

**A METHODOLOGY FOR ESTIMATING THE ACCURACY
OF PRIMARY PHOTOGRAMMETRIC INFORMATION,
OBTAINED BY UAVS¹⁹**

Eng. Monika Bedzheva, PhD

Department of Geodesy,
Konstantin Preslavsky University of Shumen, Bulgaria
Tel.: 054-830 495/208
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 widely used in geodesy for mapping. Due to this reason the estimation of accuracy of primary photogrammetric information, obtained by UAVs, is an actual scientific problem, which is not studied in detail yet. Accounting this situation in the paper a methodology for estimating the accuracy of projective center coordinates of images from UAVs is developed. The methodology, substantiated in the paper, can be used for improvement of UAV mission planning and thus – the final result from image processing.*

***Keywords:** Unmanned aerial vehicles, Photogrammetry, Global navigation satellite system (GNSS)*

ВЪВЕДЕНИЕ

Безпилотните летателни апарати (БЛА) днес намират широко приложение във фотограметрията, тъй като те позволяват бързо и лесно да се направят голям брой детайлни снимки на земната повърхност, в резултат на което времето за разработване на географски информационни системи се съкращава значително (Petrov, D., Mihaylov, P., 2014), (Andreev, A., Mihaylov, P., Stoykov, E., 2016), (Petrova, P., 2014). Същевременно БЛА са относително ново технологично средство, поради което влиянието на точността на получената от тях първична фотограметрична информация върху точността на създаваните триизмерни цифрови модели на местността (ЦММ) все още не е изследван достатъчно детайлно (Bedzheva, M. 2020). Предвид на тази ситуация, в настоящия доклад, от гледна точка на математическата статистика, е направен анализ на факторите, влияещи върху точността на определяне на координатите на проекционните центрове на снимките, направени с БЛА. На тази основа е разработена методика за теоретична оценка на интервала на корелация на стационарните случайни грешки при определянето на координатите на проекционните центрове на снимките от бордовите приемници на БЛА, обработващи сигналите на глобалните спътникови навигационни системи (ГНСС). Тази методика дава възможност да се изчисли минималният брой контролни точки (КТ, ground control points - GCPs), които трябва да се разположат преди полета на БЛА върху заснеманата повърхност, така че да се постигне необходимата точност на геореферирание на триизмерните ЦММ.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Статистически анализ на грешките при определяне проекционните центрове на снимките чрез бордовите ГНСС приемници на БЛА

¹⁹ Докладът е представен на on-line сесия на 13 ноември 2020 с оригинално заглавие на български език: МЕТОДИКА ЗА ОЦЕНКА ТОЧНОСТТА НА ПЪРВИЧНАТА ФОТОГРАМЕТРИЧНА ИНФОРМАЦИЯ, ПОЛУЧЕНА ОТ БЛА

Както е известно (Bedzheva, M. 2020) в най-обща ситуация пространствените координати (X_M, Y_M, Z_M) на произволна точка M от триизмерен ЦММ, формиран въз основа на стерео двойки снимки, получени с БЛА, се представят със следните линейни функции

$$X_M = \frac{x_1}{x_1 - x_2} \left(X_2 + \frac{x_2}{f_0} Z_2 \right), \quad Y_M = \frac{y_1}{y_1 - y_2} \left(Y_2 + \frac{y_2}{f_0} Z_2 \right), \quad Z_M = \frac{f_0}{x_1 - x_2} \left(X_2 + \frac{x_2}{f_0} Z_2 \right). \quad (1)$$

Тук (x_1, y_1) и (x_2, y_2) са образните координати на т. M върху първата и втората снимки съответно, $f_0 = \frac{f}{\Delta a_p}$, f [m] е фокусното разстояние на камерата на БЛА, Δa_p [m] е линейният размер на един пиксел върху снимките, а (X_2, Y_2, Z_2) са относителните координати на проекционния център на втората снимка спрямо проекционния център на първата снимка:

$$X_2 = X'_2 - X'_1, \quad Y_2 = Y'_2 - Y'_1, \quad Z_2 = Z'_2 - Z'_1. \quad (2)$$

В (2) (X'_1, Y'_1, Z'_1) и (X'_2, Y'_2, Z'_2) са пространствените координати на проекционните центрове на първата и втората снимка от стереодвойката, изчислени след обработката на сигналите, приети от бордовия ГНСС приемник на БЛА (Petrov, D., Mihaylov, P., 2014).

Тъй като грешките в определянето на образните координати са малки, от (1) и (2) се вижда, че точността на триизмерните ЦММ, генерирани въз основа на първичната информация, получена от БЛА, се определя основно от грешките, съпътстващи определенията на бордовия ГНСС приемник. По тази причина те ще бъдат анализирани по-детайлно до края на този раздел.

Както е известно (Petrov, D., Mihaylov, P., 2014), (Andreev, A., Mihaylov, P., Stoykov, E., 2016), бордовият ГНСС приемник на БЛА определя времената τ_{mi} , $i = 1, 2, \dots, N_{sat} \geq 4$, за които навигационните съобщения от поне четири навигационни спътника (НС) на някоя ГНСС (NAVSTAR GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou, QZSS) достигат до него. Това позволява на ГНСС приемника да изчисли т. нар. псевдоразстояния R_i , $i = 1, 2, \dots, N_{sat} \geq 4$ до всеки от НС:

$$R_i = c\tau_{mi} = \rho_i + \Delta\rho_i, \quad i = 1, 2, \dots, N_{sat}. \quad (3)$$

Тук c ($c = 299\,792\,458 \pm 1,2 \left[\frac{m}{s} \right] \approx 3 \cdot 10^8 \left[\frac{m}{s} \right]$) е скоростта на разпространение на електромагнитните вълни в свободното пространство, ρ_i е истинското разстояние между i -тия НС и ГНСС приемника, а $\Delta\rho_i$ е допуснатата грешка.

ГНСС приемникът определя своите координати (X', Y', Z') в кординатната система (КС) на съответната ГНСС по следния начин.

Първо, точката с координати $(X_{sati}, Y_{sati}, Z_{sati})$, в която се намира i -тият НС в момента на изпращане на навигационното съобщение, се разглежда като център на сфера с радиус $\phi_{R_i} = \{X_{sati}, Y_{sati}, Z_{sati}, R_i\}$, $1, 2, \dots, N_{sat}$.

Второ, ГНСС приемникът определя общите точки на посочените сфери ϕ_{R_i} , $1, 2, \dots, N_{sat}$ като решава системата

$$\sqrt{(X_{sati} - X')^2 + (Y_{sati} - Y')^2 + (Z_{sati} - Z')^2} = R_i, \quad i = 1, 2, \dots, N_{sat} \quad (4)$$

Трето, ГНСС приемникът взема за свое положение това решение на (4), което съответства на точка върху земната повърхност.

Тук следва да се отбележи, че информацията за координатите $(X_{sati}, Y_{sati}, Z_{sati})$, $i = 1, 2, \dots, N_{sat}$ на точките, в които се намират НС в момента на изпращане на навигационните съобщения, е зададена в използваната от тях КС. По тази причина и координатите (X', Y', Z') на ГНСС приемника, представляващи решение на системата (4), се определят в същата КС.

В (3) грешката $\Delta\rho_i$ при измерване на разстоянието между i -тия НС и ГНСС приемника е сума от грешки, които от гледна точка на техните статистически свойства, могат да се класифицират като: систематични (постоянни, константни) грешки, стационарни (бавно

флуктоиращи) и бързо флуктоиращи случайни функции. (Bedzheva, M. 2020). Следователно $\Delta\rho_i$ в (3) може да се представи във вида

$$\Delta\rho_i = \sum \Delta\rho_{i,const} + \sum \Delta\rho_{i,s} + \sum \Delta\rho_{i,q}. \quad (5)$$

В (5) $\sum \Delta\rho_{i,const}$ е сумата на всички систематични грешки, а $\sum \Delta\rho_{i,s}$ и $\sum \Delta\rho_{i,q}$ са сумите на бавно и бързо флуктоиращите случайни функции съответно.

В резултат на голям брой експериментални изследвания е установено, че:

$$|\sum \Delta\rho_{i,const} + \sum \Delta\rho_{i,s}| \leq 20 [m], \quad |\sum \Delta\rho_{i,q}| \leq 0,5 [m]. \quad (7)$$

За решаването на много практически задачи (например изчисляване на площи и обеми на определени терени) е достатъчно да се използват триизмерни ЦММ, реферирани спрямо КС $OXYZ$, чието начало O съвпада с проекционния център на първата снимка (т.е. $X_1 = 0$, $Y_1 = 0$, $Z_1 = 0$). В тази ситуация от (2) се вижда, че ако всички снимки са направени за времеви интервал τ_D по-малък от интервала на корелация τ_{corr} на сумата $\sum \Delta\rho_{i,s}$ на бавно флуктоиращите случайни функции (т.е. ако $\tau_D \leq \tau_{corr}$), тогава големите грешки ($\sum \Delta\rho_{i,const} + \sum \Delta\rho_{i,s}$) в (5) взаимно ще се компенсират. От друга страна, вредният ефект от бързо флуктоиращите грешки $\sum \Delta\rho_{i,q}$ в (5) може да бъде намален чрез подходящо планиране на полета на БЛА и използване на по-голям коефициент на застъпване на снимките.

От направения анализ следва изводът, че определянето на интервала на корелация τ_{corr} на сумата $\sum \Delta\rho_{i,s}$ на бавно флуктоиращите (стационарните) случайни функции е важна практическа задача.

Методика за теоретична оценка на интервала на корелация на стационарните случайни грешки при определяне координатите на проекционните центрове на снимките чрез бордовите ГНСС приемници на БЛА

От предходния анализ се вижда, че Методиката за теоретична оценка на интервала на корелация на стационарните случайни грешки при определяне координатите на проекционните центрове на снимките трябва да съдържа следните етапи.

Етап 1) Установяване на интервалите на пряка радио-видимост на НС за мястото и времето на фотограметричното заснемане.

Необходимостта на този етап произтича от факта, че компенсиране на големите грешки ($\sum \Delta\rho_{i,const} + \sum \Delta\rho_{i,s}$) в (5) е възможно само, ако бордовият ГНСС приемник на БЛА решава навигационната задача (4) въз основа на сигналите на едни и същи НС, като техният брой N_{sat} трябва да удовлетворява условието $N_{sat} \geq 4$.

Информацията, необходима за изпълнение на Етап 1, е представена на сайтовете на центровете за управление на ГНСС. Например:

<https://www.glonass-iac.ru/GLONASS/CalculateVisibleZones.php>

е сайтът на Информационно-аналитичния център на ГНСС ГЛОНАСС.

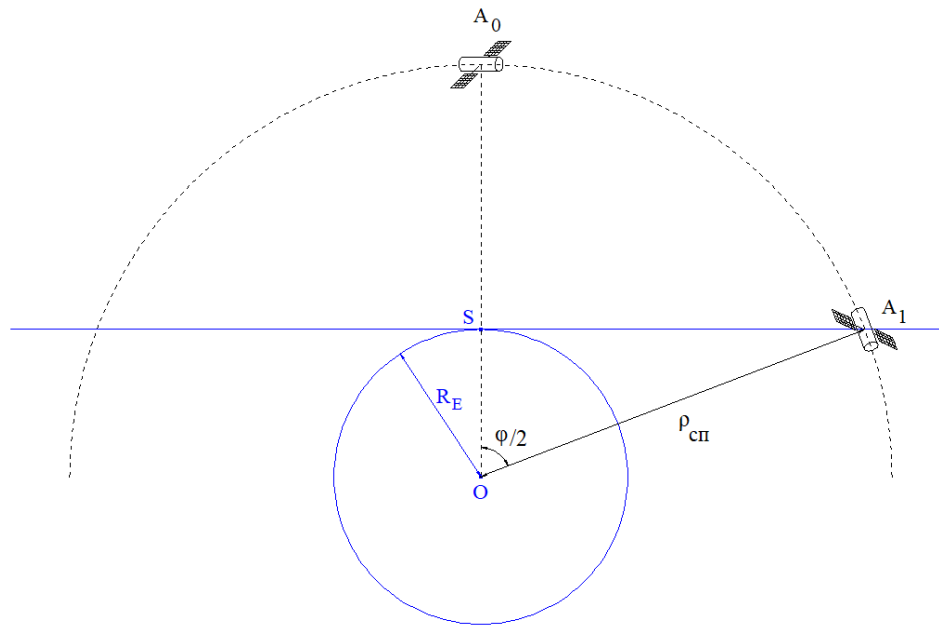
Етап 2) Начална оценка на интервала на корелация на грешките при определяне на проекционните центрове на снимките с ГНСС приемника на БЛА.

От информацията, получена на Етап 1, се вижда (фиг. 1), че за времевия прозорец 09:00 ч. ÷ 17:00 ч., през който осветеността на земната повърхност е най-добра, интервалът на наблюдение на един НС τ_{vs} от т. S е

$$\tau_{vs} \approx 4 [h] = 14\,400 [s]. \quad (8)$$

Това означава, че НС изминава по небосклона пътя от т. A_0 до т. A_1 за време $\tau_{vs}/2$ (фиг. 1). Следователно средната скорост на изменение на зенитния ъгъл ξ е

$$v_{\xi} = \frac{\angle A_0SA_1}{\tau_{vs}/2} = \frac{\pi/2}{\tau_{vs}/2} = \frac{\pi}{\tau_{vs}} [rad/s]. \quad (9)$$



Фиг. 1. Геометрични съотношения, обуславящи интервалите на видимост на навигационните спътници

В (9) е положено $\sphericalangle A_0SA_1 \approx \pi/2$, тъй като БЛА летят над земната повърхност на височини $H_a \geq 20 [m]$, при което практически не възникват закрития от сгради. По тази причина в заявките до центровете за управление на ГНСС (Етап 1) трябва да се посочи минимално възможната стойност на ъгъла на място (възвишение) $\varepsilon = \frac{\pi}{2} - \xi = 5^\circ$.

Също от информацията, получена на Етап 1, се вижда, че интервалите на наблюдение τ_{vg} на една постоянна група от поне 4 НС от една и съща ГНСС е

$$\tau_{vg} \approx \frac{\tau_{vs}}{4} = 1 [h] = 3\,600 [s]. \quad (10)$$

Следователно, в качеството на начална оценка на интервала на корелация на грешките при определяне на проекционните центрове на снимките може да се приеме

$$\tau_{corr} \leq 1 [h] = 3\,600 [s], \quad (11)$$

тъй като взаимно компенсиране на големите грешки ($\sum \Delta\rho_{i,const} + \sum \Delta\rho_{i,s}$) в (5) е възможно само, ако бордовият ГНСС приемник на БЛА решава навигационната задача (4) въз основа на сигналите на едни и същи НС, като техният брой N_{sat} трябва да удовлетворява условието $N_{sat} \geq 4$.

Етап 3) Изчисляване на интервала на корелация на йоносферните грешки

Целта на този етап е да се прецизира началната оценка на интервала на корелация на грешките при определяне на проекционните центрове на снимките (11). Това може да се постигне като се използва фактът, че доминиращата по големина стационарна (бавно флуктоираща) грешка е йоносферната грешка. Следователно, нейният интервал на корелация $\tau_{ioncorr}$ може да се приеме като прецизиране на оценката на τ_{corr} , получена на Етап 2.

При изчисляването на $\tau_{ioncorr}$ трябва да се вземат предвид два фактора:

- йоносферната зенитна задръжка I_Z , макар и бавно, се променя през целия ден;
- йоносферната задръжка $I(\xi) = I_Z OF_i(\xi)$ се променя в резултат на движението на наблюдавания спътник по небосклона, при което тя се увеличава от 1, когато $\xi = 0$, до 3, когато $\xi = 85^\circ$.

При анализа в (Bedzheva, M. 2020) е установено, че

$$\tau_{ioncorr} \leq 1 [h] = 3\,600 [s], \quad (12)$$

тъй като йоносферната зенитна задръжка I_Z се изменя със скорост около $0,2I_Z/1 [h]$ (изменението е по-бавно само във времевия интервал 13:00 ч. ÷ 15:00 ч.).

Сега нека $\Delta\rho_{iond} [m]$ е допустимата йоносферна грешка, а I_{Zm} е максималната стойност на йоносферната зенитна задръжка I_Z за деня на облитането на терена. Освен това, нека ξ_d е зенитният ъгъл, при който йоносферната грешка е по-голяма от I_{Zm} точно с $\Delta\rho_{iond} [m]$. С други думи, когато навигационният спътник, премествайки се от т. A_0 ($\xi = 0^\circ, I(\xi) = 1$) до т. A_1 ($\xi = 90^\circ$) достигне зенитен ъгъл ξ_d , тогава $I(\xi_d) = 1 + \frac{\Delta\rho_{iond}}{I_{Zm}}$. От това условие се получава следното уравнение (Bedzheva, M. 2020):

$$1 + \frac{\Delta\rho_{iond}}{I_{Zm}} = OF_i(\xi_d) = \left[1 - \left(\frac{R_E}{R_E + h_i} \sin \xi_d \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}. \quad (13)$$

Неговото решение е

$$\xi_d = \arcsin \left\{ \sqrt{\left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta\rho_{iond}}{I_{Zm}} \right)^2} \right]} \left(1 + \frac{h_i}{R_E} \right) \right\}. \quad (14)$$

Въз основа на (14) и (10) се получава следната оценка на времевия интервал на корелация на йоносферната грешка по отношение на един НС

$$\tau_{ioncorr,1} = 2 \frac{\xi_d}{v_\xi}. \quad (15)$$

В (15) има коефициент 2, тъй като йоносферната грешка остава в границите $[I_{Zm}, I_{Zm} \pm \Delta\rho_{iond}]$, когато зенитният ъгъл се изменя в границите $[-\xi_d, \xi_d]$.

Накрая следва да се вземе под внимание фактът, че взаимно компенсирани на големите грешки ($\sum \Delta\rho_{i,const} + \sum \Delta\rho_{i,s}$) в (5) е възможно само, ако $N_{sat} \geq 4$. Следователно, интервалът на корелация на йоносферната грешка е

$$\tau_{ioncorr} = \frac{\tau_{ioncorr,1}}{4}. \quad (16)$$

От изложеното се вижда, че при изработването на триизмерни ЦММ броят N_{GCP} на КТ, които трябва да се разположат преди полета на БЛА върху заснеманата повърхност, се определя от условието

$$N_{GCP} \geq \frac{T_{БЛА}}{\tau_{ioncorr}}. \quad (17)$$

Тук $T_{БЛА}$ е времето на полета на БЛА. То зависи от: площта на изследвания участък от земната повърхност, скоростта и височината на полета на БЛА и коефициента на застъпване на снимките.

ИЗВОДИ

В доклада е обоснована Методика за теоретична оценка на интервала на корелация на стационарните случайни грешки при определяне координатите на проекционните центрове на снимките от бордовите ГНСС приемници на БЛА. Методиката дава възможност да се подобри планирането на фотограметричното заснемане с БЛА, така че да се постигне точност на триизмерните ЦММ, съответстваща на изискванията на създаваната географска информационна система (Andreev, A., Mihaylov, P., Stoykov, E., 2016), (Petrova, P., Andreev, A., 2014), (Petrova, P., 2014).

БЛАГОДАРНОСТИ

Този доклад е подкрепен от Националната научна програма „Информационни и комуникационни технологии за единен цифров пазар в науката, образованието и сигурността (ИКТЕЦПНОС)“, финансиран от Министерството на образованието и науката на Р. България.

REFERENCES

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“.)

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“.)

Petrova, P., (2014). *Information systems for cadaster in Bulgaria and in abroad*. Proc. of Third international scientific conference Science, Education, Innovation, Vol. II, p. 196 – 205, 21-23 May 2014, Shumen, Bulgaria

Bedzheva, M. (2020), *Exploration of the infrastructure objects monitoring possibilities using unmanned aerial vehicles*, PhD dissertation, Shumen: Bishop Konstantin Preslavsky University publishing house (**Оригинално заглавие:** Беджева, М., (2020). *Изследване на възможностите за мониторинг на инфраструктурни обекти с използване на безпилотни летателни апарати*, дисертация за получаване на ОНС „Доктор“, Шумен: Университетско издателство „Епископ Константин Преславски“.)

Petrova, P., Andreev, A., (2014). *Systematic approach to evaluating the effectiveness of the information technology for cadaster*. Proc. of Third international scientific conference Science, Education, Innovation, Vol. II, p. 205 – 211, 21-23 May 2014, Shumen, Bulgaria

Petrova, P., (2014). *Analysis and validation of the effectiveness of the internal environment of the integrated information system for cadaster and estate registry*. Proc. of Third international scientific conference Science, Education, Innovation, Vol. II, p. 211 – 219, 21-23 May 2014, Shumen, Bulgaria