

УДК 621.384.3:351.746.1

Ю. П. Мисюк, канд. техн. наук
 Науково-дослідний інститут
 Державної прикордонної служби
 України

E-mail: julia.mysiuk@gmail.com

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ ТЕПЛОВІЗІЙНИХ ЗАСОБІВ ВІЗУАЛЬНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ ОХОРОНИ ДЕРЖАВНОГО КОРДОНУ

Вступ. У рамках приведення системи охорони державного кордону України до вимог європейських стандартів, одним зі способів підвищення надійності охорони державного кордону є удосконалення системи інженерно-технічного контролю з використанням приладів візуального спостереження [1]. Розширення діапазону зору людини з метою візуалізації недоступної для його очей інформації є одним із найважливіших і складних завдань. Проблема спостереження в умовах низької освітленості та у повній темряві вже давно набула особливої актуальності. Наукові дослідження в цій сфері постійно стимулюються потребами військової діяльності. Досягнення у сфері розвитку оптоелектроніки, особливо в останні десятиріччя, сприяли появі сучасних методів конструювання і технологій виробництва приладів нічного бачення.

Широкого застосування в армійських підрозділах, правоохоронних органах, підрозділах спеціального призначення набули пристрої, що використовують приймачі випромінювань з електронно-оптичними перетворювачами слабо освітлених зображень об'єктів і місцевості. Досягнення в освоєнні інфрачервоного діапазону електромагнітного спектра привели до створення різноманітної інформаційної апаратури цього діапазону, і зокрема тепловізорів – пристроїв, призначених для візуалізації і контролю об'єктів за їх власним тепловим випромінюванням [2]. Відповідно до зазначеного, дослідження питань застосування тепловізорів в охороні державного кордону та в інших системах безпеки є актуальним.

Аналіз досліджень і публікацій. Інтерес фахівців до технологій і техніки спостереження у темряві та за тепловим випромінюванням об'єктів постійно зростає. Сьогодні існує велика кількість робіт, в яких розглядаються аспекти теорії, побудови і застосування різних видів пристроїв нічного бачення [1-5]. У переважній більшості з них містяться теоретичні матеріали або розглядаються напрями практичного застосування. На жаль, дуже мало вітчизняних видань технічної та спеціальної літератури, що мають військову спрямованість і досліджують один із перспективних напрямків оптоелектроніки – проблеми візуалізації фотонних і теплових (інфрачервоних) зображень об'єктів спостереження. Нова інформація цієї тематики, що з'являється в зарубіжній літературі, періодичних виданнях, рекламних повідомленнях фірм, вимагає систематизації, узагальнення й аналізу.

Аналіз публікацій щодо застосування тепловізорів в конкретних умовах показав, що тепловізійні прилади (комплекси) в охороні державного кордону можуть застосовуватися для [2-4]:

- прихованого спостереження і розвідки на місцевості, водяній поверхні, у приміщеннях з низьким рівнем освітленості, у тому числі в повній темряві;
- контролю за пересуванням людей та автотранспорту;
- пошуку в нічних умовах чи повній темряві екіпажів, окремих пілотів і пасажирів літаків (гелікоптерів), які потрапили в аварію;
- забезпечення спостереження й охорони військових і промислових об'єктів, складів тощо;
- виявлення прихованих (замаскованих) «теплих» об'єктів: людей, автомашин;
- виявлення вибухових пристроїв, що виділяють тепло;
- пошуку слідів перебування людей, техніки й інших об'єктів, що випромінюють тепло, на відкритій місцевості та у приміщеннях тощо.

Аналіз матеріалу, викладеного у вищезазначених працях, показав, що одним з основних недоліків тепловізорів є слабка деталізація зображення і його специфічний характер. Зазначимо, на сьогодні обробка зображень є важливим напрямом застосування комп'ютерних технологій. Відомі такі завдання обробки зображень, як фільтрація, відновлення і сегментація зображень, створення засобів мінімізації об'єму інформації [5]. Проблеми розпізнавання зображень окрім класичного завдання розпізнавання фігур заданої форми на зображенні ставлять нові завдання розпізнавання ліній і кутів на зображенні, розпізнавання краю зображення.

Загальновідомо, що тепловізійні зображення однієї і тієї ж сцени, отримані за різних умов зйомки об'єктів можуть суттєво відрізнятись. На практиці ця обставина породжує значні труднощі під час аналізу та інтерпретації зображень реальних сцен, в яких рішення повинне не залежати від умов реєстрації зображень. Йдеться, наприклад, про завдання виділення невідомого об'єкту на тлі відомої місцевості, відомого об'єкту на довільному фоні за неконтрольованих умов освітлення, про завдання поєднання зображень однієї і тієї ж сцени, отриманих в різних спектральних діапазонах тощо.

Сфери застосування цифрової обробки нині значно розширюються, витісняючи аналогові методи обробки сигналів різних типів зображень. Методи цифрової обробки широко застосовуються в промисловості, медицині, космосі, військовій галузі, зокрема, у Державній прикордонній службі України. Вони застосовуються при управлінні процесами, автоматизації виявлення і супроводу об'єктів, розпізнаванні образів тощо.

Усе вищевикладене вказує на актуальність проведення досліджень щодо формування зображень, поліпшення їх якості та автоматизації обробки, як правило, слабоконтрастних, тепловізійних зображень.

Мета даної роботи полягає у розробленні вискоелективного методу моделювання тепловізійних зображень.

Результати досліджень. Комп'ютерна обробка зображень можлива після перетворення сигналу зображення з безперервної форми в цифрову форму. Ефективність обробки залежить від адекватності моделі, що описує зображення, необхідної для розробки алгоритмів обробки. При цьому необхідно враховувати вплив системи-передавача та системи-приймача, а також каналу зв'язку на сигнал. Модель зображення представляє систему функцій, що описують істотні характеристики зображення: функцію яскравості, що відображає зміну яскравості у площини зображення, просторові спектри та спектральні інтенсивності зображень, функції автокореляції. Канал зображення містить систему-приймач, перетворювач, аналого-цифровий перетворювач і блок цифрової обробки. У загальному випадку безперервне зображення може бути представлене функцією п'яти аргументів: трьох просторових координат, часу і довжини хвилі випромінювання. Спрощення моделі просторово-часових сигналів у деякому діапазоні хвиль $f(x, y, z, t, \lambda)$ приводять до моделей

просторово-часового сигналу $f(x,y,z,t)$, просторового сигналу $f(x,y,z)$ і часового сигналу $f(t)$. Тут x,y,z – просторові координати, t – час, λ – довжина хвилі випромінювання [6].

Під час проектування та створення тепловізійних систем важливу роль відіграє моделювання структури тепловізійних зображень. Яскравість тепловізійних зображень залежить як від розподілу температури по поверхні об'єкта спостереження, так і від коефіцієнта випромінювання й орієнтації візованих елементів його поверхні – його форми. Крім того, якість тепловізійного зображення залежить від передатних характеристик та усіх ланок тепловізора. У моделювання структури тепловізійних зображень приймемо процес формування відеосигналів приймача, потужність яких пропорційна потоку теплового випромінювання об'єкта для усього тепловізійного кадру, що містить в собі L рядків при N елементів е рядку. Рівень відеосигналу $U(N, L)$ елемента розкладання кадру [7]:

$$U(N, L) = \left(\frac{1}{\pi}\right) \cdot \varepsilon(\psi) \cdot \omega \cdot \cos \psi(N, L) dS(N, L) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\lambda} \cdot W(\lambda, T, y, z) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot \tau_a(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

де ω – передній апертурний кут системи-приймача тепловізора; ψ – кут між нормаллю до елемента $dS(N, L)$ поверхні об'єкта і напрямом спостереження; $W(\lambda, T, y, z)$ – спектральна світимість елемента $dS(N, L)$ поверхні об'єкта, що має абсолютну температуру T ; $\varepsilon(\psi)$ – індикатриса спектрального коефіцієнта випромінювання поверхні об'єкта; S_{λ} – абсолютна спектральна чутливість приймача випромінювання тепловізора; λ_1, λ_2 – межі спектральної чутливості приймача випромінювання; $\tau_o(\lambda), \tau_a(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт пропускання оптичної системи і шару атмосфери; y, z – координати елемента $dS(N, L)$ поверхні об'єкта у просторі предметів.

Для аналізу впливу на якість зображення передатних характеристик приймальної системи тепловізора, приймача випромінювання, електронного блоку обробки інформації і дисплея використовується розподіл освітленості $E(y', z')$, яке визначається по формулі [7]:

$$E(y', z') = \tau_o \cdot \omega' \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L(\nu, \mu) \cdot h_o(\nu, \mu) \cdot h_n(\nu, \mu) \cdot h_e(\nu, \mu) \cdot h_d(\nu, \mu) \cdot e^{j2\pi(\nu y' + \mu z')} d\nu d\mu, \quad (2)$$

де ω' – задній апертурний кут оптичної системи тепловізора з інтегральним коефіцієнтом пропускання τ ; $h_o(\nu, \mu)h_n(\nu, \mu)h_e(\nu, \mu)h_d(\nu, \mu)$ – модуль передатної характеристики відповідно до оптичної системи, приймача випромінювання, електронного блоку обробки інформації і дисплея тепловізора; y', z' – координати елемента dS поверхні об'єкта в просторі зображень; $L(\nu, \mu)$ – просторово-частотний спектр яскравості поверхні об'єкта; ν, μ – просторові частоти, приведені до площини зображень.

Таким чином, користуючись приведеними моделями тепловізійних зображень, рівень відеосигналів в яких визначається виразом (1), можна розпізнати об'єкти усередині їх контуру.

Актуальним також є вирішення проблеми виявлення об'єктів на слабконтрастних тепловізійних зображеннях. Загальновідомо, що основне завдання тепловізорів полягає у виявленні на максимальній дальності слабконтрастних об'єктів, що потрапили у поле зору оптичної системи. Кутовий розмір спостережуваних цілей в них менше або дорівнює елементарному кутовому полю інфрачервоних матричних приймачів випромінювання [8-10].

Оскільки положення об'єкта заздалегідь невідоме, тепловізійна система вирішує складну задачу виявлення випадкового сигналу. В процесі її рішення система повинна

вказати на те чи є присутнім тільки шум, чи окрім шуму присутній тепловізійний об'єкт.

Традиційно таке завдання вирішується шляхом пошуку тепловізійного об'єкту за задалегідь відомими його характеристиками. Нині для тепловізорів використовують амплітудний метод виявлення тепловізійного об'єкту на тепловізійному зображенні. Отримане на дисплеї зображення наводиться відповідно до відеосигналу, що поступив з виходу матричних приймачів випромінювання. Кожному пікселю у відповідність ставлять обмежене число дискретних рівнів яскравості – рівнів квантування. Чим більше рівнів квантування, тим вище якість зображення. Для виявлення об'єкту використовують пороговий спосіб. Вибір порогу роблять з урахуванням того, що яскравості випромінювання шуму об'єкту відрізняються по амплітуді. Поріг спрацьовування вибирається автоматично по середньому рівню яскравості фонового шуму. Ті області зображення, де яскравість вище встановленого порогу, вважають тепловізійним об'єктом, інші – шумами [5].

Проблеми виявлення об'єктів виникають внаслідок потенційно слабкої їх контрастності, низького рівня помітності і наявності шумів. Шумові компоненти сигналу, що утворюються внаслідок особливостей вживаних ПЧ-приймачів і неідеальності сигналу передачі даних призводять до погіршення зображення точкового теплового об'єкту на дисплеї.

З метою поліпшення якості зображень були створені різні способи виявлення, виділення, цифрової фільтрації і обробки тепловізійного двомірного зображення. Обробка зображень проводиться в реальному масштабі часу. Основними способами обробки зображень є алгоритми цифрового шумозаглушення, накопичення сигналів, підвищення контрастності, сегментації, підкреслення меж тощо.

У загальному випадку виявлення об'єкту на тлі адитивних шумів в тепловізійному зображенні описується імовірнісними методами. При цьому якісними і кількісними показниками може служити умовна вірогідність правильного виявлення D і хибної тривоги F . Рішення про наявність або відсутність об'єкту в термографічному зображенні приймається за допомогою порогового пристрою, який орієнтований на напругу порогу U_0 . Вірогідність правильного виявлення D корисного сигналу об'єкту залежно від поточного значення напруги $u(t)$ визначається як [9]:

$$D = \int_{U_0}^{\infty} p_{cu}(u) du, \quad (3)$$

де $p_{cu}(u)$ – щільність вірогідності суми корисного сигналу і шуму на вході ПЧ-приймача випромінювання.

Вірогідність неправдивої тривоги F визначається аналогічним співвідношенням із заміною $p_{cu}(u)$ на щільність вірогідності шуму $p_u(u)$ на вході ПЧ-приймача випромінювання:

$$F = \int_{U_0}^{\infty} p_u(u) du, \quad (4)$$

Аналіз показав, що щільність вірогідності $p_{cu}(u)$ і $p_u(u)$ при обробці термографічних зображень визначається, як правило, нормальним законом розподілу. При такому розподілі сигналу і шуму на вході ПЧ-приймача випромінювання на його виході $p_{cu}(u)$ і $p_u(u)$ описуватимуться відомим законом Релея:

$$p_u(u) = u \cdot e^{-u^2/2}, \quad (5)$$

та

$$p_{cu}(u) = u \cdot I_0(qu) \cdot e^{-(u^2+q^2)/2}, \quad (6)$$

де $q^2 = S/N$ – відношення сигнал/шум по потужності, а $I_0(qu)$ – модифікована функція Бесселя нульового порядку. У формулі (6) величину q прийнято називати параметром виявлення.

Підставивши (5) в (4), отримаємо співвідношення для визначення вірогідності неправдивої тривоги:

$$F = \int_{U_0}^{\infty} u e^{-u^2} du = e^{-U_0^2/2}, \quad (7)$$

З виразу (7) неважко отримати формулу для обчислення напруги U_0 порогового рівня, яке необхідно встановити в системі цифрової обробки:

$$U_0 = \sqrt{2 \ln(1/F)}, \quad (8)$$

Використовуючи формули (3) і (6) визначають вірогідність правильного виявлення сигналу об'єкту на тлі шумів:

$$F = \int_{U_0}^{\infty} u \cdot I_0(qu) \cdot e^{-(u^2+q^2)/2} du \quad (9)$$

Здаючи значення порогу U_0 для необхідної вірогідності неправдивої тривоги F , за виразом (9) обчислюють вірогідність правильного виявлення об'єкту при конкретних значеннях відношення сигнал/шум на вході ПЧ-приймача випромінювання. Метод комп'ютерної обробки цифрового потоку відеоданих зображення, результатом застосування якого стає виявлення об'єкту, можна назвати методом компенсації адитивного шуму. Запропонований метод об'єднує декілька способів виявлення тепловізійних об'єктів, що відрізняються типом математичної обробки цифрового масиву зображення.

Розглянемо запропонований метод виявлення об'єкту на тепловізійному зображенні за допомогою просторово-часової фільтрації і нелінійною компенсацією шуму. Запропонований просторово-часовий фільтр з нелінійною обробкою реалізується сигнальним процесором відповідно до розробленого алгоритму [8]:

1. Обчислення середнього значення яскравості кадру:

$$\alpha = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M u_{n,m} \quad (10)$$

де $u_{n,m}$ – елемент масиву $U_{N,M}$ містить інформацію про напругу, пропорційному рівню шуму, знятого з осередку в n -й рядку на m -му стовпці.

2. Формування масиву значень лінійної фільтрації $F_{N,M}$. У кожен осередок пікселя кадру, що має індекси n та m , записується результат:

$$f_{n,m} = \frac{u_{n,m}}{\alpha} \quad (11)$$

3. Формування масиву значень нелінійної фільтрації $\bar{F}_{N,M}$. У кожен осередок пікселя, що має індекси n та m , записується результат:

$$\bar{f}_{n,m} = [f_{n,m}]^S \quad (12)$$

де S – коефіцієнт нелінійної фільтрації.

4. Визначається адаптивний поріг обробки.

5. Здійснюється порогова обробка, в процесі якої порівнюються значення

елементів $\bar{f}_{n,m}$ масиву $\bar{F}_{N,M}$ з адаптивним порогом ухвалення рішення $U_0 > 1$.

6. По адаптивному порогоу U_0 в елемент $\bar{f}_{n,m}$ записується «0», якщо передбачається що у відповідному елементі масиву $\bar{f}_{n,m} \leq U_0$ знаходиться тільки шум. В елемент $\bar{f}_{n,m}$ записується «1», якщо передбачається, що у відповідному елементі масиву $\bar{f}_{n,m} > U_0$ знаходиться піксель об'єкту.

Фактично виявлення об'єкту розпочинається з попередньої математичної обробки і закінчується розділенням елементів масиву зображення на два класи шляхом порівняння отриманих результатів з адаптивним порогом. Тим елементам масиву, які мають властивості шуму, привласнюються нульові значення, в ті, що залишилися заносяться одиниці. В результаті цих дій створюється бінарний масив ухвалення рішення. Відображене на дисплеї бінарне зображення дозволяє однозначно приймати рішення про наявність тепловізійного об'єкту. Таким чином остаточно формується масив $\bar{F}_{N,M}$, який може бути використаний для створення бінарного зображення на дисплеї. По номерах рядків і стовпців пікселів, в яких знаходяться одиничні значення, визначається просторове положення об'єкту на зображенні. На рисунку показані початкове і бінарне зображення, отримане після процедури виявлення.

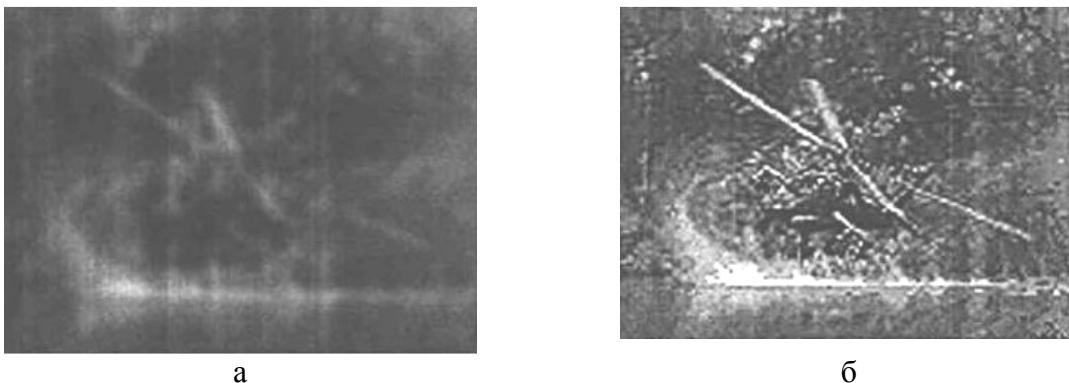


Рис. - Виявлення гелікоптера на тепловізійному зображенні, де:
а – початковий кадр; б – виявлений об'єкт.

Суть розробленого методу виявлення об'єкту на тлі шуму пов'язана з нелінійною операцією, яка підвищує вірогідність ухвалення рішення про наявність шуканого тепловізійного об'єкту у полі зору тепловізора. Результатом нелінійної операції (12), піднесення до степеня S відношення (11) значення яскравості елементу до середнього значення яскравості кадру (10), буде отримання масиву нелінійної фільтрації.

У кожному елементі масиву записані величини, які можуть бути менші або більше 1. Ті елементи, значення яких менше 1, відповідають шуму. У осередках, значення яких більше 1, може бути елемент тепловізійного об'єкту. Виявити осередок, що відповідає за величиною випромінюванню тепловізійного об'єкту можна тільки при порівнянні величин з адаптивним порогом ухвалення рішення. На цьому закінчується попередня математична обробка цифрового масиву зображення і починається порогова обробка.

Висновки. Підсумовуючи вищевикладене, можна стверджувати, що тепловізійні прилади є необхідною складовою комплексу системи національної безпеки, зокрема для забезпечення ефективної протидії сучасним загрозам національній безпеці на державному кордоні. Враховуючи важливість вирішення завдань щодо забезпечення безпеки, прийняття на озброєння тепловізійного

обладнання надає ринку систем охорони нові можливості та перспективи розвитку. Так, розроблений високоефективний метод моделювання тепловізійних зображень дозволяє розпізнати об'єкти усередині їх контуру, а запропонований метод комп'ютерної обробки цифрового потоку відеоданих зображення дозволяє виявити слабконтрастний об'єкт, що потрапив у поле зору оптичної системи. Зазначимо, одними з найактуальніших у розвитку приладів візуального спостереження є дослідження по усуненню основних недоліків тепловізійних приладів.

Література

1. Пустоветов В. М. Дослідження питань ефективності тепловізійних засобів спостереження в різних кліматичних умовах / В. М. Пустоветов, А. Б. Добровольський // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – № 2. – С. 205-207.
2. Коробчинський М. В. Застосування інфрачервоних засобів при вирішенні завдань підрозділів спеціального призначення сухопутних військ / М. В. Коробчинський, М. М. Руденко // Військово-технічний збірник. – 2009. – № 2. – С. 78-84.
3. Лисий М. І. Дослідження особливостей, характеристик будови та застосування тепловізорів в охороні державного кордону / М. І. Лисий, Ю. О. Царьов, А. Б. Добровольський // Збірник наукових праць Військового ін-ту Київського національного ун-ту ім. Т. Шевченка. – 2011. – Вип. 32. – С. 63-70.
4. Климченко В. Й. Обґрунтування вимог до оптико-електронних пристроїв візуального виявлення і супроводження повітряних цілей в інтересах радіотехнічних військ Повітряних сил Збройних Сил України / В. Й. Климченко, Г. Г. Камалтинов, В. Л. Місайлов, Д. Ю. Свистунов // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2011. – Вип. 1 (27). – С. 80-85.
5. Выров В. Б. Современные методы обработки сигналов / В. Б. Выров, Ф. Н. Бузылёв, А. В. Герасимов и др. // Нелинейный мир. – 2010. – Т. 8, № 5. – С. 432-435.
6. Бузылёв Ф. Н. Методы и алгоритмы цифровой обработки и коррекции тепловизионных изображений : автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук. : спец. 05.11.04. "Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения" / Ф. Н. Бузылёв. – Москва, 2010. – 20 с.
7. Дворкович А. В. Цифровая обработка телевизионных и компьютерных изображений / Под ред. Ю. Б. Зубарева, В. П. Дворковича. – М. : Междунар. центр науч. и техн. информации, 1997. – 212 с.
8. Якименко И. В. Пространственная фильтрация тепловых объектов на атмосферном фоне / И. В. Якименко, М. В. Жендарев // Математическая морфология: Электрон. мат. и медико-биологич. ж-л. – 2009. – Т. 8, № 1. – Режим доступа: <http://www.smolensk.ru/user/sgma/MMORPH/TITL.HTM>.
9. Бузылёв Ф. Н. Применение цифровой обработки для фильтрации шума в звуковых сигналах / Ф. Н. Бузылёв, В. И. Нефедов, Е. В. Егорова и др. // Нелинейный мир. – 2009. – Т. 7, № 11. – С. 869-871.
10. Нефедов В. И. Алгоритм обработки изображений / В. И. Нефедов, Ф. Н. Бузылёв, А. С. Сигов // INTERMATIC-2009 : материалы Междунар. науч.-технич. конф. ["Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения"], (Москва, 7-11 дек. 2009 г.). – М., 2009. – ч. 4. – С. 138-139.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СРЕДСТВ ВИЗУАЛЬНОГО НАБЛЮДЕНИЯ ОХРАНЫ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ГРАНИЦЫ

Ю. П. Мисюк

В статье рассматриваются вопросы применения тепловизоров в охране государственной границы. Предложен высокоэффективный метод моделирования тепловизионных изображений, что позволяет распознать объекты внутри их контура, и метод компьютерной обработки цифрового потока видеоданных изображения.

UPGRADING OF IMAGES OF THERMAL FACILITIES OF VISUAL SUPERVISION OF GUARD OF STATE BOUNDARY

Iu. P. Mysiuk

In the article the questions of application of thermal facilities are examined in the guard of state boundary. The high-efficiency method of design of thermal facilities offers, that allows to recognize objects into their contour, and method of computer treatment of digital stream of viewdatas of image.