
EXPERIMENTAL EXPLORATION OF THE FACTORS INFLUENCING ON THE ACCURACY OF GEODESICAL MAPS PREPARED BY THE MEANS OF UAVS⁴

Eng. Monika Bedzheva, PhD student

Department of Geodesy,

Konstantin Preslavsky University of Shumen, Bulgaria

Tel.: +359 889 096 039

E-mail: m.bedzheva@shu.bg

Eng. Dean Denev, PhD student

Department of Telecommunication,

“Angel Kanchev” University of Ruse

Phone: 082-888 673

E-mail: ddenev@uni-ruse.bg

Abstract: Today unmanned aerial vehicles (UAVs) are successfully used for developing of geodesical maps, because they allow all measurement procedures to be essentially accelerated. Despite of this fact the experimental explorations of the interaction and the significances of the factors, influencing on the accuracy of the geodesical maps, prepared on the base of the photographs, made by UAVs, are made over small areas. Accounting this situation in the paper the results of a survey, performed by UAV over several complex terrains, are presented. The obtained results support the theoretical conclusions, presented in our previous paper.

Keywords: Geodesical maps, Photogrammetry, GPS, Unmanned aerial vehicles.

ВЪВЕДЕНИЕ

Днес безпилотните летателни апарати (БЛА) намират все по-широко приложение в геодезията поради следните причини. Първо, използването на БЛА намалява многократно трудоемкостта на дейностите, с които се получават първичните геодезични данни. Второ, БЛА дават възможност за изследване на трудно достъпни или дори на практически недостъпни зони в реално време. Трето, почти напълно се изключват рисковете за здравето на геодезистите.

В настоящия момент първичните геодезични данни, получени с помощта на БЛА, представляват снимки на изследваната територия. Съдържащата се в тях информация се обработва по фотограметрични методи, в резултат на което се определят формата, размерите и пространственото положение на обектите в зададена координатна система (Andreev, A., Mihaylov, P., Stoykov, E., 2016), (Yanchev, K., 2014), (Stoyanov, B., Stoyanov, E., 2016). За получаването на качествени тримерни модели на изследваните територии е необходимо: БЛА да следва точно зададения маршрут, главната оптическа ос на камерата на БЛА да бъде насочена по надирната линия в моментите на регистриране на изображенията и координатите на центровете на снимките да бъдат отчетени с висока точност. За осигуряването на тези условия, БЛА са екипирани със сложни автопилоти, стабилизирани цифрови фотокамери с много висока разделителна способност и приемници на сигналите на спътници на една или няколко глобални навигационни спътникови системи (ГНСС). Независимо от високото качество на екипировката на БЛА поради въздействието на различни дестабилизиращи фактори изброените условия обаче не могат да бъдат спазени във всички моменти на фотографиране. По тази причина снимките (изображенията), получени с помощта на БЛА, са завъртени по осите на използваната координатна система. При това информацията за

⁴ Докладът е представен с оригинално заглавие на български език: ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ФАКТОРИТЕ, ВЛИЯЕЩИ ВЪРХУ ТОЧНОСТТА НА ГЕОДЕЗИЧНИТЕ ПЛАНОВЕ, СЪЗДАДЕНИ С ПОМОЩТА НА БЛА

необходимите ъгли на завъртане на снимките се получава чрез отчитане координатите на специални контролни точки (КТ или маркери), поставени на местността от геодезистите преди облитането с БЛА. Както вече беше посочено, тази процедура обаче е трудоемка и понякога се извършва във враждебна към здравето на геодезистите заобикаляща среда. Ето защо закономерно възниква проблемът за определяне на такива конфигурации от контролни точки върху изследваната местност, така че създаването на нейния тримерен цифров модел да бъде постигнато при минимален разход на време и ресурси. Анализът на резултатите, представени в литературата и специализираните форуми, показва, че известните към момента методики са доста общи и е необходимо тяхното прецизиране и детайлизиране. Предвид на тази ситуация в настоящия доклад се анализират резултатите от наше собствено експериментално изследване на проблема за определяне на конфигурацията и минималния брой на контролните точки, при които се постига желаната точност на геодезичните планове, създадени с помощта на БЛА.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Методика на експерименталното изследване на факторите, влияещи върху точността на геодезичните планове, създадени с помощта на БЛА

През есента на 2019 г. авторите на доклада проведоха собствено експерименталното изследване на влиянието на конфигурацията и броя на контролните точки, поставени върху проучваната местност, върху точността на съответните тримерни модели, създадени с помощта на БЛА.

Първият проблем, решен преди проучването, беше определянето на местности с подходящи размери и сложност на релефа, така че да се осигури статистическа представителност на получените резултати. При анализа на опита на други автори (Tahar, N., 2015), беше установено, че за повечето от известните към момента изследвания са характерни следните недостатъци:

- осъществени са върху местности с относително малка площ;
- сложността на релефа е описана неясно или твърде общо;
- оценката на влиянието на конфигурацията и броя на контролните точки върху точността на съответните тримерни модели, създадени с помощта на БЛА, е недостатъчно прецизна.

Предвид на изброените недостатъци, нашето проучване беше проведено върху пет местности в околностите на гр. Шумен с еднотипен характер на релефа за всяка една от тях с площи от $5\,600\text{ m}^2$ до $36\,560\text{ m}^2$ и обща площ $128\,493\text{ m}^2$. Обобщена характеристика на изследваните местности е представена в табл. 1.

Методиката, използвана за изследване на местностите, описани в табл. 1, съдържаше следните етапи.

Е 1) Предварителен анализ на характеристиките на релефа на местността чрез използване на спътникови снимки;

Е 2) Поставяне на контролните точки равномерно върху местността;

Е 3) Отчитане на географските координати на контролните точки с помощта на геодезически приемник на сигналите на спътниците на глобалната навигационна спътникова система (ГНСС) NAVSTAR GPS;

Е 4) Заснемане на местността с цифрова фотокамера като БЛА лети по два перпендикулярно ориентирани един към друг маршрути на височини 40 m , 60 m , 80 m ;

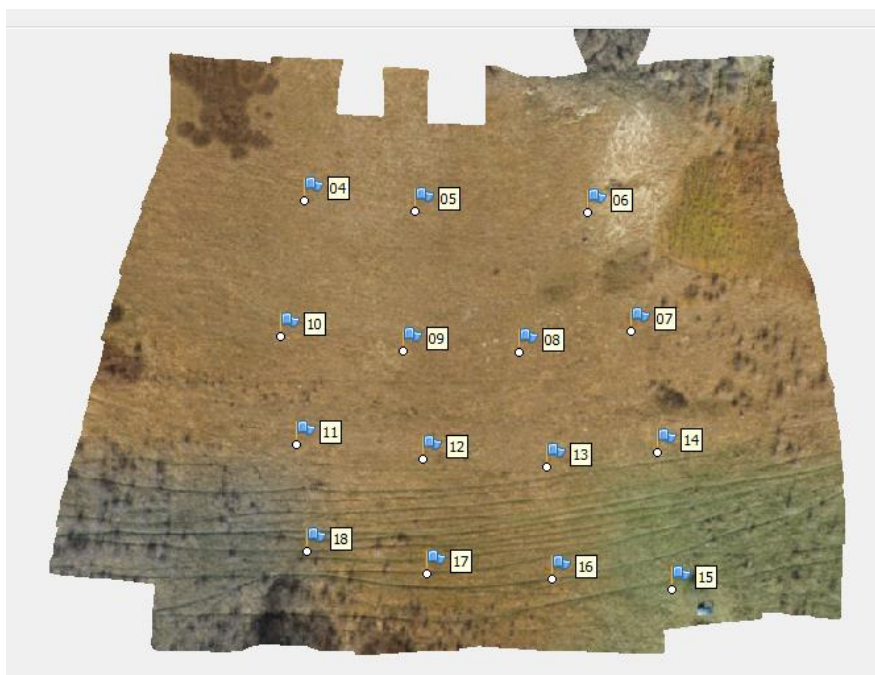
Е 5) Въвеждане на информацията от фотокамерата във високопроизводителна компютърна система и създаване на тримерни цифрови модели на местността с помощта на специален софтуер чрез използване на 0, 1, 2, 3, и т.н. контролни точки;

Е 6) Сравняване на координатите на контролните точки, отчетени по всеки от тримерните цифрови модели на местността с тези, получени на етап Е 3;

Е 7) Обобщаване и анализ на неточностите на тримерните цифрови модели на местността, формирани при използване на 0, 1, 2, 3, и т.н. контролни точки.

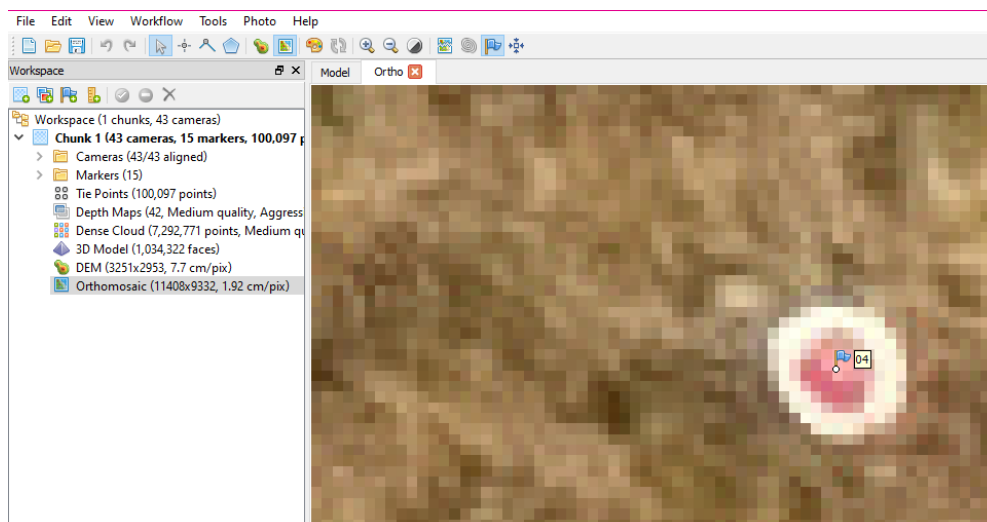
Таблица 1. Обобщена характеристика на изследваните местности

№	Условно име на местността	Разположение на местността	Площ и характер на релефа на местността	Брой на използваните контролни точки
1	Поляна	13,42 км северно от гр. Шумен	5599,1 m^2 , поляна с малък вертикален наклон	9
2	Продълговат хълм	13,46 км североизточно от гр. Шумен	23675,0 m^2 , равно поле с голям продълговат хълм в южния край	10
3	Дере на малка река	18,95 км североизточно от гр. Шумен	36559,5 m^2 , дере на малка река със силно пресечен релеф	16
4	Селско бунце	6,13 км северозападно от гр. Шумен	29859,9 m^2 , равно поле с малък продълговат хълм в западния край	12
5	Голяма могила	9,80 км север-североизточно от гр. Шумен	32799,5 m^2 , поляна с много голям вертикален наклон	15



Фиг. 1. Общ изглед на местност № 5 „Голяма могила“ и разположение на контролните точки върху нея

Етапи Е 2 и Е 4 от методиката на изследването са илюстрирани на фиг. 1 и фиг. 2, където са показани: общ изглед на местност № 5 „Голяма могила“, разположението на контролните точки върху нея (общо 15) и образ на една контролна точка върху крайния продукт - орторектифицирана мозайка (1 пиксел съответства на квадратче от местността с размери 1,92cm × 1,92cm).



Фиг. 2. Образ на една контролна точка върху орторектифицирана мозайка

Основни технически характеристики на оборудването, използвано при изследването

Облитанията на местностите, изброени в табл. 1, бяха осъществени с професионалния квадрокоптер Phantom 3 Pro, който е способен да извършва автономни полети с продължителност до 23 min (с една батерия) на височина до 6 000 m с максимална скорост от 16 m/s (Phantom 3 Professional, User Manual, 2015). Автопилотът на квадрокоптера използва като основен източник на информация за положението професионален приемник на сигналите на спътниците на ГНСС NAVSTAR GPS и ГЛОНАСС.

Снимките на местностите бяха направени с цветна фотокамера Sony EXMOR 1/2.3'', монтирана на специална платформа, чието положение се стабилизира автоматично по време на полет. Регистриращата изображения матрица е с размери 4 000p × 3 000p (общо 12,4 Мр).

Координатите на контролните точки бяха измерени с точност от 1 cm с геодезически приемник на сигналите на спътниците на ГНСС NAVSTAR GPS – TRIMBLE R4.

Анализ на резултатите, получени при изследването

След облитането на всяка местност по два перпендикулярно ориентирани маршрута на височини 40 m, 60 m, 80 m за всеки маршрут на местности № 1 и № 2, и 40 m – на местности № 3, № 4 и № 5, снимките, направени от фотокамерата на БЛА, се въвеждаха във високопроизводителна компютърна система. Въз основа на тази информация със специализиран фотограметричен софтуер се създаваха тримерни цифрови модели на местността чрез използване на 0, 1, 2, 3, и т.н. контролни точки. Както беше посочено, тези операции съставляват етап Е 5 от изследването.

След това, на етап Е 6 координатите на контролните точки, отчетени по всеки от тримерните цифрови модели на местността, се извеждаха от координатите на контролните точки, измерени по време на етап Е 3 с геодезически приемник на сигналите на спътниците на ГНСС NAVSTAR GPS. На тази база на етап Е 7 бяха анализирани неточностите на тримерните цифрови модели на местността, формирани при използване на 0, 1, 2, 3, и т.н. контролни точки (КТ) (установи се, че при 1 и 2 бр. КТ моделите са силно деформирани).

Резултатите, получени на етап Е 6 от изследването, се илюстрират с табл. 2, където са показани разликите в координатите на КТ, измерени по време на етап Е 3 и координатите на

КТ, определени от цифровия модел на местност № 5 „Голяма могила“ при използване на 0 бр. КТ и на 3 бр. КТ (КТ № 04, КТ № 04 и КТ № 05) и височина на полета на БЛА 40 m.

Таблица 2. Разлики в координатите на КТ, измерени по време на етап Е 3 и координатите на КТ, определени от цифровия модел на местност № 5 при използване на 0 бр. КТ и на 3 бр. КТ

КТ №	Разлики в координатите на КТ, бр. КТ=0			Разлики в координатите на КТ, бр. КТ=3		
	ΔX [m]	ΔY [m]	ΔZ [m]	ΔX [m]	ΔY [m]	ΔZ [m]
04	0,838	-3,293	135,325	-0,003	0,004	-0,022
05	0,834	-0,404	135,591	0,005	-0,006	-0,023
06	0,782	-0,490	135,777	0,001	0,018	-0,037
07	0,975	-0,595	135,982	0,034	-0,036	-0,042
08	0,956	-0,434	135,873	-0,024	-0,01	-0,045
09	0,982	-0,268	135,710	-0,018	0,002	-0,015
10	0,984	-0,133	135,429	0,017	-0,004	-0,038
11	1,171	-0,056	135,510	-0,003	0,014	-0,027
12	1,199	-0,305	135,847	0,013	-0,037	0,032
13	1,218	-0,439	135,961	0,004	0,014	0,005
14	1,184	-0,665	136,042	0,023	-0,042	-0,034
15	1,509	-0,692	135,946	0,037	-0,015	0,018
16	1,500	-0,447	135,985	0,038	0,013	0,094
17	1,487	-0,274	135,786	0,051	-0,02	0,067
18	1,442	0,001	135,529	0,031	0,018	0,018

С помощта на програма на Matlab, разработена от авторите, бяха построени таблици на разликите за всяка местност, за всеки маршрут и височина на облитане при използване на 0, 1, 2, 3, и т.н. КТ при построяването на тримерния цифров модел. С програмата беше отчитан и броят на КТ, при който максималната по абсолютна стойност разлика за всички КТ става по-малка от 0,1 [m]. Например, в табл. 2 максималната по абсолютна стойност разлика е $\Delta Z = 0,094$ [m] (КТ № 16).

От анализа на всички таблици беше установено, че при използване на 1 бр. КТ на всеки 10 [дка] (т.е. $1\text{КТ}/= 10000 [m^2]$), точността на генерираните тримерни модели на местността е достатъчна за решаването на основните геодезични задачи. Този извод контрастира с резултатите на някои изследвания, където се препоръчва $4 \div 5$ пъти по-голяма плътност на поставяне на КТ върху изследваните с БЛА местности (Tahar, N., 2015). Това разминаване може да се обясни с факта, че днес сме свидетели на непрекъснато повишаване на качеството на работа на екипировката на БЛА – двигатели, сензори, автопилот, система за стабилизиране на камерата и система за измерване на координатите въз основа на четири ГНСС NAVSTAR GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou.

ИЗВОДИ

Днес БЛА намират все по-широко приложение за получаването на първични геодезични данни, на чиято база се създават тримерни цифрови модели на селскостопански масиви, пътища, мостове, язовирни стени и т.н. Точността на тримерните цифрови модели съществено зависи и от специалните контролни точки, поставени на местността от геодезистите с цел получаване на информация, необходима за коригиране на неточностите на позиционирането на фотокамерите на БЛА. Предвид на този факт в доклада са представени резултатите от експериментално изследване на влиянието на конфигурацията и броя на контролните точки върху точността на геодезичните планове. Получените в доклада резултати могат да се

използват за подобряване организацията на фотограметричните изследвания, осъществявани с помощта на БЛА.

БЛАГОДАРНОСТИ

Изследванията са подкрепени по договор на Русенски университет "Ангел Кънчев" с № BG05M2OP001-2.009-0011-C01, „Подкрепа за развитието на човешките ресурси в областта на научните изследвания и иновации в Русенски университет "Ангел Кънчев", финансиран по Оперативна програма „Наука и образование за интелигентен растеж“ 2014-2020”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз“.

REFERENCES

Andreev, A., Mihaylov, P., Stoykov, E., (2016). *Comparative analysis of measurement of the height, obtained by different methods*, Proc. of the International scientific conference “MATTECH 2016”, Shumen: Bishop Konstantin Preslavsky University publishing house (**Оригинално заглавие:** Андреев, А., Михайлов, П., Стойков, Е., (2016). *Сравнителен анализ на получените резултати от височинни измервания по различни методи*, Сборник научни трудове на международната научна конференция “MATTECH 2016”, Шумен: Университетско издателство „Епископ Константин Преславски“).

Phantom 3 Professional, User Manual, V 1.0, 2015.04. URL: http://download.dji-innovations.com/downloads/phantom_3/en/Phantom_3_Advanced_User_Manual_v1.0_en.pdf

Stoyanov, B., Stoyanov, E., (2016). The usage of new technologies for collecting spatial data and ways of application in archaeoastronomy, *Publications of the Astronomical Society of Bulgaria (PASB)*, URL: http://astro.shu-bg.net/pasb/index_files/Papers/2016/Stoyanov.pdf, retrieved on 01.12.2016.

Tahar, N., (2015). Multi rotor UAV at different altitudes for slope mapping studies, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-1/W4, 2015, International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics, 30 Aug–02 Sep 2015, Toronto, Canada, pp. 9-16.

Yanchev, K., (2014). *Exploration and analysis of results of determining of mutual positioning of points over the ground surface by different geodesic methods and instruments*, Proc. of the International scientific conference “MATTECH 2014”, Shumen: Bishop Konstantin Preslavsky University publishing house (**Оригинално заглавие:** Янчев, К., (2014). *Изследване и анализ на резултати от определяне взаимното положение на точки от земната повърхност с различни геодезически методи и инструменти*, Сборник научни трудове на международната научна конференция “MATTECH 2014”, Шумен: Университетско издателство „Епископ Константин Преславски“).