

ANALYSIS OF THE ACCURACY OF GEODESICAL MAPS PREPARED BY THE MEANS OF UAVS³

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

Teodora Ignatova, PhD student

Department of Telecommunication,
"Angel Kanchev" University of Ruse
Phone: 082-888 673
E-mail: tignatova@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 accuracy of the geodesical maps, prepared on the base of the photographs, made by UAVs, is not studied in detail yet. Accounting this situation in the paper a mathematical model of the photogrammetry calculations, performed over the photograph information, obtained by UAVs, is developed. On its base the interaction of the factors, influencing on the accuracy of the geodesical maps, is analysed. The results, obtained in the paper, could be used for improvement of planning of geodesical measurements, accomplished by UAVs.

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

ВЪВЕДЕНИЕ

Днес безпилотните летателни апарати (БЛА) намират все по-широко приложение в много области на науката и индустрията (Stoyanov, B., Stoyanov, E., 2016). Така например само в сферата на контрола на инфраструктурни обекти БЛА се използват успешно за наблюдение в реално време на: състоянието на строителните площадки, реализацията на планове и спазването на технологичните изисквания, качеството на техническото обслужване на пътищата, мостовете, язовирните стени и т.н., както и за инвентаризация и управление на запасите в компаниите, експлоатиращи и поддържащи елементите на инфраструктурата.

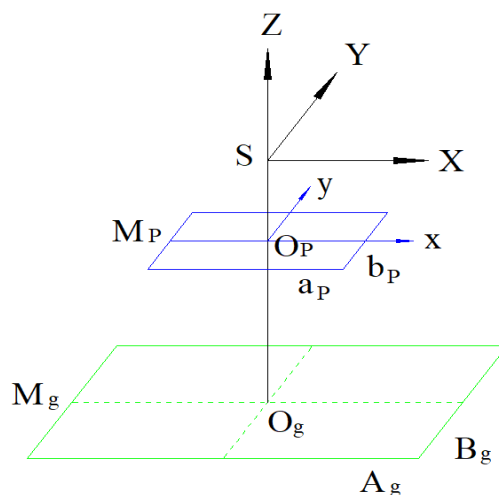
Един от най-важните фактори, влияещи върху успешното решаване на изброените задачи, е осигуряването на висока точност на тримерните модели на земната повърхност, изработвани с помощта на БЛА (Andreev, A., Mihaylov, P., Stoykov, E., 2016), (Yanchev, K., 2014). Към момента обаче проблемът за анализ на факторите, влияещи върху точността геодезическите измервания, провеждани с БЛА, не е изследван изчерпателно. По-конкретно, известните от специализираната литература анализи се базират основно върху опита от експлоатацията на класически самолети за картографиране и не отчитат в достатъчна степен специфичните особености на БЛА. Предвид на тази ситуация целта на настоящия доклад е да се разработи математически модел на процеса на фотограметрическо заснемане, който да позволи по-прецизно оценяване на влиянието на техническия прогрес в изграждането на автоматичните системи за управление на полета на БЛА и на глобалните навигационни спътникови системи (ГНСС) върху точността на тримерните модели на земната повърхност, изработвани с помощта на БЛА.

³ Докладът е представен с оригинално заглавие на български език: АНАЛИЗ НА ТОЧНОСТТА НА ГЕОДЕЗИЧНИТЕ ПЛАНОВЕ СЪЗДАДЕНИ С ПОМОЩТА НА БЛА

ИЗЛОЖЕНИЕ

Модел на фотограметричните измервания, осъществявани с помощта на БЛА

Както е известно (Nazarov, A., 2006), (Petrov, D., Mihaylov, P., 2014), фотограметрията е научна дисциплина, изучаваща методите за определяне на формата, размерите и пространственото положение на обектите в зададена координатна система по техните фотографски изображения. Фотограметрията се оформя като самостоятелен раздел на геодезията в началото на миналия век в резултат на използването на нова измервателна технология, базираща се на регистрацията и обработката на фотографски изображения на местността. Геометричен модел на получаването на една снимка с помощта на БЛА е представен на фиг. 1.



Фиг. 1. Геометричен модел на получаването на една снимка с помощта на БЛА

По-конкретно, БЛА облита по предварително зададен маршрут местността, за която трябва да бъде създаден тримерен цифров модел. За изпълнение на тази задача БЛА е екипиран с автопилот и цифрова фотокамера, монтирана върху стабилизирана платформа, чрез която равномерно по маршрута се регистрират оптически изображения (снимки). Те се натрупват (съхраняват) в специална RAM (random-access memory) памет и/или се предават по радиокommunikation линия към пулта за дистанционно управление на БЛА. При отварянето на обектива, оптичното изображение на местността под БЛА се регистрира от CCD (charge-coupled device) пълноформатна матрица с геометрични размери $a_p \times b_p$, съдържаща $N_{pa} \times N_{pb}$ на брой MOS (metal-oxide-semiconductor) кондензатора, които са точкови сензори за светлина и е прието да се наричат пиксели (pixels). Специално следва да се отбележи, че CCD пълноформатната матрица е разположена точно във фокуса на оптичната система на камерата и, в идеалния случай, в момента на снимане тя е успоредна на земната повърхност.

Реално изображението върху CCD пълноформатната матрица е обърнато на 180° и при обработката на получената чрез БЛА информация този дефект се компенсира със завъртане на 180° . Отчитайки този факт без загуба на общност може да се счита, че геометричните съотношения при реализирането на единична снимка съответстват на фиг. 1. При това: надирната линия SO_g съвпада с главната ос на оптичната система на камерата, правоъгълникът $a_p b_p$, описващ контура на CCD пълноформатната матрица и правоъгълникът $A_g B_g$, обхващащ заснемания участък от земната повърхност, са перпендикулярни на надирната линия SO_g , а $SO_p = f$ е фокусното разстояние. Следва да се отбележи специално, че координатите на центъра на проекцията т. S се определят с относителна висока точност след обработка на сигналите от спътниците на една или повече ГНСС. По тази причина може да се приеме, че $SO_g = H_d$ е височината на маршрута на БЛА над заснемания участък от земната повърхност.

В тази ситуация триъгълниците $\Delta M_p S O_p$ и $\Delta M_g S O_g$ са подобни ($\Delta M_p S O_p \sim \Delta M_g S O_g$), тъй като $\angle M_p S O_p = \angle M_g S O_g$ и $\angle M_p O_p S = \angle M_g O_g S = 90^\circ$. Следователно

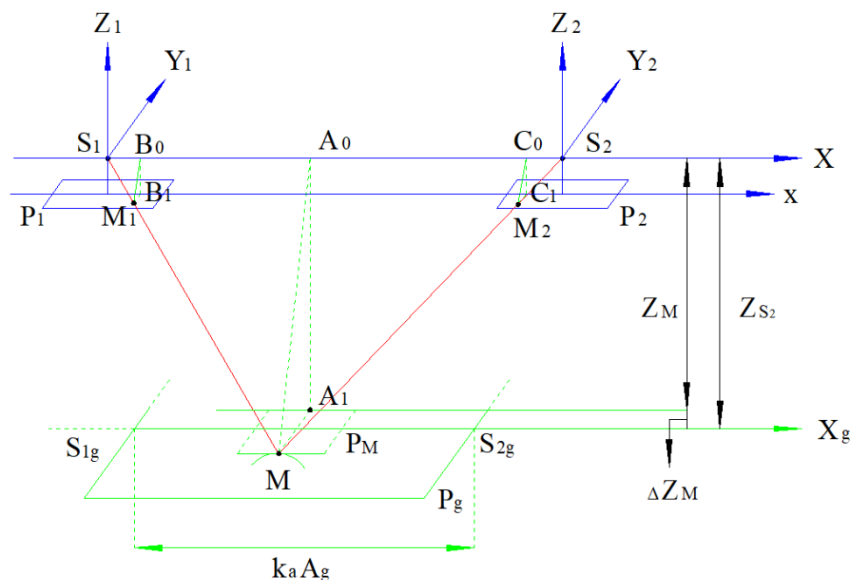
$$\frac{a_p/2}{A_g/2} = \frac{M_p O_p}{M_g O_g} = \frac{S O_p}{S O_g} = \frac{f}{H_d}. \quad (1)$$

Тъй като във фотографията е прието $\frac{a_p}{b_p} = 4/3$, от (1) се вижда че $\frac{A_g}{B_g} = 4/3$ и

$$A_g = \frac{a_p}{f} H_d, \quad B_g = \frac{b_p}{f} H_d. \quad (2)$$

Разгледаните дотук геометрични величини ще бъдат илюстрирани с техническите данни за камерата Sony EXMOR 1/2.3'', използвана в БЛА Phantom 3 Pro (Phantom 3 Professional, 2015): $f = 3,64 \text{ mm}$, $a_p = 6,3 \text{ mm}$, $b_p = 4,7 \text{ mm}$, $N_{pa} = 4000$, $N_{pb} = 3000$.

От фиг. 1 се вижда, че една отделна снимка не е достатъчна за изработването на тримерен цифров модел на земната повърхност, ограничена от правоъгълника $A_g B_g$. Действително, снимката е резултат от централна, а не от ортогонална проекция. Освен това снимката е плоска и по тази причина тя не съдържа пряка информация за координата Z на точките от заснетата повърхност. Във фотограметрията тези недостатъци се преодоляват чрез едновременна обработка на информацията от две (и повече) снимки. Този процес е прието да се нарича права фотограметрическа засечка и е представен на фиг. 2.



Фиг. 2. Права фотограметрическа засечка

По-конкретно, на фиг. 2 са приети следните допускания:

Д 1) От земната повърхност, ограничена от правоъгълника $k_a A_g k_b B_g$, в резултат на централни проекции от т. S_1 и т. S_2 са получени два различни образа, които са регистрирани върху снимките P_1 и P_2 , направени с камерата на БЛА. При това първообразите на снимките P_1 и P_2 са обхванати от правоъгълници с размери $A_g \times B_g$ (съгласно фиг. 1), а k_a и k_b са коефициентите на застъпване на изображенията (снимките) по координатните оси X и Y съответно.

Д 2) Без загуба на общност може да се приеме, че маршрутът на БЛА е строго успореден на координатната ос OX на координатната система $OXYZ$. Действително, ако това не е така, с минимални изчислителни грешки получените по-нататък формули могат да бъдат трансформирани в координатната система на БЛА (т.е. в координатната система, чиято ос $S_1 X$ съвпада с посоката на маршрута на БЛА).

Д 3) Координатите $\{X_{0S_1}, Y_{0S_1}, Z_{0S_1}\}$ и $\{X_{0S_2}, Y_{0S_2}, Z_{0S_2}\}$ на центровете на проекциите т. S_1 и т. S_2 се определят с относителна висока точност с помощта на една или повече ГНСС. При това за опростяване на записа ще се счита, че координатите на т. S_1 и т. S_2 са $\{X_{S_1} = 0, Y_{S_1} = 0, Z_{S_1} = 0\}$ и $\{X_{S_2} = X_{0S_2} - X_{0S_1}, Y_{S_2} = Y_{0S_2} - Y_{0S_1}, Z_{S_2} = Z_{0S_2} - Z_{0S_1}\}$.

Д 4) Снимките P_1 и P_2 лежат в една плоскост, която е успоредна на координатната ос S_1X . В резултат на това плоскостта на снимките е перпендикулярна на плоскостта S_1XZ , и, освен това, координатните системи на снимките $O_{P_1}x_1y_1$ и $O_{P_2}x_2y_2$ са ортогонални проекции на координатните системи $S_1X_1Y_1$ и $S_2X_2Y_2$ съответно, както това е показано на фиг. 1.

При тези допускания всяка т. M от заснетия правоъгълник $k_aA_gk_bB_g$ от земната повърхност има два образа върху снимките P_1 и P_2 - т. M_1 и т. M_2 , чиито координати са $\{X_{M_1}, Y_{M_1}, Z_{M_1} = -f\}$ и $\{X_{M_2}, Y_{M_2}, Z_{M_2} = -f\}$ съответно. От Д 4 и фиг. 1 се вижда, че

$$X_{M_1} = x_{M_1}, X_{M_2} = X_{S_2} + x_{M_2}. \quad (3)$$

Накрая трябва да се отчете, че ако в равнината на снимките правата M_1M_2 има произволна обща точка с правата $O_{P_1}x_1 \equiv O_{P_2}x_2$, тогава триъгълникът ΔS_1MS_2 лежи в равнината S_1XZ . Следователно, правата M_1M_2 или е успоредна на правата $O_{P_1}x_1 \equiv O_{P_2}x_2$ или съвпада с нея. По тази причина

$$Y_{M_1} = y_{M_1} = Y_{M_2} = y_{M_2}. \quad (4)$$

За опростяване на геометричния анализ на фиг. 2 през т. M_1 , т. M и т. M_2 са прекарани равнини, които са перпендикулярни на равнината S_1XZ . Така са получени т. B_1 , т. A_1 и т. C_1 , които са съответните проекции на т. M_1 , т. M и т. M_2 върху равнината S_1XZ .

В тази ситуация триъгълниците $\Delta M_1B_1B_0$ и $\Delta M_1C_1C_0$ са еднакви ($\Delta M_1B_1B_0 \cong \Delta M_1C_1C_0$), тъй като $\angle M_1B_1B_0 = \angle M_1C_1C_0 = 90^\circ$, $B_1B_0 = C_1C_0 = f$ и $M_1B_1 = M_2C_1 = Y_{M_1}$. Следователно

$$M_1B_0 = M_2C_0. \quad (5)$$

Освен това, $\Delta S_1M_1B_0 \sim \Delta S_1MA_0$ и $\Delta S_2M_2C_0 \sim \Delta S_2MA_0$, тъй като: $\angle M_1S_1B_0 = \angle MS_1A_0$, $\angle M_1B_0S_1 = \angle MA_0S_1 = \angle M_2C_0S_2 = \angle MA_0S_2 = 90^\circ$ и $\angle M_2S_2C_0 = \angle MS_2A_0$. Следователно

$$\frac{M_1B_0}{MA_0} = \frac{S_1B_0}{S_1A_0} = \frac{X_{M_1}}{X_M}, \quad (6)$$

$$\frac{M_2C_0}{MA_0} = \frac{S_2C_0}{S_2A_0} = \frac{X_{S_2} - X_{M_2}}{X_{S_2} - X_M}. \quad (7)$$

След отчитане на (5) в (6) и (7) се установява, че

$$X_M = \frac{X_{M_1}}{X_{S_2} - X_{M_2} + X_{M_1}} X_{S_2}. \quad (8)$$

Предвид на (3), равенство (8) може да се представи и във вида

$$X_M = \frac{x_{M_1}}{-x_{M_2} + x_{M_1}} X_{S_2} = K_x X_{S_2}, \quad K_x = \frac{x_{M_1}}{-x_{M_2} + x_{M_1}}. \quad (9)$$

От друга страна, триъгълниците $\Delta B_0M_1B_1$ и ΔA_0MA_1 също са подобни ($\Delta B_0M_1B_1 \sim \Delta A_0MA_1$), тъй като $\angle M_1B_0B_1 = \angle MA_0A_1$ и $\angle M_1B_1B_0 = \angle MA_1A_0 = 90^\circ$. Следователно

$$\frac{X_{M_1}}{X_M} = \frac{M_1B_0}{MA_0} = \frac{B_0B_1}{A_0A_1} = \frac{-f}{Z_M}, \quad \frac{X_{M_1}}{X_M} = \frac{M_1B_0}{MA_0} = \frac{M_1B_1}{MA_1} = \frac{Y_{M_1}}{Y_M}. \quad (10)$$

Като се отчетат (4) и (9) в (10) се установява, че

$$Y_M = \frac{y_{M_1}}{-x_{M_2} + x_{M_1}} X_{S_2} = K_y X_{S_2}, \quad K_y = \frac{y_{M_1}}{-x_{M_2} + x_{M_1}}, \quad (11)$$

$$Z_M = \frac{-f}{-x_{M_2} + x_{M_1}} X_{S_2} = K_z X_{S_2}, \quad K_z = \frac{-f}{-x_{M_2} + x_{M_1}}. \quad (12)$$

Анализ на точността на геодезичните планове, създадени с помощта на БЛА

От (9) се вижда, че оценката $\tilde{X}_M$ на координатата X_M на т. М е

$$\tilde{X}_M = (K_x + \delta K_x)(X_{S_2} + \delta X_{S_2}) = K_x X_{S_2} + K_x \delta X_{S_2} + \delta K_x X_{S_2} + \delta K_x \delta X_{S_2}, \quad (13)$$

като тук δK_x е грешката при изчисляването на безразмерния коефициент K_x , а δX_{S_2} е грешката при определянето на относителната координата

$$X_{S_2} = X_{0S_2} - X_{0S_1}. \quad (14)$$

Тъй като $\delta K_x \delta X_{S_2}$ е относително много по-малка величина от другите величини в дясната част на (13), може да се приеме, че:

$$\tilde{X}_M \approx K_x X_{S_2} + K_x \delta X_{S_2} + \delta K_x X_{S_2}. \quad (15)$$

Очевидно оценките $\tilde{Y}_M$ и $\tilde{Z}_M$ на координатите Y_M и Z_M на т. М се определят от следните съотношения, които са напълно аналогични на (15):

$$\tilde{Y}_M \approx K_y Y_{S_2} + K_y \delta Y_{S_2} + \delta K_y Y_{S_2}, \quad (16)$$

$$\tilde{Z}_M \approx K_z Z_{S_2} + K_z \delta Z_{S_2} + \delta K_z Z_{S_2}. \quad (17)$$

За опростяване на анализа на точността на геодезичните планове, създадени с помощта на БЛА, може да бъде направено допускането, че грешките $\delta K_x, \delta K_y, \delta K_z$ и $\delta X_{S_2}, \delta Y_{S_2}, \delta Z_{S_2}$ са независими случайни величини с математически очаквания

$$m_x = m_y = m_z = m_X = m_Y = m_Z = 0, \quad (18)$$

и средни квадратични отклонения

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \sigma_p, \sigma_X = \sigma_Y = \sigma_Z = \sqrt{2}\sigma_0. \quad (19)$$

Тук σ_0 е средно квадратичното отклонение на грешките при определянето на координатите на центровете на проекциите т. S_1 и т. S_2 с приемник на сигналите на спътниците на една или повече ГНСС, разположен на борда на БЛА.

Допускането (18) се обяснява с факта, че на съвременния етап от развитието на компютърната техника при обработката на информацията е лесно отстраняването на всякакви систематични грешки.

В настоящия момент е налице устойчива тенденция на постоянно намаляване на средно квадратичните отклонения σ_p и σ_0 , което води до повишаване точността на оценките (15), (16) и (17). Причините за това са следните. Първо, непрекъснато се повишава качеството на работа на автопилотите на БЛА, при което се постига прецизно следване на зададения маршрут. Второ, грешките при позиционирането на камерите са малки, тъй като те са монтирани на специални стабилизиращи миниатюрни платформи. Трето, ако преди няколко години потребителите можеха да се използват само ГНСС NAVSTAR GPS, то днес на разположение и ГНСС ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou.

ИЗВОДИ

БЛА са изключително удобно средство за наблюдение и контрол на инфраструктурни обекти в реално време. За изпълнението на тази функция обаче е необходимо тримерните модели на земната повърхност, изработвани с помощта на БЛА, да имат висока точност. Предвид на това в доклада е анализирано взаимодействието на факторите, влияещи върху точността на фотограметричската обработка на изображения, регистрирани от камерите на БЛА. Резултатите, получени в доклада, могат да бъдат използвани за подобряване планирането на геодезическите изследвания, извършвани 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“.)

Nazarov, A., (2006). *Photogrammetry*, Minsk: TetraSystems (**Оригинално заглавие:** Назаров, А., 2006. *Фотограмметрия*. Минск: Издателство „ТетраСистемс“.)

Petrov, D., Mihaylov, P., (2014). *Contemporary technical devices and technologies for collecting of geospatial data for the ground*, Shumen: Bishop Konstantin Preslavsky University publishing house (**Оригинално заглавие:** Петров, Д., Михайлов, П., (2014). *Съвременни технически средства и технологии за събиране на геопространствени данни за местността*. 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.

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“.)