

МЕТОД ПЕРВИННОЇ ОБРОБКИ ТЕРМОГРАМ, ОТРИМАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ МАЛОРОЗМІРНИХ ТЕПЛОВІЗОРІВ

Метою статті є розробка і дослідження методу видалення шумів на термограмах низької просторової роздільної здатності, отриманих з комерційних малогабаритних тепловізійних камер, які за своїми масогабаритними характеристиками можна використовувати на міні-БПЛА для теплового моніторингу об'єктів енергетичної інфраструктури. Визначено що основним параметром, який несе інформацію про режим роботи об'єкта і наявності дефектів, при тепловому моніторингу є розподіл температури по поверхні об'єкта, який може реєструватися тепловізором. Проведено аналіз характеристик комерційних тепловізорів з неохолоджуваними матрицями. Вони мають невисоку вартість та невелику масу, таким чином, їх застосування дозволяє істотно знизити вартість системи моніторингу за рахунок як зниження вартості корисного навантаження так і вимог до вантажопідйомності БПЛА. Особливістю тепловізійної зйомки є порівняно мала роздільна здатність термограм та значний рівень шумів на них, що вимагає застосування методів обробки зображень, які б мінімізували рівень шумів. Розглянуто процес отримання термограм з використанням малогабаритного тепловізора в реальному масштабі часу. Запропоновано і реалізовано метод видалення основних видів спотворень на термограмах, заснований на адаптивному цифровому медіанному фільтрі. Проаналізовано процес появи теплового градієнта, що виникає під час роботи болометричної матриці, наведено метод його видалення. Показано, що запропоновані методи дозволяють практично повністю усунути артефакти наявні на термограмі.

Ключові слова: теплові зори; адаптивна медіанна фільтрація; об'єкти електроенергетичної інфраструктури; безпілотні літальні апарати; обробка зображень.

Вступ

В останні роки значно зріс інтерес до вимірювань температури за допомогою тепловізійних камер (тепловізорів). Вони використовуються в тих випадках коли необхідний контроль теплового стану об'єкта, або необхідно безконтактне вимірювання температури [1]. Широке застосування тепловізори отримали в енергетиці, будівництві та промисловості [2].

Тепловий моніторинг заснований на реєстрації і аналізі температури контрольованих об'єктів. Головною умовою його застосування є наявність в об'єкті моніторингу теплових потоків. Процес передачі теплової енергії, виділення або поглинання тепла в об'єкті призводить до того, що його температура змінюється щодо навколишнього середовища. Основним параметром, який несе інформацію про режим роботи об'єкта і наявності дефектів, при тепловому моніторингу є розподіл температури по поверхні об'єкта [3].

Огляд існуючих рішень моніторингу із застосуванням тепловізорів. Останнім часом для реєстрації стану та моніторингу об'єктів, розподілених на великій площі (картографія, сільське та лісове господарство, великі промислові об'єкти та мережі) поряд із традиційними методами застосовуються методи автоматизованого тепловізійного [4] сканування за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

В процесі моніторингу ЛЕП, застосування тепловізійного сканування допомагає вирішити задачу виділення ділянок ЛЕП і її конструкційних елементів, температура яких виходить за допустимі межі а також сумісно з зображеннями видимого діапазону, для розпізнавання рослинності. Спільно з БПЛА доцільно застосовувати тепловізори з порівняно широким кутом просторового дозволу, які дозволя-

ють зареєструвати перевищення температури вище заданого рівня, і зберігати отримані термограми для подальшої обробки.

Зазвичай тепловізори встановлюються на літаючі платформи спільно з камерами видимого діапазону та дозволяють виявити потенційні проблеми на ізоляторах або провідних лініях [5]. Однак дослідники [6] відзначають складність точного вимірювання температури невеликих об'єктів (якими є елементи ЛЕП) навіть з невеликої відстані. На це впливають погодні умови та завади на термограмах які обумовлені властивостями матеріалів об'єктів.

В роботі [7] показана теоретична можливість застосування тепловізорів з неохолоджуваними матрицями для безконтактного вимірювання температури провідів ЛЕП. В [8] наведено метод визначення стану провідників по термограмі з урахуванням нагріву струмом, вітрових умов і температури навколишнього середовища.

З аналізу літератури, можна відзначити, що методи використання тепловізорів для моніторингу ЛЕП опрацьовані недостатньо. Існуючі методи, при використанні тепловізорів з літаючих платформ, дозволяють в більшості випадків виявити температурні аномалії, а не провести вимірювання температури.

Метою статті є розробка і дослідження методу видалення шумів на термограмах низької просторової роздільної здатності, отриманих з комерційних малогабаритних тепловізійних камер, які можна використовувати на БПЛА в процесі моніторингу об'єктів енергетичної інфраструктури.

Аналіз комерційних тепловізорів, які можуть бути застосовані на БПЛА

Основними виробниками компактних недорогих тепловізійних камер є фірми Thermal Expert, Flir,

SeekThermal. Останнім часом спостерігається стійка тенденція до зростання роздільної здатності тепловізійних матриць, з одночасним зменшенням габари-

тів і ціни пристроїв. Порівняльна характеристика типових компактних тепловізійних камер нижнього цінового діапазону показана в табл. 1.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика компактних тепловізійних камер

Камера	Кут огляду	Роздільна здатність	Маса, гр	Діапазон вимірювання, °С
Flir VUE	69-32	640x512 (336x256)	92-113	-20, 120 (0,1)
Thermal Expert Q1	28-56	384x288	27	-10, 150 (0,08)
Flir One First Gen	46	80x60	57	-20, 120 (0,1)
Flir One	46	160x120	57	-20, 120 (0,1)
Seek Thermal Compact	36	210x156	17	-40, 350 (0,5)
Seek Thermal XR	20	210x156	17	-40, 350 (0,5)
Seek Thermal Pro	32	320x240	141	-40, 350 (0,07)

При монтуванні тепловізорів на БПЛА важливу роль відіграє ряд чинників, які не чинять істотного впливу при створенні наземних систем автоматизованого збору і обробки сигналів. Це в першу чергу масогабаритні характеристики, та споживана потужність, а також організація каналів зв'язку сенсору тепловізора і бортового пристрою збору і обробки сигналів.

Як видно з табл. 1, типові комерційні тепловізори мають роздільну здатність від 80 до 210 елементів (по більшій стороні) і масу в кілька десятків грам. Серед особливостей деяких пристроїв слід відзначити можливість суміщення тепловізійних та зображень видимого спектру, що дозволяє більш точно визначати положення областей нагріву в просторі.

На рис. 1 наведено схему болометричного тепловізора SeekThermal, як найбільш перспективної моделі для використання в БПЛА, даний пристрій має найменшу масу (менше ніж 20 гр.) при досить великих розмірах матриці і мінімальній ціні. Зображення потрапляє в прилад через об'єкти з халькогеніду з кутом огляду 36 (20) градусів. Об'єкти має кільце фокусування. Чутливим елементом є сенсор, що складається з матриці мікроболометрів на оксиді ванадію, що працює в діапазоні електромагнітних хвиль 7,2 ... 13 мікрон.

Основною технічною проблемою при використанні даного тепловізора в бортовій системі БПЛА є обмеженість інтерфейсів підключення (працює тільки з мобільними телефонами та їх ОС) і закритість API. Для підключення до ПК або бортового комп'ютера БПЛА доцільно схемотехнічно змінити інтерфейс підключення камери, для чого необхідно поєднати сигнальну лінію Sense на тепловізорі з лінією GND, і змінити роз'єм на USB-Type-A (або Micro-B).

Алгоритм взаємодії з пристроєм складається з таких кроків:

1. Початкова настройка та ініціалізація. Встановлюється режим роботи, параметри обробки зображення і стан термошторки (ТШ). Після чого включається режим передачі кадрів з калібрувальною та технологічною інформацією.

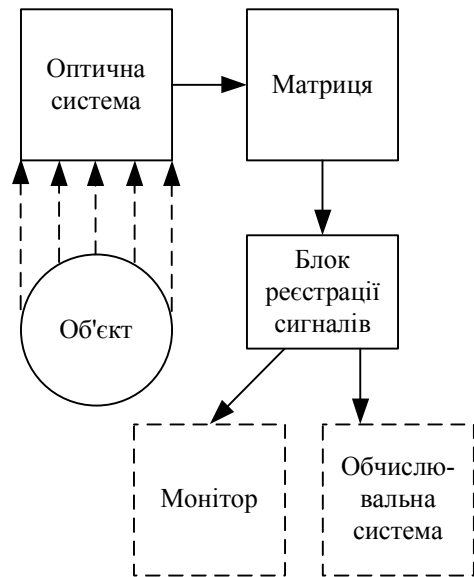
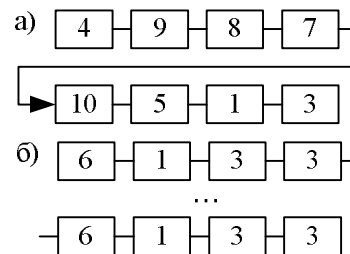


Рис. 1. Схема тепловізора SeekThermal.

2. Калібрувальна інформація складається з декількох кадрів, які задають: температурний градієнт, матрицю збійних елементів і коефіцієнти посилення мікроболометрів, а також ряд калібрувальних коефіцієнтів (рис. 2, а).



- 1 - калібрувальний кадр (шторка закрыта);
- 3 - термограма;
- 4 - технологічна маска дефектних елементів;
- 6 - початок калібрації (ТШ закривається);
- 8 - кадр з закритою ТШ;
- 9 - температурний градієнт;
- 10 - коефіцієнти підсилення елементів.

Рис. 2. Послідовність кадрів що поступають з тепловізора: а – при ініціалізації; б – в робочому режимі

3. Робочий режим, в якому передається пара калібрувальних кадрів (при закритій ТШ) і серія термограм. Всі кадри мають однакову роздільну здатність. Калібрувальні кадри дозволяють компенсувати нагрів болометрів, при розрахунку температури (рис. 2, б).

4. Відключення тепловізора, після закінчення роботи.

Незважаючи на наявність калібрувальних даних, отримані термограми відрізняються великим рівнем шумів, як в просторової, так і в часовій області (рис. 3).

Вони вимагають подальшої обробки з використанням методів цифрової обробки зображень.

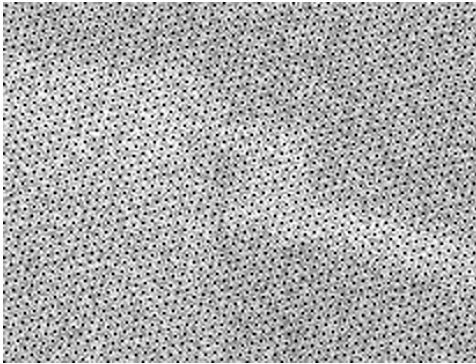


Рис. 3. Приклад термограми, що надходить безпосередньо з тепловізора (кадр №3).

Метод усунення завад з термограми

Кожна термограма T являє собою матрицю розміром 208 на 156 елементів, кожне значення елемента кодується 16 бітами. Два останніх стовпчика не відображаються, передостанній містить ваговий коефіцієнт лінії, а останній завжди значення 0. При цьому, діапазон робочих значень знаходиться від ~2000 до ~16000. Як видно з рис. 3, термограма не може бути використана безпосередньо, без фільтрації і подальшої обробки.

Завади на термограмі можна умовно розділити за такими групами:

1. Технологічні - кожен 15 елемент, починаючи з 10, містить 0 значення.

2. Апаратні - збійні болометри, хаотично розподілені по матриці приладу. Аналіз також показує, що частина болометрів входить в насичення за кілька десятків мілісекунд після відкриття ТШ.

3. Теплові - тепловий градієнт по краях матриці, що збільшується в просторі та по амплітуді з часом. Виникає через нерівномірне прогрівання частин матриці і ТШ.

4. Флуктуаційні - довільна зміна рівня сигналу що приходить з болометра в часі. Амплітуда таких завад зменшується з часом.

Для видалення технологічних шумів доцільно кожен технологічний елемент $T(x, y)$, (де x, y - просторові координати), на всіх термограмах включаючи калібрувальні, обробляти наступним чином: замінювати його значення на $T'(x, y)$, що отримано за допомогою модифікованого медіанного фільтру з

апертурою 3×3 , в якому центральний елемент не впливає на результати фільтрації:

$$T'(x, y) = \text{median} \{ T(x-1, y-1), T(x, y-1), T(x+1, y-1), T(x-1, y), T(x+1, y), T(x-1, y+1), T(x, y+1), T(x+1, y+1) \}. \quad (1)$$

Ознака технологічного елемента $f_b(x, y)$ може бути отримана за такою формулою:

$$f_b(x, y) = (x + y \cdot w - o) \bmod 15, \quad (2)$$

де $w = 206$ - ширина термограми; $o = 10$ - зсув першого технологічного елемента матриці.

Якщо ознака дорівнює 0, то елемент з координатами $x, y \in$ технологічним і повинен бути вилучений.

Фільтр (1) можливо модифікувати таким чином, щоб у фільтрації брали участь тільки елементи, для яких $f_b(x, y) \neq 0$. Це дозволить видаляти збійні елементи по довільній масці ознак $m \{ f_b(x, y) \neq 0 \}$, наприклад отриманій з тепловізора (рис.2) кадр з ідентифікатором №4. З урахуванням цього вираз (1) може бути представлено як

$$T'(x, y) = \text{median}_i \{ T [c(x, y)_i \in m] \}. \quad (3)$$

Для того щоб прибрати оптичні спотворення які впливають на показання приладу, доцільно застосувати плоску корекцію термограми [9]. Для кожного елемента термограми можна порівняти коефіцієнт посилення (кадр з ідентифікатором №10) $G(x, y)$ та інтенсивність, зареєстровану за відсутності випромінювання на сенсорі $D(x, y)$ (кадри з ідентифікаторами №6 та №1, відповідно).

Скориговане значення можна обчислити за формулою

$$T'_c(x, y) = \alpha \frac{T'(x, y) - D(x, y)}{F(x, y) - D(x, y)}, \quad (4)$$

де $\alpha = G(x, y) \cdot [F(x, y) - D(x, y)]$; $F(x, y)$ - плоске, монотонне зображення.

Підставив α до (4) отримаємо

$$T'_c(x, y) = G(x, y) \cdot [T'(x, y) - D(x, y)]. \quad (5)$$

Така корекція компенсує різницю засвічення та затінення в матриці тепловізора.

Апаратні шуми, виявляються на двох видах елементів болометричної матриці: повністю непрацюючі болометри, і болометри, працездатність яких змінюється в часі після відкриття ТШ. Як показано вище, для першого типу елементів доцільно застосувати такий же фільтр, як і для технологічних елементів.

Елементи, які деградують з часом, доцільно видаляти за допомогою адаптивного медіанного

фільтра. Для цього будується гістограма H розподілу рівнів по термограмі. На гістограмі присутні піки, відповідні за основні поверхні мінімальної температури, протяжні об'єкти середнього та максимального нагріву. За допомогою гістограми відсікається 1% мінімальних та максимальних значень. Це дозволяє видалити більшу частину аномальних викидів обумовлених нестабільністю елементів, які не були зареєстровані в масці ознак m .

Нормалізація гістограми проводиться таким чином, щоб порогове значення, при якому використовується фільтрація, дорівнювало 1. За нормалізованої гістограми H' , визначається ймовірність появи елементу з певним значенням, яка використовується як параметр фільтра. Виходячи з ймовірності появи $p(H'_i)$ елементу $i = T'(x, y)$, вибирається розмір апертури медіанного фільтра, і визначається необхідність його застосування. Фільтрація проводиться таким чином:

$$T''(x, y) = \begin{cases} T'_c(x, y), & \text{якщо } p(H'_i) \geq 1 \\ \text{median}(x, y, b), & \text{якщо } p(H'_i) < 1 \end{cases} \quad (6)$$

де $b = f(p(H'_i)) \in \{3, 5, 7, 9\}$ - апертура вікна фільтра.

Запропонований метод дозволяє повністю видалити технологічні та збійні елементи, при цьому вносячи мінімальні спотворення в термограму. Пе-

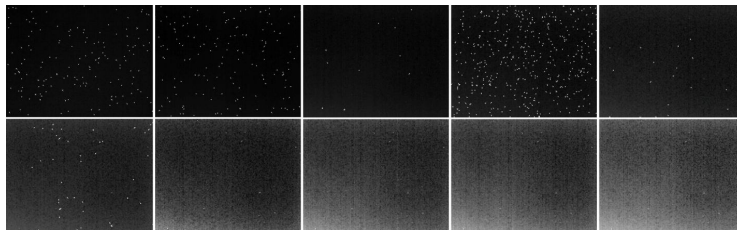


Рис. 5. Зміна теплового градієнта болометричної матриці в часі (зліва-направо, зверху-вниз).

Для видалення шумів такого типу пропонується використовувати цифровий фільтр високих частот. Але фільтр такого типу значно спотворює рівні елементів термограми, тому його застосування доцільно лише в тому випадку, якщо термограма аналізується людиною, а не піддається автоматичній обробці.

Висновки

Порівняння термограм адаптивного медіанного фільтра із медіанним фільтром з фіксованою апер-

ретворена таким чином термограма (рис. 3) показана на рис. 4.

Тепловий градієнт по краях матриці представляє низькочастотний шум змінюється (збільшується з часом). На рис. 5 показаний приклад зареєстрованого низькочастотного шуму, обумовленого нерівномірним нагріванням матриці і характер його зміни в часі. Виміри проводилися при температурі навколишнього середовища 20°C. Прилад був орієнтований на термічно однорідну поверхню.

Кожне зображення фіксувалося з інтервалом в 2 хвилини. Після 10 хвилин спостерігається стрибкоподібний процес зростання рівню градієнту.

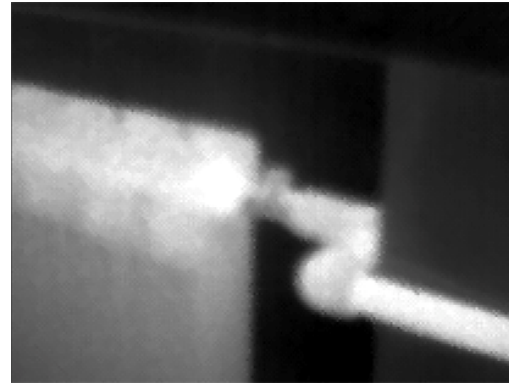


Рис. 4. Термограма, оброблена згідно із запропонованим методом.

турою 3×3 показує, що при використанні фіксованої апертури, термограма стає більш розмитою, губляться дрібні деталі.

При цьому, адаптивна медіанна фільтрація в середньому працює на 5-15% швидше, за рахунок того що частина елементів не обробляється.

Запропоновані рішення знайшли застосування в автоматизованій системі моніторингу об'єктів електроенергетичної інфраструктури за допомогою БПЛА.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Криксунов Т. З. Справочник по основам ИК техники / Т. З. Криксунов. – М.: Сов. радио, 1978. 400 с.
2. Бугаенко И. О. Цифровая инфракрасная аэросъемка инженерных сооружений и земной поверхности / И. О. Бугаенко, Е. В. Каршаков, В. В. Макаров // Геопрофи. – 2006. – № 6. – С. 47-49.
3. Основы тепловидения / В. В. Коротяев, Г. С. Мельников, С. В. Михеев, В. М. Самков, Ю. И. Солдатов — СПб.: НИУ ИТМО, 2012. – 122 с.
4. Афонин А. В. Инфракрасная термография в энергетике / А. В. Афонин и др. Под ред. Р. К. Ньюпорта, А. И. Таджибаева. – Т. 1. Основы инфракрасной термографии. — СПб.: СПЭ- ИПК, 2000. – 240 с.
5. Zheng, L., Yi, R. Fault diagnosis system for the inspection robot in power transmission lines maintenance. *Proc. SPIE 7513. International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Imaging and Process Technology*. 2009.
6. Stockton G.R., Tache A. Advances in applications for aerial infrared thermography. *Proc. SPIE 6205 (Thermosense XXVIII)*, 200662050C. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.669513>.
7. Qin L., Chen S., Gao Q., Yi X. Inspection for electric power systems using uncooled infrared camera. *Proc. 25th International Conference on Infrared and Millimeter Waves, Conference Digest*, 2000. P. 441-442.

8. Frate J., Gagnon D., Vilandre R., Dansereau R. Evaluation of overhead line and joint performance with high-definition thermography. *Proc. IEEE ESMO - 9th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance*. Montréal, Qué, Canada, 8-12 October 2000. P. 145-151.
9. Olsen D., Dou C., Zhang X., Hu L., Kim H., Hildum E. Radiometric Calibration for AgCa. *Remote Sens*. 2010. Vol. 2. P. 464-477.

REFERENCES

1. Kriksunov, T.Z. (1978), *Reference book on the fundamentals of IR technology*, Soviet Radio, Moscow, 400 p.
2. Bugaenko, I.O., Karshakov, E.V. and Makarov V.V. (2006), "Digital Infrared Aerial Surveys of Engineering Structures and the Earth's Surface", *Geoprofi*, No. 6, pp. 47-49.
3. Korotaev, V.V., Melnikov, G.S., Mikheev, S.V., Samkov, V.M. and Soldatov Yu.I. (2012), *Fundamentals of thermal imaging*, NRU ITMO, St. Petersburg, 122 p.
4. Afonin, A.B. (2000), *Infrared Thermography in the Energy Sector, Volume 1. Basics of infrared thermography*, SPE-IPC, St. Petersburg., 240 p.
5. Zheng, L. and Yi, R. (2009), "Fault diagnosis system for the inspection robot in power transmission lines maintenance", *Proc. SPIE 7513. International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Imaging and Process Technology*.
6. Stockton, G.R. and Tache, A. (2006), "Advances in applications for aerial infrared thermography", *Proc. SPIE 6205 (ThermoseNSE XXVIII)*, 62050C, DOI: <https://doi.org/10.1117/12.669513>.
7. Qin, L., Chen, S., Gao, Q. and Yi, X. (2000), "Inspection for electric power systems using uncooled infrared camera", *Proc. 25th International Conference on Infrared and Millimeter Waves*, Conference Digest, pp. 441-442.
8. Frate, J., Gagnon, D., Vilandre, R. and Dansereau, R. (2000), "Evaluation of overhead line and joint performance with high-definition thermography", *Proc. IEEE ESMO - 9th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance*, Montréal, Qué, Canada, 8-12 October 2000, pp. 145-151.
9. Olsen, D., Dou, C., Zhang, X., Hu, L., Kim, H. and Hildum, E. (2010), "Radiometric Calibration for AgCa", *Remote Sens*, Vol. 2, pp. 464-477.

Received (Надійшла) 26.09.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.11.2018

Метод первичной обработки термограмм полученных с помощью малоразмерных тепловизоров

А. А. Зуев

Целью статьи является разработка и исследование метода удаления шумов на термограммах низкого пространственного разрешения, полученных коммерческими малогабаритными тепловизионными камерами, которые за своими массогабаритными характеристиками можно использовать на мини-БПЛА для теплового мониторинга объектов энергетической инфраструктуры. Определено что основным параметром, который несет информацию о режиме работы объекта и наличии дефектов, при тепловом мониторинге является распределение температуры по поверхности объекта, которое может регистрироваться тепловизором. Проведен анализ характеристик коммерческих тепловизоров с неохлаждаемыми матрицами. Они имеют невысокую стоимость и небольшую массу, таким образом, их применение позволяет существенно снизить стоимость системы мониторинга за счет снижения, как стоимости полезной нагрузки, так и требований к грузоподъемности БПЛА. Особенностью тепловизионной съемки является сравнительно малое разрешение термограмм и значительный уровень шумов на них, что требует применения методов обработки изображений, которые бы минимизировали уровень шумов. Рассмотрен процесс получения термограмм с использованием малогабаритного тепловизора в реальном масштабе времени. Предложен и реализован метод удаления основных видов искажений на термограммах, основанный на адаптивном цифровом медианном фильтре. Проанализирован процесс возникновения теплового градиента, который возникает во время работы болометрической матрицы, приведен метод его удаления. Показано, что предложенные методы позволяют практически полностью устранить артефакты имеющиеся на термограмме.

Ключевые слова: тепловизоры; адаптивная медианная фильтрация; объекты электроэнергетической инфраструктуры; беспилотные летательные аппараты; обработка изображений.

The method of primary processing of thermograms obtained using small-size thermal imagers

A. Zuev

The purpose of the article is to develop and study the method of noise removal on low spatial resolution thermograms obtained by commercial small-sized thermal imaging cameras, which due to their weight and sizes can be used on mini-UAVs for thermal monitoring of power facilities. The main parameter that carries information about the operation mode of the object and the presence of defects during thermal monitoring is the temperature distribution over the surface of the object, which can be recorded by a thermal camera. The characteristics of commercial thermal imagers with uncooled arrays were analyzed. Due to low cost and mass, their usage can significantly reduce the cost of the monitoring system by reducing both the cost of the payload and the requirements for UAV payload capabilities. An issue of thermal imaging is a relatively low resolution of thermograms and a significant level of noise on them, which requires the image processing methods that would minimize the noise level. The process of obtaining thermograms using a compact thermal imager in real-time was considered. A method of removing the main types of thermogram distortions, based on an adaptive digital median filter, was proposed and implemented. The process of occurrence of a thermal gradient that occurs during the operation of the bolometric matrix was analyzed, and a method for was removal is given. It is shown that the proposed methods allow almost completely eliminated the thermogram artifacts.

Keywords: thermal imagers; adaptive median filters; objects of electric energy infrastructure; unmanned aerial vehicles; image processing.