

**A SURVEY OF METHODS FOR INCREASING THE ACCURACY
OF DIGITAL ELEVATION MODELS, CREATED BY PROCESSING THE
INFORMATION FROM UAVS¹⁴**

Eng. Monika Bedzheva, PhD

Department of Geodesy,
Konstantin Preslavsky University of Shumen, Bulgaria
Tel.: 054-830 495/208
E-mail: m.bedzheva@shu.bg

Dimitar Marinov, PhD student

Department of Telecommunication,
“Angel Kanchev” University of Ruse
Phone: 082-888 673
E-mail: dmarinov@uni-ruse.bg

***Abstract:** Today unmanned aerial vehicles (UAVs) are successfully used for mapping, because they allow fast gathering of spatial information. Accounting this situation, in the paper a survey of methods for increasing the accuracy of digital elevation models, created by processing the information from UAVs, is presented. Besides, a methodology for increasing the accuracy of digital elevation models is substantiated. This methodology can be used for improving the results from the spatial analysis.*

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

ВЪВЕДЕНИЕ

Безпилотните летателни апарати (БЛА) днес намират широко приложение във фотограметрията, тъй като те намаляват многократно трудоемкостта на процеса на получаване на първичните данни и дават възможност за изследване на трудно достъпни или дори на практически недостъпни зони в реално време. В резултат на това времето за разработване на географски информационни системи (ГИС) се съкращава значително (Petrov, D., Mihaylov, P., 2014), (Petrova, P., 2014), (Bedzheva, M. 2020), (Bedzheva, M., Ignatova, T., 2020). От друга страна обаче, получаваните в резултат на обработката триизмерни цифрови модели на местността (ЦММ) не са достатъчно точно геореферирани, което налага прилагането на специални подходи за отстраняване на този недостатък. Всеки от тези подходи има своите специфични особености, чието отчитане води до подобряване качеството на планирането и провеждането на фотограметричното заснемане с БЛА, както и до намаляване на себестойността му (Bedzheva, M. 2020). Предвид на тази ситуация, в настоящия доклад е направена систематизация на предимствата и недостатъците на подходите за повишаване точността на определяне координатите на проекционните центрове на снимките от бордовите приемници на БЛА, обработващи сигналите на глобалните спътникови навигационни системи (ГНСС). На тази основа е обоснован и един нов подход, който е особено подходящ за изследвания на трудно достъпни зони.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Подходи за повишаване точността на определяне координатите на проекционните центрове на снимките от бордовите ГНСС приемници на БЛА

¹⁴ Докладът е представен на on-line сесия на 13 ноември 2020 с оригинално заглавие на български език: ОБЗОР НА ПОДХОДИТЕ ЗА ПОВИШАВАНЕ ТОЧНОСТТА НА ТРИИЗМЕРНИТЕ ЦИФРОВИ МОДЕЛИ НА МЕСТНОСТТА, СЪЗДАВАНИ ЧРЕЗ ОБРАБОТКА НА ИНФОРМАЦИЯТА ОТ БЛА

Както е известно (Bedzheva, M. 2020), (Bedzheva, M., Ignatova, T., 2020), в най-обща ситуация прецизността на триизмерните ЦММ, генерирани въз основа на първичната информация, получена от БЛА, се определя основно от грешките, съпътстващи определенията на бордовия ГНСС приемник. Тези грешки могат да се опишат аналитично по следния начин.

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

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

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.

Второ, в (1) 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). По тази причина $\Delta\rho_i$ в (1) може да се представи във вида

$$\Delta\rho_i = \sum \Delta\rho_{i,const} + \sum \Delta\rho_{i,s} + \sum \Delta\rho_{i,q}. \quad (2)$$

В (2) $\sum \Delta\rho_{i,const}$ 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. При това, в резултат на голям брой експериментални изследвания е установено, че:

$$\left| \sum \Delta\rho_{i,const} + \sum \Delta\rho_{i,s} \right| \leq 20 [m], \quad \left| \sum \Delta\rho_{i,q} \right| \leq 0,5 [m]. \quad (3)$$

Вредният ефект от бързо флуктоиращите грешки $\sum \Delta\rho_{i,q}$ в (3) може да бъде намален чрез подходящо планиране на полета на БЛА и използване на по-голям коефициент на застъпване на снимките. Действително, ако коефициентът на застъпване на снимките е $N_{ov} = 80 \%$, тогава всеки елемент от заснемания земен участък се вижда на 10 снимки. Ето защо след обработката на информацията средната квадратна грешка (СКГ), предизвикана от бързо флуктоиращите грешки $\sum \Delta\rho_{i,q}$ в (3), ще се редуцира $\sqrt{10}$ пъти. Предвид на този факт, голяма практическа значимост имат подходите за намаляване на бавно флуктоиращите (стационарните) грешки $\sum \Delta\rho_{i,s}$ в (3).

Анализите на подходите за намаляване на бавно флуктоиращите (стационарните) грешки $\sum \Delta\rho_{i,s}$ в (3) в зависимост от източника на информацията за поправките (Petrov, D., Mihaylov, P., 2014), (Petrova, P., 2014), (Беджева, М., 2020), (Petrova, P., Andreev, A., 2014), (Petrova, P., 2014), показват, че те могат да се класифицират по следния начин.

1) Подходи, основаващи се на пряко измерване на бавно флуктоиращите (стационарните) грешки. При тези подходи се използват N_{refp} референтни точки (РТ) от земната повърхност, чиито пространствени геодезични координати вече са определени по някакъв начин с точност по-добра от $10 [mm]$. Тези координати $(X_{iref}, Y_{iref}, Z_{iref}), i = 1, 2, \dots, N_{refp}$ на РТ се приемат за опорни. Точно над някоя от РТ (например k -тата РТ) се поставя високоточен геодезичен ГНСС приемник, който е прието да се нарича базова станция (БС). БС определя координатите $(X_{kGNSS}, Y_{kGNSS}, Z_{kGNSS})$ на k -тата РТ въз основа на сигналите на навигационните спътници (НС). От (2) се вижда, че разликите между известните и измерените координати на k -тата РТ могат да се представят във вида

$$\begin{aligned}\Delta X_k &= X_{kref} - X_{kGNSS} = \Delta X_{k,s} + \Delta X_{k,q}, \\ \Delta Y_k &= Y_{kref} - Y_{kGNSS} = \Delta Y_{k,s} + \Delta Y_{k,q}, \\ \Delta Z_k &= Z_{kref} - Z_{kGNSS} = \Delta Z_{k,s} + \Delta Z_{k,q}.\end{aligned}\tag{4}$$

В (4) $\Delta X_{k,s}, \Delta Y_{k,s}, \Delta Z_{k,s}, \Delta X_{k,q}, \Delta Y_{k,q}, \Delta Z_{k,q}$ са бавно и бързо флуктоиращи грешки при определяне координатите $(X_{kref}, Y_{kref}, Z_{kref})$ на k -тата РТ, предизвикани съответно от бавно и бързо флуктоиращите грешки $\sum \Delta \rho_{i,s}, \sum \Delta \rho_{i,q}$ в (3) в процеса на обработка на информацията, съдържаща се в сигналите на НС.

Едновременно и синхронно с БС работят един или няколко подвижни геодезични ГНСС приемници (наречени роувъри), чрез които се измерват пространствените координати на точките от изгражданата геодезична мрежа. На финалния етап от обработката на първичната геодезична информация поправките $\Delta X_k, \Delta Y_k, \Delta Z_k$ се изваждат от координатите на точките, измерени от роувърите. В резултат, пространствените координати на точките от изгражданата геодезична мрежа се оказват изкривени („натоварени“) само с бързо флуктоиращите грешки $\Delta X_{k,q}, \Delta Y_{k,q}, \Delta Z_{k,q}$. Вредният ефект от тях обаче се компенсира чрез статистическо осредняване.

На свой ред подходите, основаващи се на пряко измерване на бавно флуктоиращите (стационарните) грешки, в зависимост от продължителността на статистическото осредняване се класифицират като: статика, бърза статика, кинематика и кинематика в реално време (real time kinematic – RTK). В първия случай БС и роувърът измерват координатите на началото и края на всяка страна от геодезичната мрежа в продължение на часове, във втория – в продължение на десетки минути, а при третия и четвъртия – в продължение на минути. Следва да се отбележи, че при подхода RTK поправките (4), изчислени от БС, се предават на роувъра (роувърите) чрез радио-модеми в реално време. Това позволява крайните резултати да се получават веднага след завършване на полевите работи.

От изложеното се вижда, че основният недостатък на подходите, основаващи се на пряко измерване на бавно флуктоиращите (стационарните) грешки, е високата цена, тъй като са необходими няколко геодезични ГНСС приемника, радио-модеми и друга комуникационна апаратура.

2) Подходи, основаващи се на изчисляване на бавно флуктоиращите (стационарните) грешки. При тези подходи станциите за следене на НС и на спътниците за диференциална корекция на ГНСС измерват редица параметри, които дават възможност да се определят много точно: реалните траектории на НС, конкретните стойности на плътността на слоевете на атмосферата, тяхната температура и т.н. На тази основа се изчисляват поправките (4) за даден регион от земната повърхност.

На свой ред системите, основаващи се на изчисляване на бавно флуктоиращите (стационарните) грешки, в зависимост от размерите на обслужвания регион от земната повърхност, се класифицират като: локални, регионални, широко зонални и/или глобални системи за диференциална корекция.

Най-същественият недостатък на подходите, основаващи се на изчисляване на бавно флуктоиращите (стационарните) грешки е, че информацията се предоставя на потребителите на абонаментен принцип.

Към подходите, основаващи се на изчисляване на бавно флуктоиращите (стационарните) грешки, се отнася и т. нар. подход на високоточните координатни определения (precise point positioning – PPP). Той може да се приложи в реално време или след заснемането (при постобработката). В реално време се постига точност под 10 [cm], но след 20 – 40 [min] работа. При постобработката се използват поправките, които се публикуват след 2 седмици на сайтовете на ГНСС. Осигуряваната точност е 5 – 6 [mm] по хоризонтала и 28 [mm] по вертикала.

3) Използване на теренни контролни точки (КТ). При този подход върху заснеманата територия се поставят специални добре забележими маркери (КТ), чиито координати се

измерват с геодезичен ГНСС приемник със сантиметрова точност ($10 [mm] + 1 ppm$ (parts per million, части на милион) по хоризонтала и $20 [mm] + 1 ppm$ по вертикала). След това специализираният софтуер за обработка на снимките, направени с БЛА, използва координатите на КТ за да изчисли поправките (4).

Реализацията на последния подход е по-евтина в сравнение с първата и втората групи подходи, и не изисква толкова много време, колкото подходът на високоточните координатни определения.

Методика за използване на БЛА от средния ценови клас за наблюдение и изследване състоянието на инфраструктурни обекти

Както е известно (Petrov, D., Mihaylov, P., 2014), (Bedzheva, M. 2020), специализираните БЛА от средния ценови клас дори без използване на анализирания в предходния раздел подходи дават възможност да се генерират триизмерни ЦММ с точност, достатъчна за извършването на геодезични работи, които се свеждат до наблюдение и изследване състоянието на инфраструктурни обекти. Оттук следва изводът, че за тях съотношението качество/цена има висока стойност, което ги прави предпочитани от голям брой специалисти. Ето защо по-нататък в доклада ще бъде обоснована Методика за използване на БЛА от средния ценови клас за наблюдение и изследване състоянието на инфраструктурни обекти.

Eman 1) Начална оценка на локацията и размерите на инфраструктурния обект, който трябва да бъде изследван.

Локацията на инфраструктурния обект може съществено да затрудни неговото наблюдение с БЛА, ако сигналите на мобилните комуникационни мрежи са слаби. В тези случаи предварително трябва се зареди картата на района.

Размерите на инфраструктурния обект влияят върху енергетичните ресурси, които трябва да бъдат осигурени за реализиране на мисията. По-конкретно, ако площта на инфраструктурния обект е по-голяма от няколко десетки декара, тогава тя трябва да бъде разделена на няколко участъка, които последователно да бъдат облетени. Естествено, преди всяко ново излитане батериите на БЛА трябва да бъдат сменени. Това означава, че трябва да бъдат осигурени или няколко комплекта батерии и/или специализирано зарядно устройство.

Eman 2) Начална оценка на техническите характеристики на ГНСС приемника и на авиониката на БЛА, който ще бъде използван при изследването на инфраструктурния обект.

На този етап следва да се оценят:

- точността на определяне на координатите на проекционните центрове на снимките;
- прецизността на позициониране на цифровата камера успоредно на земната повърхност.

Eman 3) Планиране на изследването на инфраструктурния обект и на технологията за обработка на снимките.

На този етап следва да се определят:

- необходимият брой КТ, тяхното оформяне и конфигурацията на разположението им върху инфраструктурния обект и заобикалящия го терен (тук следва да се използва фактът (Bedzheva, M., 2020), (Bedzheva, M., Ignatova, T., 2020), че ако всички снимки са направени за времеви интервал по-малък от интервала на корелация τ_{corr} на сумата $\sum \Delta\rho_s$ на бавно флуктоиращите случайни функции, тогава големите грешки ($\sum \Delta\rho_{i,const} + \sum \Delta\rho_{i,s}$) в (2) взаимно ще се компенсират);

- (максимално) възможното време на полета, предвид на наличните комплекти батерии и капацитет на специализираното зарядно устройство;

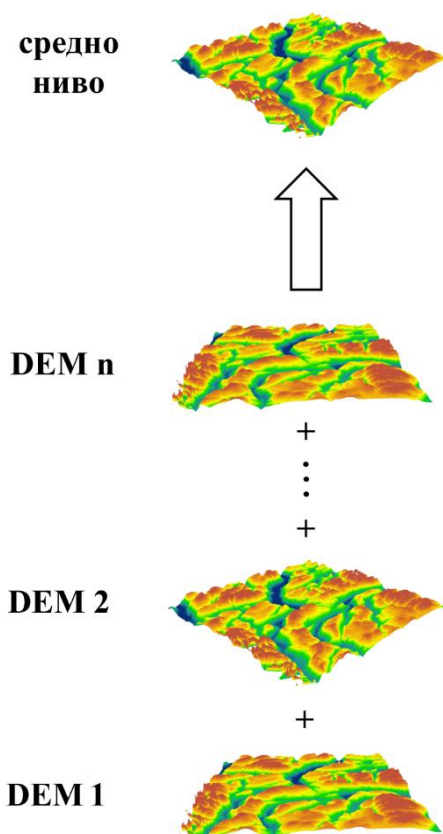
- коефициентът на застъпване на снимките, скоростта и височината на полета.

Eman 4) Проучване на място, маркиране и измерване с геодезичен ГНСС приемник на контролните точки, заснемане с БЛА и обработка на снимките със специализиран фотограметричен софтуер

На този етап се реализират практически планираните на предходния етап конфигурация от КТ и направление на маршрута, както и обработката на снимките.

Следва да се отбележи, че броят на облитанията на инфраструктурния обект зависи не само от неговите размери, коефициента на застъпване на снимките, скоростта и височината на полета, но и от възможността за поставяне на достатъчен брой теренни КТ. В случаите, когато трябва да се изследват трудно достъпни зони, може да се използва следният подход, при който се осредняват няколко статистически независими ЦММ (digital elevation model – DEM) и се компенсира невъзможността за поставяне на достатъчно количество КТ.

Подходът се пояснява на фиг. 1. Както се вижда, инфраструктурният обект е облетян n пъти по различни маршрути с една и съща конфигурация от КТ като времето между облитанията е по-голямо от интервала на корелация τ_{corr} на сумата $\sum \Delta\rho_s$ на бавно флуктоиращите случайни функции в (2).



Фиг. 1. Подход за повишаване точността на ЦММ (DEM) чрез статистическо осредняване

Въз основа на снимките, получени при всяко облитане, с помощта на специализиран фотограметричен софтуер, са получени n ЦММ (DEM): $DEM_1, DEM_2, \dots, DEM_n$. Нека СКГ в координатите на точките на тези модели е σ_{DEM} . В резултат на статистическо осредняване на тези ЦММ се получава ЦММ, за който СКГ в координатите на точките е

$$\sigma_{av} = \frac{\sigma_{DEM}}{\sqrt{n}}. \quad (5)$$

ИЗВОДИ

В доклада е направена систематизация на подходите за повишаване точността на определяне координатите на проекционните центрове на снимките от бордовите ГНСС приемници на БЛА и е разработена Методика за използване на БЛА от средния ценови клас за наблюдение и изследване състоянието на инфраструктурни обекти. На тази основа е

обоснован подход за повишаване точността на ЦММ (DEM), който е особено подходящ за изследвания на трудно достъпни зони.

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“.*)

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“.*)

Bedzheva, M., Ignatova, T., (2020) *A methodology for estimating the accuracy of primary photogrammetric information, obtained by UAVs*, Proc. of University of Ruse - 2020, vol. 59 (in press) (**Оригинално заглавие:** Беджева, М., Игнатова, Т., (2020) *Методика за оценка точността на първичната фотограметрична информация, получена от БЛА. Научни трудове на Русенския университет – 2020, том 59 (под печат).*)

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