



Получена: 23.06.2022 г.

Приета: 01.08.2022 г.

ИЗГОТВЯНЕ НА ТЕХНОЛОГИЧНА СХЕМА ЗА ИЗПОЛЗВАНЕ НА ТЕРМОГРАФСКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ АНАЛИЗ НА ОБЩАТА ЕНЕРГИЙНА ЕФЕКТИВНОСТ НА СЕЛСКОСТОПАНСКА СГРАДА

П. Малджански¹, П. Чобанов², С. Кацарска-Филипова³, Д. Филипов⁴

Ключови думи: термографска камера, безпилотна летателна система (БЛС), обектно-ориентирана класификация

РЕЗЮМЕ

Използването на термографски изображения е свързано с редица предизвикателства, касаещи ниската им разделителна способност и слабия им локален контраст, за разлика от оптичните изображения. В настоящата статия се предлага технологична схема за използване на термографски изображения при анализа на общата енергийна ефективност на селскостопанска сграда, базирана на обектно-ориентирана класификация. Създадено е специализирано софтуерно приложение за анализ на термографски изображения – PLCh Thermography. За валидиране на резултатите са направени контролни измервания на температурите на точки директно от изследваната фасада и са сравнени със същите от регистрацията в термографските изображения.

¹ Пламен Малджански, проф. д-р инж., кат. „Фотограметрия и картография”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: maldjanp_fgs@uacg.bg

² Пламен Чобанов, проф. д-р инж., кат. „Строителни материали и изолации”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: chobanov_fce@uacg.bg

³ Силвия Кацарска-Филипова, гл. ас. д-р инж., кат. „Фотограметрия и картография”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: filipova_fgs@uacg.bg

⁴ Добромир Филипов, гл. ас. д-р инж., кат. „Фотограметрия и картография”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: filipov_fgs@uacg.bg

1. Въведение

Инфрарчервената термография е универсален безконтактен метод, който се прилага за различни видове физически активи, проучвания на сгради, механични компоненти и съоръжения. Използвана е за първи път за военни приложения, но в днешно време тази технология служи за наблюдение на състоянието на машините, както и за откриване, идентификация и диагностициране на неизправности.

Инфрарчервената термография е безконтактна техника за измерване на температура на обекти, която показва разпределението на температурата им в реално време. Всеки обект, който има температура, по-висока от абсолютната нула ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$) излъчва инфрарчервено лъчение.

Радиация, която се излъчва от който и да е обект, не се нуждае от присъствието на определена среда. Процесът на пренос на топлина е насочен към топлинно излъчване, което е вид на излъчваната от телата радиация поради тяхната температура. Той представлява разликата между количеството енергия, погълната и предадена от тяло. Законът на Стефан-Болцман дава топлопреминаването чрез радиация.

Уравнението се дава с формула (1), [1]:

$$Q_{rad} = A\sigma\xi(T_s^4 - T_{refl}^4), \quad (1)$$

където Q_{rad} е излъчена топлина от обект;

A – повърхност в m^2 ;

σ – константа на Стефан-Болцман ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{k}^4$);

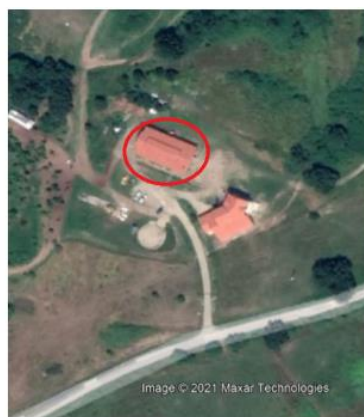
ξ – коефициент на излъчване (0,95);

T_s – температура на повърхността в К;

T_{refl} – отразена температура в К.

2. Обект на заснемане

В изпълнение на поставените научни цели бе проведен практически експеримент, свързан със заснемане на сградата [11, 12] на конна база с. Селянин в поземлен имот от КККР 10029.250.9 (фиг. 1).



Фиг. 1. Конна база с. Селянин

3. Използвана апаратура и софтуер

3.1. Yuneec E20Tx Radiometric Thermal Camera за H520E (YUNE20TVX33US)

(YUNE20TVX33US)

За добиване на термографски и RGB изображения е използвана безпилотна летателна система Yuneec E20Tx Radiometric Thermal Camera за H520E (YUNE20TVX33US) [15, 16] (фиг. 2).

Yuneec E20Tx е с резолюция 640x512 и с възможност чрез регистриране на малки температурни разлики да се направи количествена оценка за тяхното разпространение. RGB камерата с остатъчна светлина има 20x по-висока чувствителност, отколкото човешкото око, и улавя висококачествени образи, дори при условия на слаба светлина. Благодарение на радиометричната технология камерата E20Tx може да измери температурата на дадена област, като интерпретира интензивността на инфрачервен сигнал, достигащ до сензора. Тя събира данни за всеки пиксел на изображението, който след това може да бъде подложен на по-нататъшен анализ [2, 3].



Фиг. 2. Безпилотна летателна система Yuneec E20Tx Radiometric Thermal Camera за H520E (YUNE20TVX33US) [3]

3.2. Инфрачервен термометър: TROTEC TP7

Професионалният инфрачервен термометър TP7 Trotec използва многоточкова лазерна технология. Коефициентът на разстояние 40:1 позволява прецизни резултати от измерване. Иновативната многоточкова лазерна технология на TP7 не само сочи към измервателната цел с помощта на един лазер и очертава размера на измервателното петно чрез двоен лазер, а и комбинира тези две технологии и позволява да се улови измервателният обект както лесно, така и високо точно. Докато един насочващ лазер в центъра показва точката на измерване, още осем лазера показват граничните точки, обграждащи измервателната повърхност – като по този начин позволяват точни измервания за минимум време [4].

3.3. Термохигрометър TROTEC BC25

TROTEC BC25 се използва за определяне на температурата на въздуха, точката на оросяване и температурата на мокрия термометър, както и нивото на влажност. За оцен-

ка на измерванията са налични също така функция Max/Min (максимална и минимална стойност), средна стойност и функция Hold за замразяване на текущо измерената стойност. Освен това, топлинният индекс (HI) и привидната температура (WBGT индекс) могат да бъдат определени [5].

3.4. SDR 601S – GeoMax тотална станция

За заснемане на контролни точки по фасадата с точност вж. табл. 1.

Таблица 1. Теоретична точност ZTS 601S – GeoMax

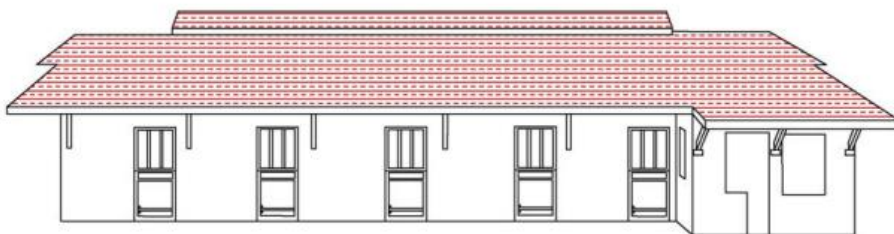
Точност SDR 601S – GeoMax	
Дължинна точност	$\pm 2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$
Обхват на призмата	3 500 m
Ъглова точност	3"

3.5. Специализирани софтуери

- Photomod;
- AgiSoft Metashape;
- ERDAS IMAGINE;
- PLCh Thermography.

4. Технологична схема за използване на термографски изображения

Фотограметричната обработка е извършена в среда на Photomod [19]. От формираните изображения с RGB сензора и измерените опорни точки е създаден векторен модел на югоизточната фасада на сградата (фиг. 3).



Фиг. 3. Векторен модел „Южна фасада конна база с. Селянин“ М 1:100

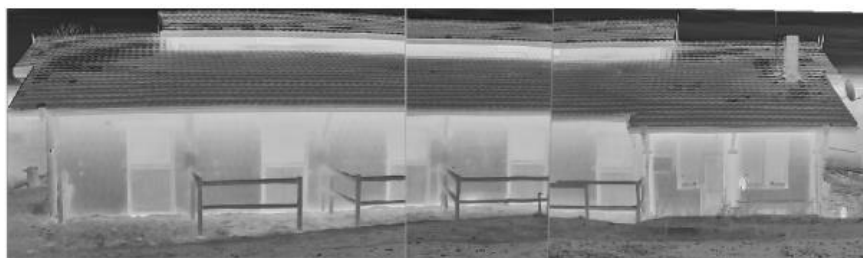
По резултати от използване на RGB сензора и проведено геодезическо заснемане на фасадите на сградата е формиран цифров модел на сградата и района около нея с пакета AgiSoft Metashape [18]. Създаден е фасаден план на югоизточната фасада на сградата. Изготвен е фасаден ортофотоплан на южната фасада на конна база с. Селянин. Вж. фиг. 4. Векторният модел е използван за рефериране на изображения от фасадата, напра-

вени с термографската камера [8] (фиг. 5). Част от тях са класифицирани, като е използвана обектно-ориентирана класификация в среда на ERDAS IMAGINE (фиг. 6).

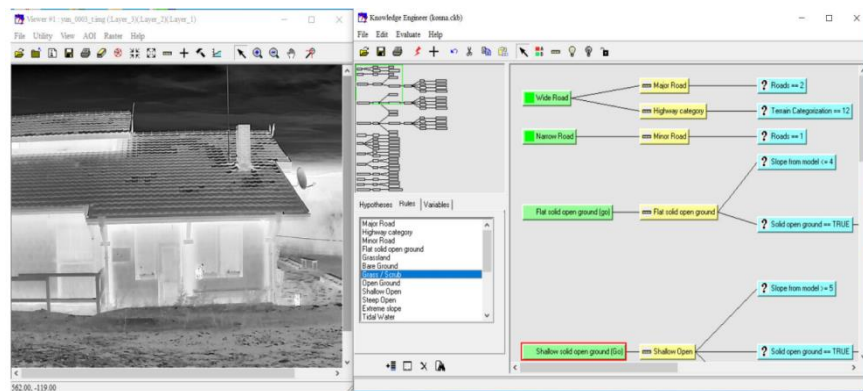
Финалните резултати са получени със специално създаденото софтуерно приложение на проф. Чобанов – PLCh Thermography, базирано на алгоритъма <Mini-max> [6, 7, 14] (фиг. 7).



Фиг. 4. Ортофотоплан „Южна фасада конна база с. Селянин“ – М 1:100

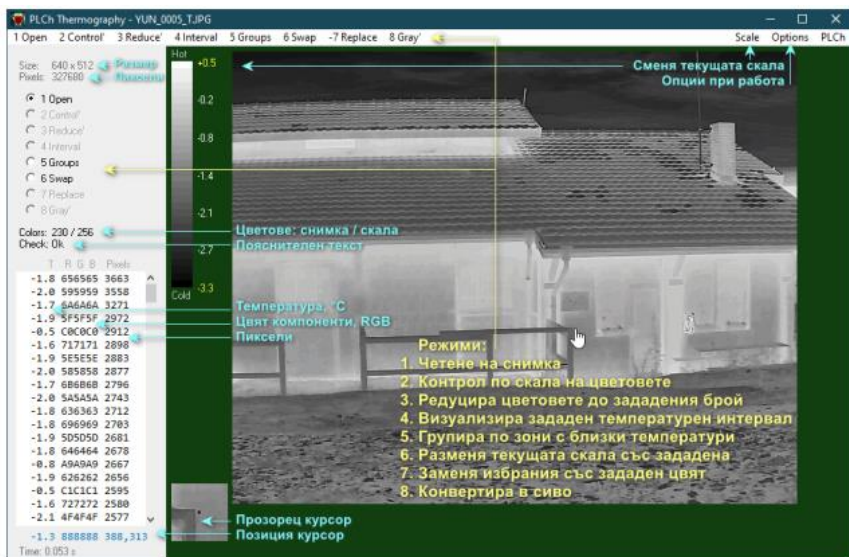


Фиг. 5. Термографско заснемане „Южна фасада конна база с. Селянин“

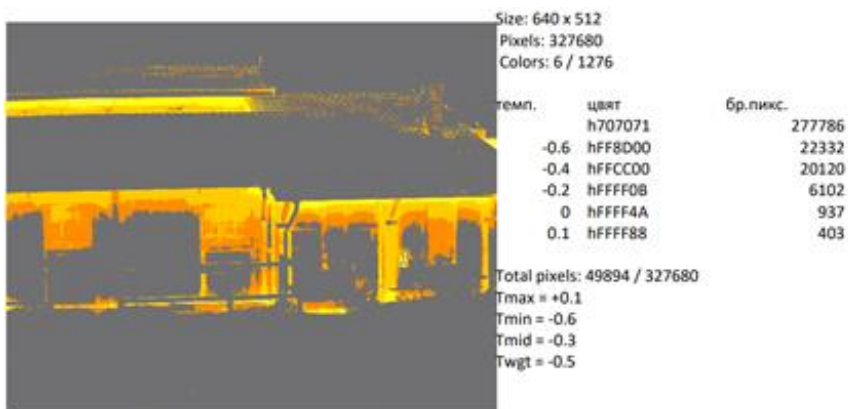


Фиг. 6. Диалог за създаване на класификационна схема

Върху термографските изображения на южната фасада на конната база с приложението са направени класификации на термографските изображения при използване на 5, 6 и 7 класа чрез цветна скала и скала в нюанси на сивото. Чрез статистически анализ са формирани подходящи темпорални диапазони за двата експеримента, така че да се елиминират участъците, които не са обект на изследването (пространство около сградата и въздушно пространство над сградата) [9, 10, 13] (фиг. 8).



Фиг. 7. Термографски анализ – PLCh Thermography, базиран на алгоритъма <Mini-max>



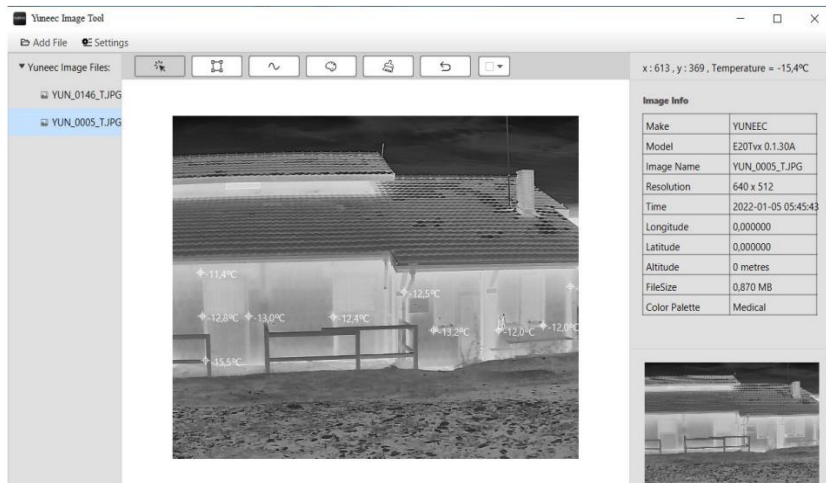
Фиг. 8. Определяне на темпорален диапазон, така че да се елиминират участъците, които не са обект на изследването при използване на 6 цвята

Към всяко от класифицираните изображения се прилага статистически анализ за броя на класифицираните пиксели, използваните цветове и групирането им по класове. При анализа на термографски изображения, чрез добавяне на допълнителна информация, се постига по-висока точност на класификацията и прилагане на комплексен метод за оценка на използваната класификационна схема. Обектно-ориентираната класификация е свързана с групиране на пикселите на обработваното изображение в зависимост от формата, размерите и други характеристики на заснетите обекти. Сегментацията е базов процес за този вид класификация. Изследваните обекти се класифицират според текстурата им, геометрията им и редица други техни признаци.

Използваните термографски изображения са направени в близкия и средния инфрачервен диапазон, обособени както отделни слоеве. Предимство на обектно-ориентираната класификация е, че може да се използват и прилагат различни техники за класи-

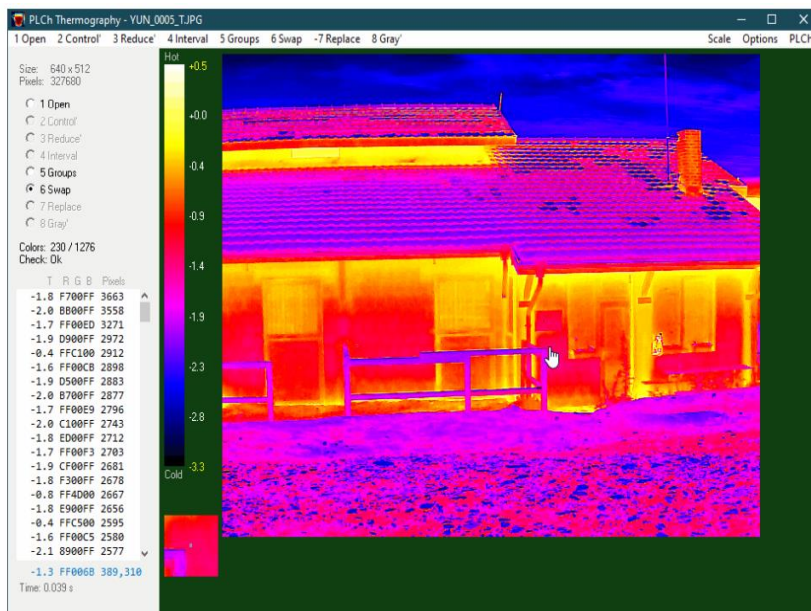
фикация, като например „най-близък съсед“ (Nearest neighborhood) [17], която наподобява класификацията с обучение. За оптимизиране и подобряване на точността на класификацията са използвани RGB изображения.

За контрол на точността на направената класификация са проведени измервания на температурата в локални точки от фасадата на формираното изображение (фиг. 9) и директно на фасадата.



Фиг. 9. Кодираните температури са увеличени 10х, с цел отчитане на малките разлики

Резултатите от обектно-ориентирана класификация при използване на <color-scale> са представени на фиг. 10.



Фиг. 10. Обектно-ориентирана класификация при използване на <color-scale>

5. Оценка за точността

Оценка на точността е направена по отношение на геометричната точност и по отношение на точността на класификацията на термографските изображения.

За оценката на геометричната точност са използвани моделите, получени със системите Agisoft Metashape и Photomod. След създаване на съгъстения точков модел от Agisoft Metashape и векторния модел на югоизточната фасада с Photomod е направено сравнение на идентични разстояния от моделите и директно отчетени такива от преки измервания, направени с ролетка.

Получена е средна грешка = ± 0.003 m и максимална грешка = ± 0.02 m.

Оценката на точността на класификацията се определя по два показателя:

- По отношение на минималния брой пиксели, участващи при определяне на областите при сегментацията. В направените експериментални изследвания минималният брой пиксели при определяне на скалите е 1 пиксел. За всеки проведен експеримент са определени: Tmax, Tmin, Tmid и Twgt.
- Съпоставка на измерени(те) температури директно от точки на фасадата и същите съпоставени с резултати от регистрацията в термографските изображения. При анализа е установено, че регистрираните в изображението температури са увеличени 10x по отношение на пряко измерените. Точността на термалната матрица по паспортни данни е ± 0.1 °C.

6. Изводи

На базата на проведените експерименти и анализи могат да се направят следните изводи:

- Съчетанието от едновременно използване на RGB и термографски сензори позволява по-висока точност при установяване и локализиране на температурни изменения, като същевременно улеснява геореферането на термографските изображения.
- Използването на изготвената класификационна схема може да се прилага при различни анализи на термографски изображения, но трябва да се подчертае, че прилагана в различно време и при различни атмосферни условия, тя ще даде различни резултати за един и същи обект. Това обстоятелство се дължи на факта, че регистрираните температурни изменения са сложна функция от взаимодействие на различни фактори, оказващи влияние върху тяхната температура.

Благодарности

Настоящата научноизследователска разработка е по договор № БН-249/21 с подкрепата на Центъра за научни изследвания и проектиране при УАСГ.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Vijay, A.* Review on thermal image processing techniques for machine condition monitoring. // International Journal of Wireless Communications and Network Technologies, 3(3), April – May 2014, 49-53.
2. <https://shop.yuneec.com/eu/detail/index/sArticle/558>, accessed on 04.12.2021.
3. <https://us.yuneec.com>, accessed on 04.10.2021.
4. https://uk.trotec.com/fileadmin/downloads/Temperatur/Kontakt-_und_IR-Thermometer/TP7/TRT-BA-TP7-TC-001-EN.pdf, accessed on 04.12.2021.
5. <https://www.trotec24.com/en-tw/measuringinstruments/temperature/thermohygrometers/thermohygrometer-bc25-including-heat-index-hi-and-temperature-wbgt.html>, accessed on 04.12.2021.
6. *Chobanov, P.* Softuer za obrabotka na termografski izobrazheniya – PLCh Thermography, 2022 г.
7. *Chobanov, P.* Energiina efektivnost v stroitelstvoto. UACEG, 2017, ISBN 978-954-724-091-9.
8. *Dvorkovich, A., Zareckii, A., Mitiagin, K., Coposov, D.* Algoritmy obrabotki teplovizionnykh izobrazheniy dlya analiza kachestvennykh pokazateley gemodinamiki arteriy litsa, Informatika, TRUDY MFTI, 2017, Tom 9, № 4.
9. *Muresan, M., Nedevschi, S., Danescu, R.* Robust Data Association Using Fusion of Data-Driven and Engineered Features for Real-Time Pedestrian Tracking in Thermal Images, Sensors 2021, 21(23), <https://doi.org/10.3390/s21238005>.
10. *Schneider, M., Ziegler, T., Kolter, L.* Thermoregulation in Malayan sun bears (*Helarctos malayanus*) and its consequences for in situ conservation, Journal of Thermal Biology, 2020.
11. *Tonkov, D.* Inzhenerna geodeziya pŭrva chast. Sofiya, TES Dizaŭn, 2018, ISBN 978-954-2994-05-3.
12. *Tonkov, D.* Inzhenerna geodeziya. TES Dizaŭn, 2018, ISBN 978-954-2994-06-0.
13. *Vicentini, R., Montanholi, Y., Veroneze, R., Oliveira, A. et al.* Infrared thermography reveals surface body temperature changes during proestrus and estrus reproductive phases in Gyr heifers (*Bos taurus indicus*). // Journal of Thermal Biology, 2020.
14. *YounusAchmad, A., Yang, W.* Image histogram features based thermal image retrieval to pattern recognition of machine condition. Proceedings of the 4th World Congress on Engineering Asset Management, Athens, Greece, 28-30 September 2009.
15. <https://rubikonge.com/wp-content/uploads/H520-ManualDatapilot-1.3.1a.pdf>, accessed on 04.10.2021.
16. <https://H520E/H520E-RTK>, User manual v 1.0, accessed on 04.12.2021.
17. <https://www.hexagongeospatial.com/products/power-portfolio/erdas-imagine>, accessed on 04.10.2021.
18. <https://www.agisoft.com>, accessed on 04.10.2021.

PREPARATION OF A TECHNOLOGICAL SCHEME FOR THE USE OF THERMOGRAPHIC IMAGES IN THE ANALYSIS OF THE TOTAL ENERGY EFFICIENCY OF AN AGRICULTURAL BUILDING

P. Maldzhanski¹, P. Chobanov², S. Katsarska-Filipova³, D. Filipov⁴

Keywords: thermographic camera, unmanned aerial vehicle (UAV), object-oriented classification

ABSTRACT

The use of thermographic images is associated with a number of challenges related to their low resolution and low local contrast, unlike optical images. This paper proposes a technological scheme for the use of thermographic images in the analysis of the overall energy efficiency of an agricultural building, based on object-oriented classification. A specialized software application for the analysis of thermographic images – PLCh Thermography has been created. To validate the results, control measurements of point temperatures were made directly from the studied facade and were compared with the ones from the registration in the thermographic images.

¹ Plamen Maldzhanski, Prof. Dr. Eng., Dept. “Photogrammetry and Cartography”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: maldjanp_fgs@uacg.bg

² Plamen Chobanov, Prof. Dr. Eng., Dept. “Building Materials and Insulations”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: chobanov_fce@uacg.bg

³ Silvia Katsarska-Filipova, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. “Photogrammetry and Cartography”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: filipova_fgs@uacg.bg

⁴ Dobromir Filipov, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. “Photogrammetry and Cartography”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: filipov_fgs@uacg.bg