальних критеріїв. Головне рівняння якості зображення (General Image Quality Equation: GIQE) – це модель, яка визначає очікуваний рівень NIIRS. У

даній статті нами запропонована модель розрахунку максимальної дальності розпізнавання (MRR, R_r : Maximal Recognition Range), яка заснована на NIIRS та GIQE. За цією методикою можливо достатньо чітко і відносно легко визначити MRR, і вона враховує усі основні параметри ТСС, об'єкту та фону, стан атмосфери, властивості сприйняття зображення оператором. Методика розроблена для визначення MRR ТСС на мікроболометричній матриці, але вона може бути застосована і для ТСС на інших типах теплових матриць.

Для порівняння представленої нами методики з іншими відомими методиками, були розраховані і зпівставлені максимальні дальності розпізнавання при однакових умовах.

1. Національна інтерпретаційна оцінювальна шкала зображень (NIIRS)

Перед тим як розглядати GIQE, необхідно зрозуміти, що ж таке NIIRS. NIIRS – це загальноприйнята розвідувальна шкала, яка використовується аналітиками зображення для представлення кількісних міркувань по інтерпретації конкретного зображення. Процес “ранжирування” зображення полягає у тому, щоб назначити зображенню номер, який описує інтерпретацію зображення. Ранжирування було розроблено з переконання, що колекція зображень і експлуатація вдовольнять інформаційну потребу кінцевого користувача.

NIIRS – це шкала від 0 до 9, що може бути використаною для порівняння результатів різних ТСС. Шкала є важливим інструментом для визначення вимог до зображення і характеристик нової ТСС.

NIIRS визначається низкою експлуатаційних задач, а також психофізичним сприйняттям. Треба відмітити, що наприклад, рівень 4 може відповідати розпізнаванню як об'єктів з розмірами 1 м (люк у грузовому відсіку), так і об'єктів з розмірами 50 м (трансформаторна площадка). Це обумовлено нелінійністю відношення між якістю зображення та сприйняттям зображення людиною. NIIRS рівні представлені у таблиці [8].

2. Головне рівняння якості зображення (GIQE)

GIQE було розроблено для надання NIIRS-прогнозам системного вигляду. Ця модель визначає рівень NIIRS для ТСС як функцію рівня зображення, зернистості або розділення, і відношення сигнал/шум. Модель було розроблено на підставі великої бази зображень та відповідей аналітиків зображень з відносними оцінками. Інфрачервона GIQE модель описується рівнянням:

$$NIIRS = 10,751 - a \log_{10} GSD + b \log_{10} RER - (0,656H) - [0,344(G/SNR)] , \quad (1)$$

де RER – відносний граничний відгук, GSD – ширина миттєвого поля зору в дюймах, H – перерегулювання через граничну різкість, G – шум отриманий через граничну різкість. Коефіцієнти визначаються як:

$$a = 3,32 \text{ і } b = 1,559 \text{ для } RER \geq 0,9;$$

$$a = 3,16 \text{ і } b = 2,817 \text{ для } RER < 0,9.$$

Граничний відгук (ER):

$$ER_x(x) = 0,5 + \frac{1}{\pi_0} \int_0^{\infty} \frac{M_x(v_x)}{v_x} \sin(2\pi v_x x) dv_x, \quad (2)$$

де $M_x(v_x)$ – модуляційна передаточна функція (МПФ) системи у горизонтальному напрямку; x – позиція відгуку від центра пікселя по горизонталі (у пікселях) і v_x – просторова частота в циклах на інтервал. Зауважимо, що $ER_y(y)$ є ідентичною, але у вертикальному напрямку. $REER$ це відхилення системного граничного відгуку і визначається МПФ тепловізійної системи та атмосферними ефектами. $REER$ визначається між двома точками, що знаходяться на 0,5 пікселя від краю і є нормованою функцією.

$$REER = \{[ER_x(0,5) - ER_x(-0,5)][ER_y(0,5) - ER_y(-0,5)]\}^{1/2}. \quad (3)$$

Проекція ширини пікселя приймача на горизонтальну площину на відстані R , визначається як:

$$GSD_x = \frac{V_D}{f'} R, \text{ [дюйми]} \quad (4)$$

де V_D – розмір пікселя у горизонтальному напрямку; f' – фокусна відстань оптичної системи; R – відстань між об'єктом та ТСС в дюймах.

Граничне перерегулювання (MTFC) з'являється через компенсацію МПФ або граничної різкості. В формулі (1) значення H відповідає максимуму ER у горизонтальному напрямку в інтервалі від 1,0 до 3,0 пікселів від краю (використовуючи рівняння (2)). Для монотонно зростаючої границі ER обирається на відстані 1,25 пікселя від краю.

SNR – відношення шуму, який виникає із-за неоднорідності випромінення сцени до еквівалентного середньоквадратичного (rms) шуму електронів, порохваному до МПФ компенсації та після калібрування. Шум, який виникає із-за неоднорідності випромінення сцени, це різниця у напрузі з виходу приймача випромінювання при спостереженні двох ламбертових поверхонь, які відрізняються за показником відбиття.

3. Мікроболометричні матриці

Все більше сучасних тепловізійних систем побудовано на мікроболометричних матрицях. Саме завдяки ним стало можливим створення невеликих і надійних тепловізійних систем. Це обумовлено тим, що ці приймачі не вимагають додаткового охолодження, тому суттєво зменшуються габарити ТСС, її вартість та обслуговування. Основним параметром при роботі болометра є опір, який змінюється, якщо на приймальну площадку потрапляє випромінення.

Основними характеристиками мікроболометричних матриць є чутливість R_D та виявлювальна здатність приймача D^* . Мікроболометричні матриці є не-селективними, тобто у робочій спектральній області $\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$ чутливість і виявлювальна здатність є постійними величинами

$$\left. \begin{aligned} R_D(\lambda) &= R_{Dth} \\ D^*(\lambda) &= D_{th}^* \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Зараз розробники працюють над тим, щоб довести коефіцієнт заповнення чутливими елементами до 85 %, удвічі знизити результуючий шум, розширити формат матриць, звести до нуля кількість дефектних пікселів і довести *NETD* до 0,01 К [9]. Для порівняння, скануючі охолоджувані фотонні приймачі випромінювання мають *NETD* близько 0,1 К, а кращі спостерігаючі охолоджувані матриці, близько 0,01 К.

4. Максимальна дальність розпізнавання (MRR)

Максимальна дальність розпізнавання визначається, виходячи з NIIRS рівня ТСС та її узагальнених характеристик - МПФ, MRTD. За початкові умови беруться ті, що використовуються у стандарті NATO 4247. В статтях [4, 8, 10, 11] показано, що від дальності суттєво залежить тільки *GSD*. Тому змінами інших параметрів можна знехтувати. Після математичних перетворень рівняння (1) набуває вигляд

$$a \log_{10} GSD = 10,751 + b \log_{10} RER - (0,656H) - [0,344(G/SNR)] - NIIRS. \quad (7)$$

Враховуючи, що $GSD = \frac{W_D}{f'} R \cdot 0,3937 \cdot 10^5$ [км], знаходимо дальність до об'єкта

$$R = \frac{f'}{W_D} \cdot 2,54 \cdot 10^{\frac{10,751 + b \lg RER - 0,656H - 0,344(G/SNR) - NIIRS - 5}{a}} \quad [\text{км}]. \quad (8)$$

Дальність, яку можна знайти з виразу (8) за зазначеним рівнем NIIRS для даної ТСС, це не лише дальність розпізнавання. Як можна бачити з таблиці, ця дальність також є дальністю виявлення та ідентифікації, але вже для інших об'єктів і це цілком зрозуміло. Адже, якщо на зазначеній дальності можна розпізнати об'єкти з малими розмірами і складною структурою, то очевидно, що на цій же відстані тією ж ТСС можна виявити більші за розмірами і менш складною структурою об'єкти. Саме на це й розраховано NIIRS. Вона дає комплексне уявлення того, які ж саме об'єкти може виявити оператор, використовуючи ту чи іншу ТСС на зазначених дальностях. Чинником цього явища є той факт, що сприйняття людським оком зображення не є пропорційним до якості зображення. Це ще одна дуже суттєва проблема, яку не враховують усі інші методики визначення максимальної дальності розпізнавання.

5. Аналіз MRR ТСС

Для того, щоб порівняти представлену нами методику з іншими найбільш розповсюдженими методиками, були проведені розрахунки максимальних дальностей розпізнавання з такими початковими даними: розміри об'єкта $V_t \times W_t = 2,3 \times 2,3 \text{ м}^2$; ймовірність розпізнавання $P_r = 50\%$; спектральний діапа-

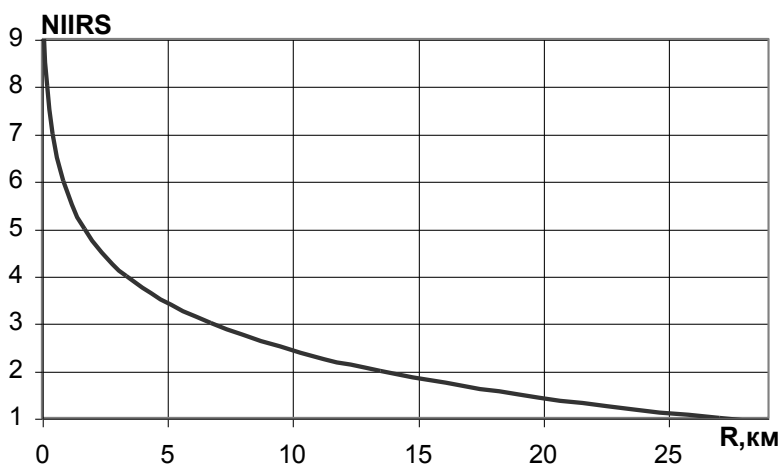
зон $\lambda_1 \cdot \lambda_2 = 8..12 \text{ мкм}$; ефективне діафрагмове число $k_{\text{eff}} = \frac{f'}{D_p} = 1$; задня фокусна відстань оптики $f' = 100 \text{ мм}$; коефіцієнт пропускання оптики $\tau_o = 0,8$; поле зору $2\omega_x \times 2\omega_y = 11^\circ \times 8,2^\circ$; $NETD = 0,04 \text{ К}$; частота кадрів $f_f = 30 \text{ Гц}$; приймач випромінювання – мікроболометрична матриця фірми Honeywell Tech. Cent.(USA) [12] з форматом 336×240 , коефіцієнтом заповнення 50%, розміри пікселів $V_D \times W_D = 50 \times 50 \text{ мкм}^2$, миттєве поле зору $\alpha_D \times \beta_D = 1 \times 0,33 \text{ мрад}$, чутливість $R_D = 250 \text{ кВ/Вт}$; висота екрана $V_e = 15,24 \text{ см}$; відстань між оператором та екраном $d_e = 30 \text{ см}$; постійна часу ока $t_E = 0,2 \text{ с}$; порогове відношення сигнал/шум на екрані ще помітне оператором $SNR_{th} = 3,2$; умови спостереження добрі – коефіцієнт ослаблення атмосфери $k_a = 0,2 \text{ км}^{-1}$; температурний контраст $\Delta T = 2 \text{ К}$; температура фону $T_b = 288 \text{ К}$; $NIIRS = 3,4$.

Розрахунок за створеною методикою проводився наступним чином. Спочатку було зроблено припущення, що МПФ системи визначається МПФ приймача, для спрощення розрахунку інтеграла у виразі (2). Тобто $M_{TS} \cong M_D = \frac{\sin(\pi \alpha_D V_x)}{\pi \alpha_D V_x}$. При цих умовах RER була отримана на рівні 0,108.

Вплив H і складової G/SNR на великих відстанях незначний [8, 11], тому ми їх не брали до уваги. Підставивши вихідні умови в (8), було отримано

$$R_r = 1,47 \text{ км}.$$

Так як рівень $NIIRS$ в умові відповідає максимальній дальності розпізнавання об'єкту з розмірами $2,3 \times 2,3 \text{ м}$ і ймовірністю розпізнавання $P_r = 50\%$, то ця відстань і є максимальною дальністю розпізнавання. Але, як можна побачити



з таблиці, цей рівень також відповідає розпізнаванню й менших за розмірами об'єктів. На рис. 1 наведено залежність рівня $NIIRS$ для даної ТСС від дальності до об'єкта спостереження.

Рисунок 1 - Залежність $NIIRS$ рівнів від дальності спостереження

За розрахунком по іншим методикам, були отримані наступні результати:

- за стандартом НАТО 4247 з зазначеною ймовірністю, за методикою приведеною у монографіях [3, 13]

$$R_r = 1,53 \text{ км};$$

- за методикою, вихідними положеннями якої є рівність між MRTD та температурним контрастом ΔT , а також критерій Джонсона [3, 13]

$$R_r = 1,52 \text{ км};$$

- за методикою, вихідним положенням якої є пороговий контраст $C_{thr} = 0,02$ [5]

$$R_r = 1,82 \text{ км};$$

- за методикою, вихідним положенням якої є порогове відношення сигнал/шум на виході приймача випромінювання $SNR_{thr} = 3,2$ [6]

$$R_r = 2,4 \text{ км}.$$

Висновки

Як можна побачити з наведених вище прикладів, результат за представленою у статті методикою виявився більш “песимістичним”, ніж за стандартом НАТО 4247, але ближчим до експериментальних даних [3, 4, 13], що доводить доцільність використання саме цієї методики. Запропонована модель враховує усі ланки ТСС та властивості ока оператора. Також до переваг створеної методики можна віднести те, що вона найбільш повно враховує випадковий розподіл температур, спираючись на базу зображень NIRS, і дає можливість усвідомити, які з об’єктів можуть бути розпізнані на обраних дальностях. Можливість вибору ймовірності виявлення надає велику перевагу над іншими методиками. Таким чином, у цій моделі враховано головну проблему застосування такого роду методик для військового і цивільного призначення.

Ще потрібно прикласти багато зусиль, щоб поєднати усі методики, зробити їх простими та чітко визначеними при розрахунках. Необхідно поповнювати базу зображень новими зразками, для того, щоб аналітики зображень могли швидко і правильно класифікувати ТСС.

Література

1. K. Lewotsky, Infrared and electro-optic sensing ramp up // OEmagazine. – 2002. – № 4. – Р. 16–17.
2. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов: Учебник для студентов приборостроительных специальностей вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 360 с.
3. Колобродов В.Г., Шустер Н., Тепловізійні системи (фізичні основи, методи проектування і контролю, застосування): Підручник. – К.: 1999. – 340 с.
4. R.G. Driggers, P.G. Cox, J. Leachtenauer, Targeting and intelligence electro-optical recognition modeling: a juxtaposition of the probabilities of discrimination and the general image quality equation // Opt. Eng. – 1998. – № 37(3). – Р. 789–797.
5. Бабенко В.С. Оптика телевизионных устройств. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1982. – 256 с.
6. Иванов В.Н., Мирзоянц А.С., Влияние условий наблюдения на контраст изображения и дальность работы оптико-электронной системы // Техника средств связи. Техника телевидения. – 1981. – № 1.
7. R. Melamed, Y. Yitzhaky, N. S. Kopeika, Experimental comparison of three target acquisition models // Opt. Eng. – 1998. – № 37(7). – Р. 1902–1913.

Таблиця Національна інтерпретаційна оцінювальна шкала зображень для інфрачервоного діапазону [8]

Рівень 0	Інтерпретація зображення неможлива через погану якість.
Рівень 1	Можливо розрізнити злітну смугу від проїзної смуги по розмірах та конфігурації на великому аеродромі. Виявляти велику (більш ніж 1 км ²) очищену територію в густому лісі. Виявляти великі кораблі далекого плавання (авіаносець, супертанкер) у морі. Виявляти великі площі (більш ніж 1 км ²) болотистої місцевості.
Рівень 2	Виявляти великі літаки (С-141, 707, BEAR, CANDID, CLAS-SIC). Виявляти окремо стоячі великі будівлі (госпіталі, заводи) у населених пунктах. Можливо відрізнити густий ліс, рідкий ліс і поля. Ідентифікувати SS-25 базу по розташуванню будинків і виду доріг. Розрізняти військово-морські і комерційні порти, ґрунтуючись на конфігурації функціональних площ.
Рівень 3	Розрізняти великі (С-141, 707, BEAR, А-300 AIR-BUS) і маленькі літаки (А-4, FISHBED, L-39). Ідентифікувати окремі димоходи на ТЕС, такі як труби котельні і димарі. Виявляти великий радар, ґрунтуючись на присутності бугрів, маскуванню й охорони. Виявляти вантажівки для навчання водіїв у гарнізоні піхоти. Ідентифікувати окремі функціональні зони (пускові установки, відділення електронщиків, взвод підтримки, ракетне сховище) пускового комплексу SA-5. Відрізняти великі (більш ніж 200 м) вантажні судна від танкерів.
Рівень 4	Ідентифікувати конфігурацію крил невеликих бойових літаків (FROGFOOT, F-16, FISHBED). Виявляти малі (50 м ²) трансформаторні площадки в населених пунктах. Виявляти окремі працюючі машини в гарнізоні. Виявляти працюючий SS-25 MSV у гарнізоні. Ідентифікувати окремі закриті люки на торговому судні.
Рівень 5	Розрізняти винищувачі з одинарним (FLOGGER, F-16, TORNADO) і роздвоєним (F-15, FLANKER, FOXBAT) хвостом. Ідентифікувати вуличні тенісні корти. Ідентифікувати структуру металевих ґрат великих (приблизно 75 м) радіорелейних веж. Виявляти розгорнуту електронну вежу, що транспортується, на SA-10.
Рівень 6	Виявляти причеплений до крил вантаж (ASM, бомби), які видаються з-під крил важких бомбардувальників (B-52, BEAR, BADGER). Ідентифікувати окремі вихлопні труби зверху дизельних локомотивів. Відрізняти FIX FOUR від FIX SIX установку, ґрунтуючись на виді антени. Відрізняти працюючий танк від APC. Відрізняти пускову установку з двома тубусами від установки з чотирма тубусами. Ідентифікувати люки торпедних установок на підводних човнах.
Рівень 7	Розрізняти Міг-23 FLOGGER призначений для повітряного прикриття від перехватчика Міг-23 за формою носової частини. Ідентифікувати антенні диски (менші за 3 м у діаметрі) на радіорелейній вежі. Ідентифікувати кран для навантаження ракет на SA-6. Відрізняти ракетні перевізники SA-2/CSA-1 від SCUD-B, коли не завантажені ракети. Виявляти на пірсі шини для причалювання.
Рівень 8	Можливість ідентифікувати людські кінцівки (руки, ноги). Ідентифікувати окремі горизонтальні і вертикальні прутки на антені радара. Виявити закритий люк на вежі танка.
Рівень 9	Ідентифікувати панелі доступу на винищувачі. Ідентифікувати вантаж (лопати, сходи, граблі) у відкритих невеликих вантажівках. Відрізняти антени BIRDS EYE від BELL LACE, ґрунтуючись на присутності чи відсутності дипольних елементів. Ідентифікувати петлі люка на вежі танка. Ідентифікувати окремі антени для орієнтування у виді штиря на ракетах SA-2/CSA-1. Ідентифікувати окремі сходинки на переносних сходах.

8. J. C. Leachtenauer, W. Malila, J. Irvine, General image-quality equation for infrared imagery // Appl. Opt. – 2000. – № 39. – P. 4826–4828.
9. Michael Todd, Andy Parsons, Hot detectors // OEmagazine. – 2001. – № 6. – P. 26–27.

10. R.G. Driggers, P. Cox, M. Kelley, National imagery interpretation rating system and the probabilities of detection, recognition, and identification // Opt. Eng. – 1997. – № 36(7). – P. 1952–1959.
11. J. C. Leachtenauer, W. Malila, J. Irvine, General image-quality equation: GIQE// Appl. Opt. – 1997. – № 36. – P. 8322–8328.
12. Хребтов И.А., Маляров В.Г., Неохлаждаемые тепловые матричные приемники ИК излучения // Оптический журнал – 1997. – Т. 64. - № 6. – С. 3–17.
13. N. Schuster, V.G. Kolobrodov. Infrarotthermographie. – Berlin.: WILEY-VCH, 2000. – 340 p.
14. Ллойд Дж. Системы тепловидения / Пер. с англ.; Под ред. А.И. Бурячева. – М.: Мир, 1979. – 416 с.
15. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: Учеб. Пособие для приборостроительных вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1983. – 696 с.

<p>Лихолит Н.И., Колобродов В.Г., Овечкин В.С. Определение дальности распознавания объектов тепловизором с микроболометрической матрицей.</p> <p>Предложена новая методика определения максимальной дальности распознавания (MRR), основанная на NIIRS. Проведен расчет по представленной методике и результат сопоставлен с результатами, полученными по другим наиболее распространенным методикам.</p>	<p>Liholit N.I., Kolobrodov V.G., Ovechkin V.S., Determination of the range of recognition of the objects by thermal imaging device on microbolometric detection array.</p> <p>The new method of determining of the maximal range of recognition (MRR) based on the NIIRS is proposed. The calculation of MRR by the proposed method have been done and was compared with the MRR which were calculated by other most overspread methods.</p>
--	--

*Надійшло до редакції
25 травня 2004 року*

УДК 629.7.018:2.001.2

МОНОБЛОЧНЫЙ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИЙ ВИЗИР МАЛОГО УВЕЛИЧЕНИЯ

¹⁾Сенаторов Н.В., ²⁾Микитенко В.И., ¹⁾Казенне підприємство "ЦКБ "Арсенал", г. Киев, Украина; ²⁾Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", г. Киев, Украина

Предложена конструкция моноблочного телескопического визира и разработаны методики его габаритного и абберационного расчетов на основе толстой телескопической линзы. Рассчитаны погрешности визирования в зависимости от конструкции визира.

Введение

Многие переносные диагностические, измерительные и регистрирующие приборы требуют предварительного наведения на объект наблюдения. Это могут быть, например, радиометры или другие устройства дистанционного измерения параметров объектов, теодолиты, фото-, кино- и видеотехника, дальнометры. В таких случаях обычно изображение объекта совмещается с изображе-