



DOI: [10.71167/uaceg.2025.58S104](https://doi.org/10.71167/uaceg.2025.58S104)

Получена: 30.05.2025 г.

Приета: 01.08.2025 г.

БЛИЗКООБХВАТНАТА ЦИФРОВА ФОТОГРАМЕТРИЯ – ИЗТОЧНИК НА ДАННИ ЗА ИНВЕСТИЦИОННОТО ПРОЕКТИРАНЕ

Пл. Малджански¹, Я. Стаменова²

Ключови думи: цифрова фотограметрия, филтрация и класификация на изображения

РЕЗИЮМЕ

В статията се разглеждат възможности за оптимизиране на технологичните процеси в блискообхватната цифрова фотограметрия при осигуряване на данни за изготвяне на инвестиционни проекти и възможности за постигане на необходимата точност, чрез използване на допълнителна информация, получена от класификация на облака от точки. Разгледани са възможностите за изготвяне на ортофото на терена и покривно ортофото с цел отстраняване на влиянието на обекти от човешка дейност. Използван е класифициран облак от точки за създаване на височинен модел и формиране на стереограми. Направените обосновки и анализи са продължение на публикуваните в [1] технологични възможности за прилагане на методите на блискообхватната цифрова фотограметрия при реализация на инвестиционни проекти. Получените практически резултати са: ортофотопланове, класифицирани облаци от точки, стереограми и инвестиционен проект по част вертикално планиране.

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 Яна Стаменова, инж., докторант, кат. „Фотограметрия и картография“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: yana.stamenova@abv.bg

1. Въведение

Развитието на методите и усъвършенстването на апаратните средства в блискообхватната цифрова фотограметрия позволяват да се разшири приложението ѝ в сфери, в които до този момент не е намирала приложение. Една от тези области е инвестиционното проектиране.

В инвестиционното проектиране важен момент е получаването на геометрична и семантична информация за обектите с необходимата точност. Най-често използваните мащаби в инвестиционното проектиране, свързани с геодезическите дейности, са 1:200 и 1:250. Това налага необходимостта от получаване на сантиметрова точност (4 – 5 cm), като се изхожда от необходимата графична точност за тези мащаби (1).

$$\begin{aligned} m &= 0,2 \text{ mm} \cdot 200 = 40 \text{ mm} = 4 \text{ cm}, \\ m &= 0,2 \text{ mm} \cdot 250 = 50 \text{ mm} = 5 \text{ cm}. \end{aligned} \quad (1)$$

Такива точности в планово и височинно положение могат да бъдат получени от създадените цифрови ортофотопланове и височинни модели при спазване на определени изисквания и условия. Допълнителна възможност е използването на облаци от точки, получени от наземно лазерно сканиране, съчетани с резултати от блискообхватна цифрова фотограметрия.

2. Необходими условия за постигане на сантиметрова точност

2.1. Подходящо планиране и заснемане на обектите

Методите на блискообхватната цифрова фотограметрия могат да осигурят тази точност, ако постигнат пиксел с физическа големина поне 8 cm (GSD). Това е така, защото в цифровата фотограметрия при стереометода се постига подпикселна точност. За да се постигне малък пиксел, е необходимо да се вземат под внимание при планиране на заснемането няколко характерни елемента:

- *Ъгловото покритие „наблюдавано“* от сензора – FieldView (FoV).

$$\text{FoV} = 2 \arctan \frac{P}{2f}, \quad (2)$$

където P е размерът на сензора по посоката на изчисляване на FoV, а f е фокусното разстояние на камерата. Вижда се, че отпечатъкът върху земята на рамката на изображението е тясно свързан с относителната височина и FoV.

Докато при аналоговите камери познаването на фокусното разстояние е достатъчно, за да се направи полетен план, то в съвременните цифрови въздушни камери (DAC) комбинацията от фокусното разстояние, размерът на пикселите (обикновено квадрат) и сензорният формат определят оперативния профил на плана за летене. Тези параметри в DAC могат да се различават от един прототип на камера до друг в зависимост от техническите параметри на използваната система.

– *Физическа големина на пиксела (GSD)* – най-важният елемент във връзка с резултатната точност на получените данни. Стойността му представлява разстоянието между два последователни пикселни центъра, измерени върху земната повърхност (размерът на пиксела върху терена). Определя се по формулата:

$$\text{GSD} = \frac{Z}{f} \text{CCD pixel size}, \quad (3)$$

където Z е височина на летене над земята, f – фокусно разстояние, CCD pixel size – големина на пиксела. Съгласно (3) следва, че GSD елементът е в зависимост както от разделителната способност на сензора, така и от височината на полета и фокусното разстояние. Установено е, че при по-голяма височина на полета резултатната стойност на терения елемент е по-висока – за постигане на позиционна точност $\text{GSD} = 10 \text{ cm}$, летателната височина над земната повърхност може да варира от 938 m до 2000 m.

За изчисляване на абсолютната височина над морското ниво (ASL) на полета е необходимо да се знае височината на терена или по-добре средната височина над нивото на земята (AGL). Следователно, след като е известна височината на терена и височината на летене над земята, необходима за гарантиране на дадено GSD, е възможно да се изчисли ASL по следната формула:

$$\text{ASL} = H = Z + \text{AGL}. \quad (4)$$

– *Дълбочина на цвета* – важна характеристика за фотограметричните камери.

От количеството нива на квантоване, с които се създава растрерното изображение, се определя възможността за детайлно разглеждане на сенките и полусенките на обектите. При цифровата обработка на аероснимките този показател е в основата както на стратегията за автоматичен избор на свързващи точки между съседните стереодвойки, така и в основата на критериите за създаване на съвкупността от точки, чрез които се формира TIN моделът на релефа. Колкото битовото описание на пиксела е по-високо, толкова фотограметричните качества на получената снимка и постиганата точност при нейната обработка са по-високи. Повечето съвременни цифрови камери позволяват получаване на снимки с дълбочина на цвета повече от 8 бита. Важно е да се подчертае, че при проекти, при които се изисква висока геометрична разделителна способност, както в случая с използване на БЛС (UAS), цифрови модели, необходими за изготвяне на цифрово ортофото, трябва да са в състояние да осигурят достатъчна точност при оценката на AGL.

Практическият аспект, който може да контролира правилното стереоскопично придобиване на две последователни кадри, е времето за придобиване. В действителност, при въздушни проучвания ролята на импортиране се поема от скоростта на затвора и времето за експониране. Първият се отнася до броя отделни кадри, които могат да се придобият за единица време (обикновено се изразява в „кадри на секунда“ – FPS), а вторият от скоростта на затвора. Всеки сензор има своя собствена стойност на честотата. Скоростта на затвора се отнася до времето, за което е изложен всеки отделен кадър. Скоростта на кадрите и скоростта на затвора налагат минималното време, необходимо за заснемане от две последователни позиционирания. След като надлъжното припокриване е фиксирано, колкото по-висока е относителната височина, толкова по-дълъг е интервалът на снимане. Настройката на тези два параметъра (честота на кадрите и скоростта на затвора) е много важна, особено при полети с ниска надморска височина или в полети с големи припокривания.

2.2. Използване на базова станция

Точността на получените данни при заснемане с безпилотна летателна система зависи както от характеристиките на използваната система за заснемане, така и от начина на абсолютно ориентиране на резултатния модел. За възстановяването на

пространственото положение на въздушните снимки в геодезическа координатна система или локалната такава за обекта обикновено се маркират опорни точки с подходящи форма и размер в зависимост от полетния план. Големината на всяка опорна точка не трябва да бъде по-голяма от 0,15 mm в мащаба на снимката. Установени са и принципи схеми за тяхното разположение спрямо обекта на заснемане. Плътното им нелинейно разпределение и конфигурация осигуряват с достатъчна точност определянето на параметрите на трансформация, необходими за преминаването от координатната система на модела в желаната геодезическа координатна система. За тяхното геодезическо определяне обикновено се използва GNSS-система или тотална станция в зависимост от спецификите на заснемания обект. Точността на опорните точки в геодезическата координатна система зависи от начина на тяхното измерване и съответно – от точността на прилаганата технология за тяхното определяне.

Използването на базова станция (фиг. 1) при заснемането значително подобрява комуникацията с БЛС (безпилотна летателна система) и повишава точността на модела.



Фиг. 1. D-RTK 3 Multifunctional Station

Получават се данни за местоположенията на проекционните центрове на всяка една от снимките като точността зависи от избрания метод за позициониране – работа в реално време (RTK) или пост процесинг (ППК). По този начин се оптимизира процеса по определяне на елементите на ориентиране на снимките. Практически, използването на базова станция изключва необходимостта от наличието на опорни точки. Въпреки това, комбинацията от двата метода значително повишава абсолютната точност на резултатния модел.

2.3. Комбиниране на данни от фотограметрично заснемане и лазерно сканиране

Системите за разпознаване в светлинния диапазон (LiDAR), каквито са лазерните скенери, са системи за дистанционно наблюдение, които определят разстоянието до обект чрез анализ на лазер, връщане на светлина върху повърхността на обекта или

анализ на фазовата разлика между фазите на излъчен и приет сигнал. Тази техника позволява изключително бързо придобиване на големи количества 3D координати на повърхностите на обектите с висока точност (от порядъка на милиметри при стационарните наземни скенери и сантиметрова при подвижните наземни скенери). Това ги прави подходящи за допълване на данни към резултати от фотограметрично заснемане. Наземните лазерни скенери (TLS) са снабдени с цифрови камери и регистрират изображения в момента на сканиране, от които се получава фотореалистично оцветяване на облака от точки и практически съчетанието с изображенията довежда до повишаване на точността при формиране на модела на повърхността и оттам влияе на точността на формираното ортофотоизображение. Предимството на комбинацията между данни от лазерно сканиране и данни от фотограметрични изображения осигурява максимална автоматизация на процесите по моделиране и постигане на функционалност и реалистичност (фиг. 2).



Фиг. 2. Комбинация на модел от изображения с класифициран облак от точки клас „растителност“, получен от LiDAR

3. Оптимизиране на технологичните процеси с цел постигане на необходимата точност

3.1. Придобиване на данни чрез стереонаблюдение

След определяне на елементите на вътрешното и външното ориентиране (фототриангулация) в системите за цифрова фотограметрия се дава възможност процесът на векторизиране да се извърши в режим на стереонаблюдение. Точността на позициониране в двата режима (подвижен прозорец – статична марка и обратно) е подпикселна, следователно при GSD от порядъка на 8 – 10 cm може да се постигне очакваната точност за М 1:200 и М 1:500.

3.2. Изготвяне на цифрово ортофото

При цифровото ортотрансформиране от съществено значение е правилното определяне на размера на елементите от матрицата, които съответстват на размера на елементарния участък за трансформиране от местността Δp . Определянето на Δp най-често е обвързано с пространствената разделителна способност на суровото изображение и мащабът, в който се изработва ортофотоплана. Така например размерът на елементарния участък за трансформиране от местността се определя по формулата:

$$\Delta p = \Delta m, \quad (5)$$

където Δ е геометрическото разрешение на суровото изображение,
 m – мащаб на изображението.

За създаване на цифрово ортофото от цифрови изображения е необходимо изпълнението на следните условия:

- да са известни елементите на външно ориентиране;
- да е наличен цифров модел на релефа в координатната система на модела, получен от изображенията.

Следователно точността на цифровото ортофото ще е в зависимост от точността на определяне на ЕВО (елементите на външното ориентиране) и точността на цифровия модел. Пространственото разрешение на цифровото изображение се свързва с разрешението на непрекъснатото изображение чрез зависимостта:

$$\Delta \xi = \frac{1000}{2R}, \quad (6)$$

където $\Delta \xi$ е в μm ;

R – пространственото разрешение на непрекъснатото изображение се измерва в брой линии на (lin/mm).

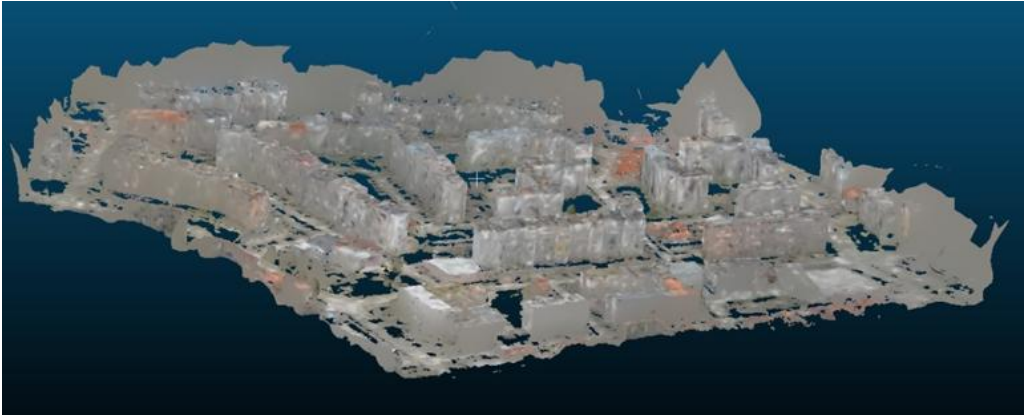


Фиг. 3. Класифициран облак от точки по класове: “Ground” и “street”

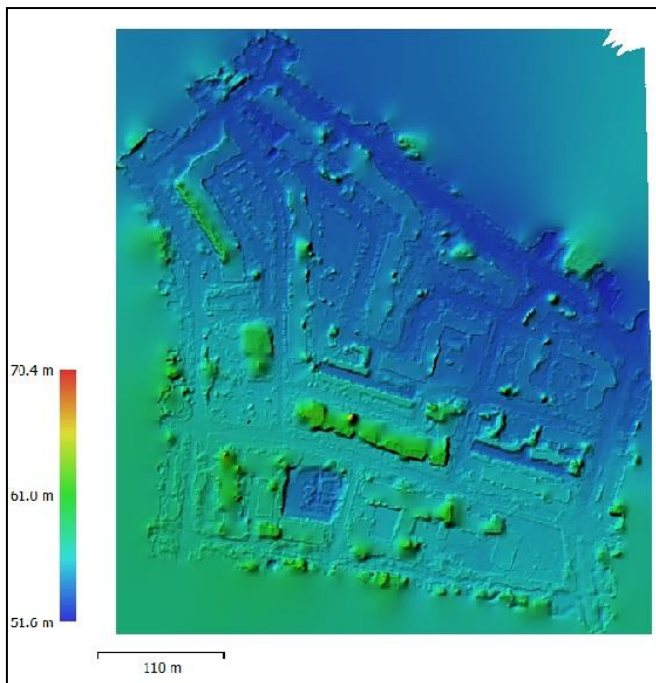
От практическа гледна точка се ползва известно презапасяване по точност, което се обосновава с анализ на подпикселната точност на цифровите изображения, която обикновено се оценява на $0,7\Delta\xi$. В съответствие с това практическата формула за определяне на стъпката на сканиране добива вида:

$$\Delta\xi = \frac{700}{2R}. \quad (7)$$

От технологична гледна точка е удачно след създаване на модела да се формира сгъстен облак от точки, който да се класифицира (фиг. 3, фиг. 4).



Фиг. 4. Класифициран облак от точки по класове: “vegetation” и “building”

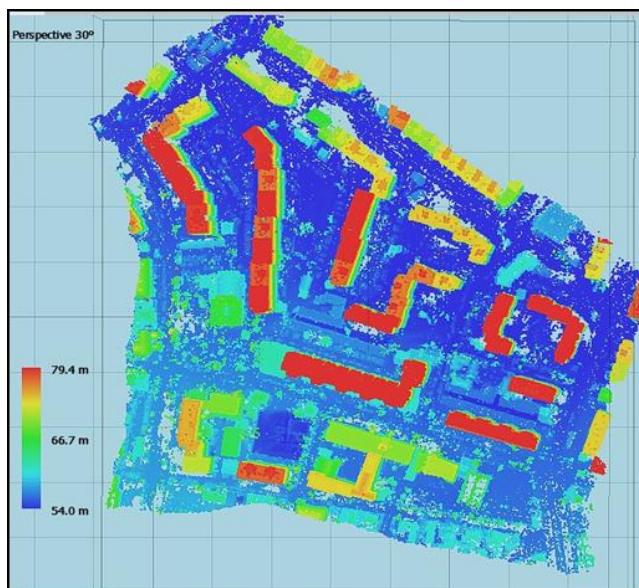


Фиг. 5. „теренно ортофото“

Класификацията може да бъде извършена както по вид и тип на обектите, така и по височина или друг характерен признак. От всеки клас може да бъде създадено ортофотоизображение и отделни класове да се използват за създаване на „теренно ортофото“ и „покривно ортофото“ (фиг. 5, фиг. 6).



Фиг. 6. „покривно ортофото“



Фиг. 7. Класифициран облак от точки, при създаване на височинен модел

Класификацията на облака от точки по височина (фиг. 7) може да се използва за създаване на височинен модел.

4. Точност на цифровите модели

Моделът може да бъде създаден от така наречените „дълбочинни карти“ или от съгъстения облак от точки. За целта се използват изображенията и създадените връзки между точки от изображенията и идентичните им съответствия от местността (фиг. 8).



Фиг. 8. Свързващи точки и връзки между точки от изображенията

При използване на облак от точки за създаване на модела следва да се приеме подходяща гъстота на точките, които моделират релефната повърхнина, тъй като това рефлектира върху точността на модела. В сила е теоремата на Котелников (критерий на Нойкуист), която определя точността на представяне на една дискретна функция от една аналогова (непрекъсната) – „Един аналогов сигнал (теренната повърхнина) се дискретизира (представя като съвкупност от краен брой елементи) тогава и само тогава, когато стъпката (апертурата) на дискретизация е по-малка или най-много равна на максималната амплитуда на сигнала“.

$$\Delta t \leq 2T . \quad (8)$$

Това означава, че при набиране на данни за повърхнини е важна както гъстотата на дискретните елементи (в частност теренни точки), така и тяхното разположение (топология). В това отношение системите за цифрова фотограметрия предлагат функции за класификация на облака от точки на базата на използване на филтри, така че за генериране на определени повърхнини да се формират определени класове точки. По този начин се увеличава възможността за контролиране на качеството на цифровите модели и съгласуване на фасетката (елементарната повърхнина) с гъстотата на дискретните елементи (примитивите от точковия облак).

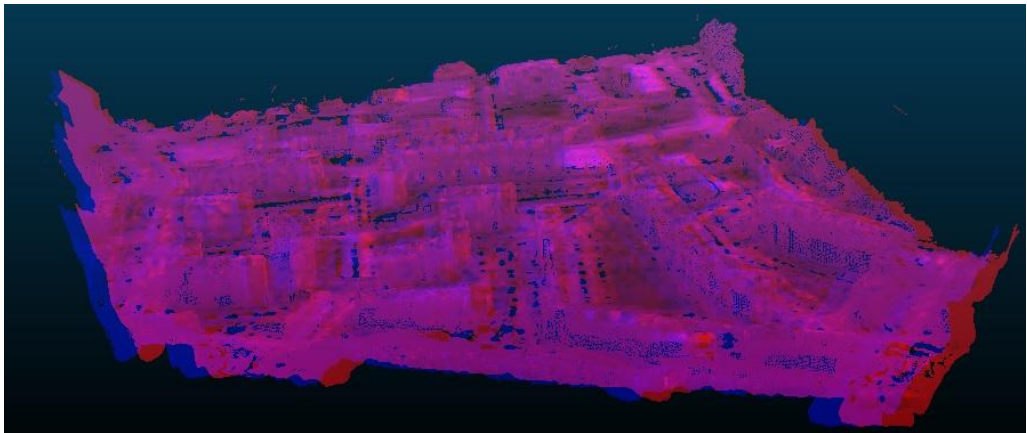
В резултат на експериментални изследвания е установено, че ако за представяне на теренната повърхнина се използва квадратна мрежа със страна D и разстоянието между разпръснатите точки е $Scp.$, то за да има адекватност между реалната повърхнина и моделната е необходимо да е в сила зависимостта:

$$\frac{Scp.}{5} \leq D \leq \frac{Scp.}{3}, \quad (9)$$

като горната граница на D се използва при равнинен терен, а долната при хълмист.

5. Създаване на стереограми

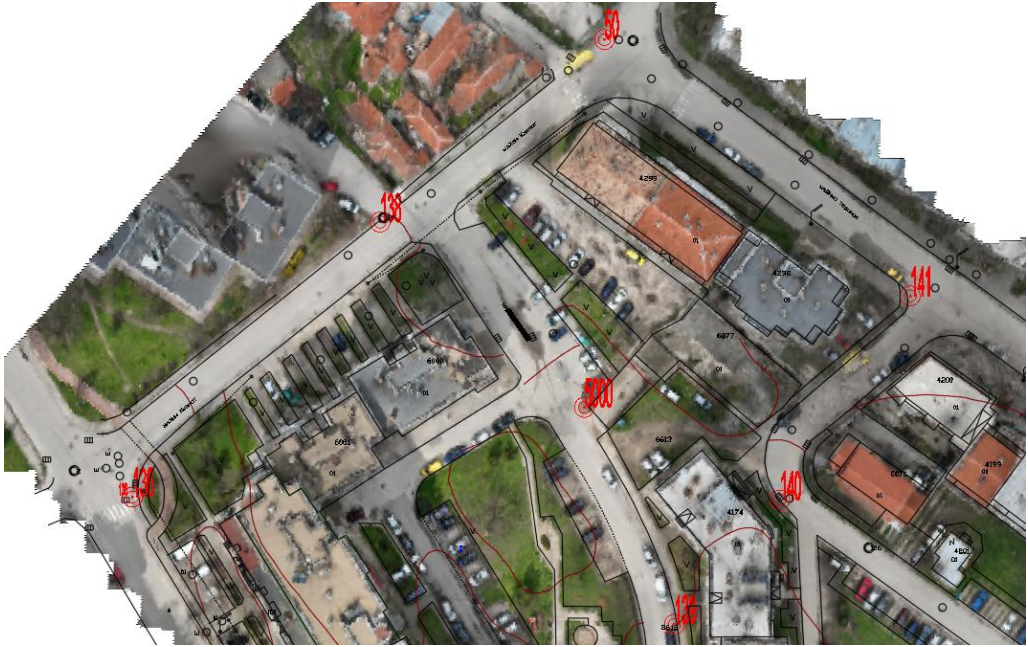
Стереограмите са ефективен доказателствен материал при експертизи, анализи и методи за визуализация. При класифициран облак от точки чрез тях може допълнително да се подобри представата за обекта (фиг. 9). Те могат да бъдат създадени при известни елементи на взаимното ориентиране от всяка стереодвойка изображения или при използване на облаци от точки.



Фиг. 9. Стереograma, получена от класифициран облак от точки за стереонаблюдение с анаглифни очила

6. Изходни данни за изготвяне на инвестиционен проект

Всеки инвестиционен проект изисква точни геометрични данни в планово и височинно положение, така че да удовлетвори необходимите изисквания по инструкция и по съответните нормативни изисквания. Подходящо е да се използва ортофотоплан с висока резолюция с хоризонтали (фиг. 10) или ортофотоплан с класифициран облак от точки (фиг. 11).



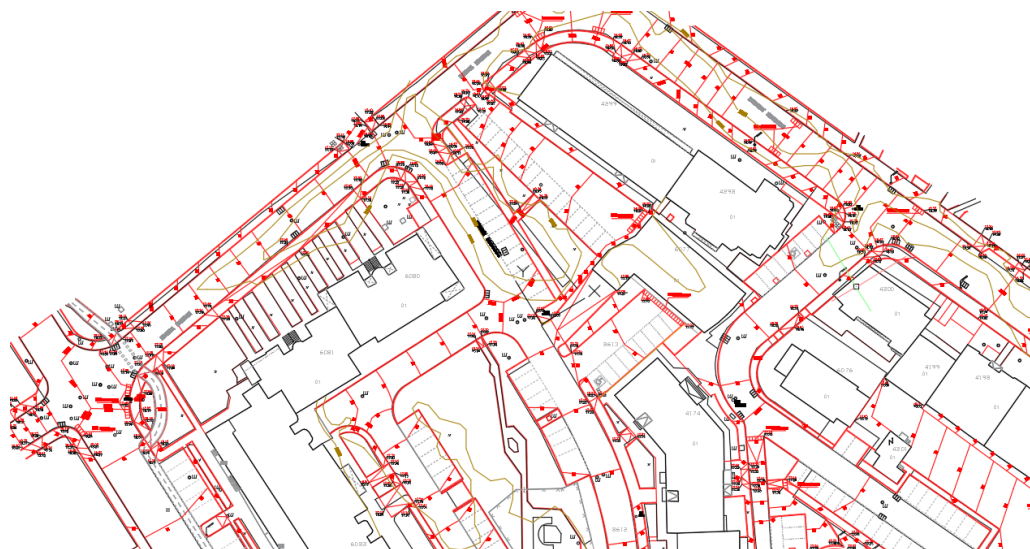
Фиг. 10. Ортофотоплан с хоризонтали



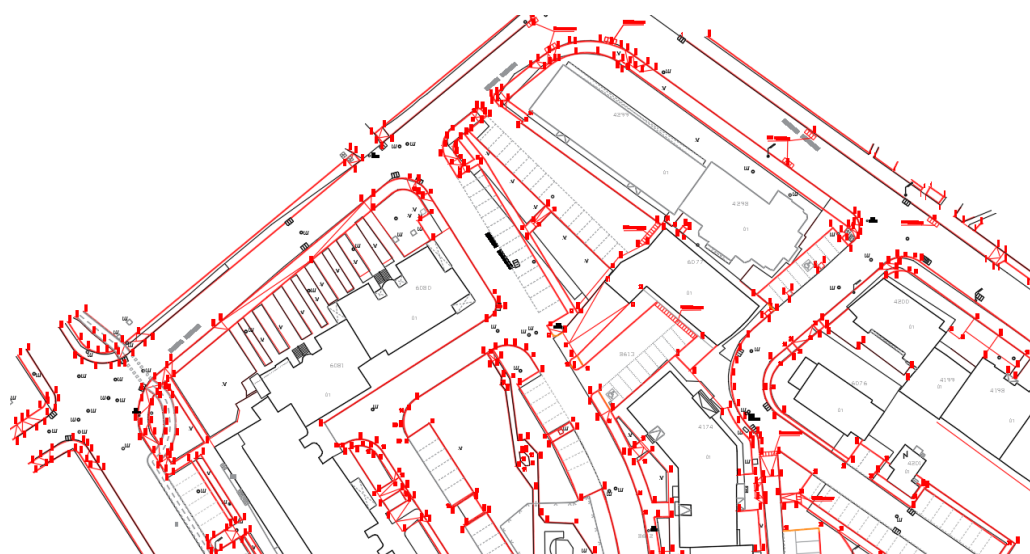
Фиг. 11. Ортофотоплан, комбиниран с филтриран облак от точки

7. Проектни решения

Примерни резултати за използването на данни от блискообхватната цифрова фотограметрия с цел обезпечаване на нуждите на проектирането са визуализирани на (фиг. 12) и (фиг. 13).



Фиг. 12. План за вертикално планиране



Фиг. 13. Трасировъчен план

8. Изводи

Близкообхватната цифрова фотограметрия е подходяща за осигуряване на необходимата векторна информация за целите на инвестиционното планиране при осигуряване на подходяща теренна големина на пиксела (GSD), използване на подходящ сензор за създаване на оптимални дълбочинни карти (подходяща дълбочина на цвета) и подходящо съгласуване между гъстотата на дискретните елементи (стъпката на дискретизация) и размера на фасетката, използвана за създаване на цифровия модел. В

традиционния подход (или нормален случай), теоретичните точности (σ_X , σ_Y) по двете оси (X , Y), които са приблизително успоредни на земята, се определят по формули (10):

$$\sigma_x = \sqrt{\left(\frac{\xi}{f} \frac{Z}{f} \frac{Z}{B} \sigma_{p\xi}\right)^2 + \left(\frac{Z}{f} \sigma_\xi\right)^2}, \quad \sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\eta}{f} \frac{Z}{f} \frac{Z}{B} \sigma_{p\xi}\right)^2 + \left(\frac{Z}{f} \sigma_\eta\right)^2}, \quad (10)$$

където σ_ξ и σ_η са преценените точности на измерванията на координатите на изображението (ξ, η), $\sigma_{p\xi}$ е точността на измерване на паралакса, Z е относителната височина на летене над земята, f е фокусното разстояние на приетата камера и B е базата между последователни центрове на проектиране. Теоретичната точност (σ_Z) по вертикалната посока (Z) може да бъде определена като:

$$\sigma_Z = \frac{Z^2}{fB} \sigma_{p\xi}. \quad (11)$$

От горните формули се вижда, че при B и f константи малки изменения в Z пресичането на съответните лъчи ще бъде слабо и по този начин точността в посоката на гледане ще е малка. С други думи, колкото по-голямо е надлъжното припокриване, толкова по-голяма е грешката по Z компонента. Това налага при изискване за получаване на високоточни модели в едри мащаби да се използват няколко маршрутни заснемания с наклонени и хоризонтални снимки.

Векторизирането в планово положение може да се извършва върху ортофотоплан, при осигурен подходящ размер на пиксела за съответния мащаб. Подходящо улеснение е използването на комбинирани данни от филтриран точков облак и ортоизображение в случаите, когато не се използва тримерно векторизиране в системата за цифрова фотограметрия при осъществяване на режим на стереонаблюдение.

Съвместяването на облаци от точки, получени чрез технологията LiDAR с резултати от близообхватна цифрова фотограметрия, може да се използва за повишаване на точността на получаваните резултати.

Благодарности

Настоящата статия към научноизследователска разработка по договор Д-167/2025 е подкрепена финансово от Центъра за научни изследвания и проектиране при УАСГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Maldzhanski, Pl.* (2024), Application of close-range photogrammetry in investment design. Magazine "Geodesy, Cartography, Land Management", Number 5-6, 2024, LXIII, ISSN 0324-1610.
2. *Maldzhanski, Pl.* (2017), Close Range photogrammetry. <https://e-learn.uacg.bg/course/view.php?id=857>.
3. *Maldzhanski, Pl.* (2017), Digital photogrammetry. <http://e-learn.uacg.bg/mmu/view/mmu/index.php?mid=101&id=1381>.
4. *Maldzhanski, Pl.* (2018), Close Range photogrammetry and laser scanning. <https://e-learn.uacg.bg/enrol/index.php?id=636>.

5. *Maldzhanski, Pl.* (2019), Close Range photogrammetry and Laser scanning. <https://e-learn.uacg.bg/course/view.php?id=651>.
6. *Luhmann, T., Tecklenburg, W.* (2004), 3D Object Reconstruction from Multiple-Station Panorama Imagery – ISPRS Archives Vol. XXXIV, part 5/W16.
7. *Schneider, D., Maas, H.-G.* (2004), Application and Accuracy Potential of a Strict Geometric Model for rotating Lines Cameras – ISPRS Archives Vol. XXXIV, part 5/W16.
8. Klaus Hanke, Pierre Grussenmeyer. Architectural Photogrammetry: Basic theory, Procedures, Tools. Corfu, September 2002, ISPRSCommission, <http://www3.itu.edu.tr/~seker/files/architectural-photogrammetry.doc>.

CLOSE-RANGE DIGITAL PHOTOGRAMMETRY: A SOURCE OF DATA FOR INVESTMENT DESIGN

Pl. Maldzhanski¹, Y. Stamenova²

Keywords: digital photogrammetry, image filtration and classification

ABSTRACT

The paper examines opportunities for optimizing technological processes in short-range digital photogrammetry when providing data for preparing investment projects and opportunities for achieving the necessary accuracy by using additional information obtained from point cloud classification. The possibilities for preparing an orthophoto of the terrain and a roof orthophoto in order to remove the influence of objects from human activity are considered. A classified point cloud is used to create an elevation model and form stereograms. The justifications and analyses made are a continuation of the technological possibilities for applying the methods of short-range digital photogrammetry in the implementation of investment projects published in [1]. The practical results obtained are: orthophoto plans, classified point clouds, stereograms and an investment project in the vertical planning section.

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

² Yana Stamenova, Eng. PhD student in the doctoral program “Photogrammetry and Remote Sensing Methods”, e-mail: yana.stamenova@abv.bg