

ПОЗИЦИОНИРАНЕ В РЕАЛНО ВРЕМЕ (RTK) ЗА БЕЗПИЛОТНИ ЛЕТАТЕЛНИ АПАРАТИ

Павлин Граматиков¹, Джулиан Тахов²

¹Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките

²Д АЕРОСПЕЙС ООД

e-mail: pgramatikov@space.bas.bg; juliantahov@gmail.com

Ключови думи: безпилотни летателни апарати, бордни системи, дрон за геодезия, дрон за картографиране, дрон с RTK, индустриален дрон, професионален дрон

Резюме: Изложени са резултати от полети на безпилотни летателни апарати, оборудвани с устройства за кинематика в реално време. Изчисленията са извършени с различни професионални платформи за обработка на изображения.

REAL-TIME KINEMATIC (RTK) POSITIONING FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES

Pavlin Gramatikov¹, Dzhulian Tahov²

¹Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences

²D AEROSPACE Ltd.

e-mail: pgramatikov@space.bas.bg; juliantahov@gmail.com

Keywords: unmanned aerial vehicles, onboard systems, surveying drone, mapping drone, RTK drone, industrial drone, professional drone

Abstract: The results of flights of unmanned aerial vehicles equipped with real-time kinematics devices are presented. The calculations were performed using various professional image processing platforms.

Въведение

Кинематиката в реално време RTK (Real Time Kinematic), е усъвършенствана форма на позициониране с помощта на глобална навигационна спътникова система (GNSS), която осигурява точност 1–2 cm, което значително надвишава точността от 2–5 m, типична за стандартния GPS/GNSS метод. RTK системата е съвкупност от методи и техники за получаване на координати и височини на точките на местността и полета на безпилотния летателен апарат (БЛА), с точност до cm чрез получаване на корекции от базова станция, приемани от бордната апаратура на БЛА. За тази цел се измерват фазите на носещия GPS сигнал L1 едновременно на два GPS радиоприемника. Координатите на базовия (референтен) радиоприемник трябва да бъдат точно определени (той може да бъде инсталиран в точка от държавната геодезична мрежа). Той предава набор от корекции по радиомодем до БЛА. Вторият радиоприемник използва данните за корекциите, за да определи точно местоположението си на разстояния от порядъка на 10–30 km от първия приемник. Поправките могат да се предават във формат RTCM SC-104. Скоростта на предаване е 2400 bit/s, а закъснението на предаването е 0,5–2 s.

RTK измерването е геодезичен метод за измерване или маркиране на точки с помощта на GNSS, като GPS, GLONASS, GALILEO и др. Използват се сигнали от най-малко пет GPS-сателита (препоръчителни са най-малко шест сателита). Необходими са най-малко две GPS-антени. Първата се намира на референтната станция, а втората се монтира на БЛА. Позицията на БЛА се определя чрез триизмерно полюсно прикачване към референтната станция. Вместо временни референтни станции може да се ползват и постоянни референтни

станции, които се предоставят от частен оператор или от геодезични служби (SAPOS, ASCOS). За да не се създават прекалено много референтни станции, се използва мрежова RTK. Тук няколко референтни станции се свързват в мрежа и корекционните данни се предават на ровъра чрез мобилен телефон (SAPOS мрежа). Максималното разстояние на ровъра от референтната станция при временни референтни станции при благоприятни условия е до 10 km. При постоянни референтни станции RTK е възможно над 20 km. При мрежови RTK референтните станции са на разстояние 50–100 km една от друга. За мрежовия RTK теоретично могат да се приложат два метода. При първия метод на потребителя се предават само параметри за корекция на площта, а при втория метод БЛА изпраща приблизителните си координати чрез мобилен телефон в мрежовия център, където се изчислява оптимална триъгълна мрежа и след това се предават корекционни данни за тази приблизителна позиция обратно на ровъра (принцип на виртуалната референтна станция). На практика се използва само вторият метод. С развитието на технологията на RTK и прецизните инерционни измервателни устройства (IMU), БЛА оборудвани с RTK могат да постигнат висока точност на фотографиране, без да са необходими наземни контролни точки (GCP), което може значително да намали времето и разходите за работа на терен и подобрява ефективността и качеството на геодезията и картографирането.

По-голямата част от търговските и поръчкови БЛА имат един или два GNSS приемници на борда за определяне на позицията и безопасно навигиране на БЛА. За малките БЛА се използват компактни и леки бордни GNSS модули. Приемниците от геодезически клас не са подходящи за БЛА поради теглото и размерите на антената. БЛА трябва да получава в реално време както сателитни сигнали, така и RTK корекции от станцията. Тези корекции позволяват разграничаване на наблюдаемата фаза в реално време, като по този начин се оценяват базовите линии (3D вектори), свързващи двата приемника и се избягва по-голяма част от източници на грешки, които обикновено влияят на GNSS сигналите. През последното десетилетие се предлагат евтини GNSS модули, главно базирани на платки Ublox. Евтините GNSS модули получават само носещия сигнал L1.

Разликата между сигналите L1 и L2 в GPS се състои в тяхното предназначение и характеристики. Основен диапазон е L1 1575,42 MHz и се използва за граждански, военни, авиационни и космически нужди. Честотата на L2 е 1227,60 MHz и е допълнителен диапазон, използван за по-точно определяне на координатите. Благодарение на по-ниската честота, сигналът L2 по-добре заобикаля препятствия и е по-малко зависим от метеорологичните условия. За общо позициониране се използва L1, а L2 за по-точно определяне на координатите в сложни условия, когато сигналите срещат препятствия като облаци, дървета и сгради.

Към 18 септември 2012 г. грешките в навигационните определения на ГЛОНАСС по дължина и ширина са 3–6 m. В същото време грешките на GPS са 2–4 m. При едновременно използване на двете навигационни системи се получава значително повишаване на точността. Европейският проект EGNOS, [8] който използва сигналите и на двете системи, дава точност на определяне на координатите на територията на Европа на ниво 1,5–3 m.

В [6] са сравнени три фотограметрични софтуера на БЛА за 3D моделиране на гори: AgiSoft Photoscan; PIX4DMapper и DJI Terra. Резултатите показват, че Pix4D и AgiSoft генерират по-плътни облаци от точки от DJI Terra. Въпреки това, DJI Terra предоставя по-добър облак от дървета от другите два софтуера, поради използването на подобрен алгоритъм за съвпадение.

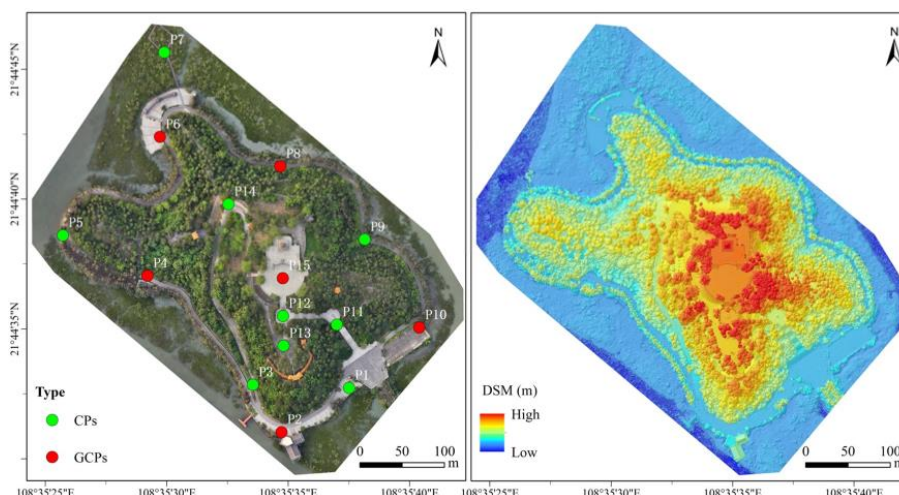
Използване на мултикоптери за картографиране

За синтетичен анализ на абсолютната и относителната точност на позициониране с RTK са избрани: квадрокоптер Mavic 3 (Фиг. 2); борден DJI Mavic 3 Enterprise RTK-Modul (Фиг. 3) и разновидност на оборудването M3M. Използват се две професионални платформи DJI Terra и Pix4Dmapper за обработка на изображения на БЛА [4].

На Фиг. 1 са дадени: местоположенията на 15-те точки на измерване от които 6 са тип GCP, а 9 са от вид CP; цифровата ортофото карта (DOM) и цифровият модел на повърхността (DSM). В Таблица 2 са дадени стойностите на средноквадратичната грешка (RMSE), [4]. При условие на използване на GCP, резултатите от обработката, базирани на Pix4Dmapper отговарят на изискванията за точност на картографиране при въздушни карти с мащаб 1:500. За разлика от тях, резултатите, базирани на DJI Terra, отговарят на изискванията в хоризонтална посока и леко надвишават изискването за точност на картографиране от 0,15 m във вертикална посока.

При сравняване на Таблица 1 с Таблица 2, стойностите на RMSE в хоризонталната (XY) и вертикалната (Z) посока на изображенията, получени от двете платформи с GCP, са малко по-високи от тези без GCP. В резултат на това не се повишава значително абсолютната точност на позициониране на БЛА Mavic 3 в режим RTK с GCP [4].

Проверени са абсолютната и относителната точност на позициониране на оборудвани с RTK индустриален БЛА Mavic 3 при условия със и без GCP. Основните изводи са следните [4]:



Фиг. 1. DOM (a) и DSM (b) от DJI Terra без GCP [4]

(А) При подходящи условия оборудваните с RTK БЛА Mavic 3 Enterprise Series не изискват GCP, за да отговарят на изискванията за хоризонтална и вертикална точност в мащабна карта 1:500. В това проучване RMSE в хоризонтална посока не надвишава 0,05 m, а RMSE във вертикална посока не надвишава 0,15 m. Този модел може да се използва директно за проучване и картографиране на райони, където е трудно да се създадат GCP, като морски острови, ледникови форми на релефа и опасни региони. По време на фотограметрията се отчитат влиянието на височината на полета, състоянието на сигнала, периода на снимане, припокриването на изображението, характеристиката на терена, скоростта на вятъра.

(Б) Добавянето на GCP в RTK режим не може значително да подобри точността на картографиране на Mavic 3 EnterpriseSeries. Този експеримент установява, че стойностите на RMSE на изображенията в хоризонтална и вертикална посока с GCP са малко по-големи от резултатите без GCP. При проучвания, базирани на БЛА DJI Phantom 4 RTK е установено, че добавянето на GCP може да подобри точността на фотограметрията. Разликите в заключенията се обясняват с различните характеристики на БЛА, условията на полет при фотографирането, характеристиките на терена на изследваната зона и грешките при обработката на закрито.

(В) При условие, че няма GCP, относителната точност на позициониране на индустриалния БЛА Mavic 3 е много висока, с малки грешки в хоризонталните и вертикалните разстояния. Стойностите на RMSE на хоризонталното и вертикалното разстояние на изображенията без GCP са съответно 0,042 m и 0,109 m (DJI Terra) и 0,032 m и 0,068 m (Pix4Dmapper). Серията Mavic 3 Enterprise може да се използва при: измерване на разстояние и промяна на надморската височина; безопасност на мините; мониторинг на деформация на язовири; потвърждаване на правата на селски имоти; строителство на пътни платна; промени в бреговата линия; мониторинг на растежа на културите; измерване на земетресения; измерване на височината на горите и т.н. Резултатите са получени при височина на полета 100 m, но при намаляването на височината ще има по-добро наблюдение на по-малки детайли.

(Г) Изображенията от DJI Terra и Pix4Dmapper отговарят на изискването за точност на картографиране 1:500. Pix4Dmapper е по-добър по точност в сравнение с DJI Terra [4].

Модулът DJI Mavic 3 Enterprise RTK (Фиг. 3) дава позициониране с точност до сантиметър при използване на службите Network RTK, Custom Network RTK или мобилната станция D-RTK 2. В комплекта на DJI Mavic 3 се предлагат: RGK SC100 полеви контролер; RGK SR1 - GNSS/GPS приемник и SingularPad - програмно обезпечение.

Техническите характеристики на бордния DJI Mavic 3 Enterprise RTK-Module са:

- Тип на съединение: USB-C;
- Номинална мощност: около 1,2 W;
- Точност на позициониране с RTK: RTK Fix: 1 cm + 1 ppm (по хоризонтала) и 1,5 cm + 1 ppm (по вертикала).

Системи и честоти:

- GPS: L1C/A L2C/L2P; GPS е контролирана от Министерството на отбраната на САЩ;
 - BDS: B1I B2I; Китайска система за сателитна навигация „Бейдоу“ (BDS);
 - GLO: G1 G2; GLONASS е притежаван и управляван от Русия;
 - GAL: E1 E5b; Galileo е притежаван и управляван от Европейския съюз;
 - QZSS: L1 L2; QZSS е притежаван от Япония и управляван от QZS System Service Inc.
- Размери: 50,2 x 40,2 x 66,2 mm и тегло: 24 ± 2 g
Скорости 16 KB/s / 32 KB/s

Техническите характеристики GNSS базов приемник RGK SR1 за DJI Mavic 3 са:

- | | |
|---------------|------------------------------------|
| • Брой канали | 1198 |
| • NAVSTAR GPS | L1 C/A, L1C, L1P, L2P, L2C, L5 |
| • GLONASS | L1OF, L2OF, L1OC, L2OC, L3OC |
| • BeiDou | B1I, B2I, B3I, B1C, B2a, B2b |
| • Galileo | E1, E5a, E5b, E6, E5 AltBoc, E6c |
| • QZSS | L1 C/A, L2C, L5, L1C, L1S, L5S, L6 |
| • NavIC | L5 |
| • SBAS | WAAS, EGNOS, SDCM, BDSBAS, GAGAN |



Фиг. 2. DJI Mavic 3 Enterprise



Фиг. 3. DJI Mavic 3 Enterprise RTK-Modul

Таблица 1. Статистика за грешките при картографиране с БЛА без GCP [m] [4]

Платформа	Статистика	$ \Delta X $	$ \Delta Y $	ΔXY	$ \Delta Z $
DJI Terra	Максимален	0.047	0.058	0.065	0.281
	Нисък	0.017	0.030	0.039	0.122
	Стандартно отклонение	0.013	0.016	0.017	0.075
	RMSE	0.021	0.035	0.041	0.143
Pix4Dmapper	Максимален	0.045	0.046	0.049	0.119
	Нисък	0.009	0.018	0.027	0.027
	Стандартно отклонение	0.012	0.013	0.014	0.032
	RMSE	0.017	0.025	0.030	0.048

Таблица 2. Статистика на стойностите на RMSE в въздушни изображения на БЛА с GCP [m] [4]

Платформа	Вид	X	Y	Хоризонтален (XY)	Вертикален (Z)
DJI Terra	GCPs	0.024	0.034	0.042	0.132
	CPs	0.035	0.034	0.049	0.158
Pix4Dmapper	GCPs	0.020	0.021	0.029	0.082
	CPs	0.025	0.025	0.035	0.074

Приложението на DJI Mavic 3 Enterprise (виж Фиг. 2) за комбиниране на данни от бордна камера и смартфон iPhone 15 Pro (който съдържа LiDAR и поддържа RTK) са описани в [5]. Позициите, получени от интегрираните данни на БЛА и iPhone 15 Pro, се сравняват с контролни точки, за да се определи количествено точността и надеждността на данните. Използват се техники за последваща обработка на кинематични данни (PPK) за валидиране на траекториите

на всички системи за събиране на данни, като се гарантира надеждността на получените данни, особено в случаите, когато може да липсват RTK корекции.

На Фиг. 4 е даден по-новият модел на DJI Matrice 300 RTK Combo [2, 3] използващ: мобилна станция D-RTK 2; акумулатори 2xTB60; зарядна станция BS60; D-RTK 2 и статив за D-RTK 2. Мобилната станция D-RTK 2 използва: NTRIP (Network Transport of RTCM via Internet Protocol); 4G модем или WiFi; бордно съхраняване на данните за Post Processed Kinematics (PPK). Камерата на DJI Matrice 300 има 1-инчов, 20 мегапикселов CMOS сензор и механичен затвор за избягване на размазване на изображението.



Фиг. 4. DJI Matrice 300 RTK, зарядна станция BS60, D-RTK 2 и статив за D-RTK 2



Фиг. 5. БЛА DJI Phantom 4 RTK SE и мобилна станция D-RTK 2

Остарелият БЛА модел Phantom 4 RTK (Фиг. 5) постига разделителна способност 2,74 cm при височина на полета от 100 m. Има две режима – Фотограметрия и Маршрутен полет. Приложението може да зарежда KML Area файлове директно за предварително планиране на полет. С вграденото приложение за планиране на полета (GS RTK) и лесния метод за събиране на RTK данни (RTK Network или D-RTK 2 мобилна станция) се правят проучвания, картографиране или инспектиране. RTK позициониране достига точност до cm. Мобилната станция поддържа комуникация чрез 4G, OcuSync, WiFi и LAN. До 5 дистанционни управления могат да бъдат едновременно свързани към D-RTK 2.



Фиг. 6. Модул H-RTK F9P и бордна апаратура [1]



Фиг. 7. Мобилна станция DJI D-RTK 3

Мобилната станция DJI D-RTK 3 (Фиг. 7) служи като базова станция за едновременно определяне на местоположението на няколко дрона с точност до cm или като ретрансляционна станция за увеличаване на обхвата на полета на БЛА.

Компанията Ublox (Швейцария) произвежда и продава новите приемници от клас F9P. Те са двучестотни и многосъзвездни GNSS приемници, които подобряват RTK производителността. Holybro (Хонконг) вгражда F9P в продукта си "H-RTK F9P" (<https://holybro.com/products/h-rtk-f9p-gnss-series> посетен на 11 септември 2024 г.). Тест-1 и Тест-2, [1] симулират условията на кръжане на БЛА, който влиза и излиза от тунел и работи близо до висока стена на сградата. Изследват се възможностите на RTK модули при полет на БЛА в критична среда (инспекция на инфраструктура и мостове, строителство и др.). Тест-3 [1] има за цел да провери позиционирането на БЛА, летящ в тунела и излизащ от него.

БЛА Azriel, описан в [7] извърши полети с полезен товар 5 kg на разстояние 10 km. На борда на Azriel е монтиран RTK модул **H-RTK mosaic-H (Dual Antenna Heading)**, Holybro SKU: 12051. Параметрите му са: GPS L1, L2; Galileo E1, E5b; GLONASS L1, L2; Beidou B1, B2, B3; QZSS L1C/A, L1C/B, L2; SBAS Egnos, WAAS, GAGAN, MSAS, SDCM (L1); RTK хоризонтална точност 0.6 cm + 0.5 ppm; RTK вертикална точност 1 cm + 1 ppm. За базова станция Azriel използва **H-RTK NEO-F9P w/ Base Station Antenna**, Holybro SKU:12065. В модула е интегриран GNSS приемник u-blox NEO-F9P, компас RM3100 и трицветен LED индикатор. GNSS лентите му са: GPS: L1C/A и L5; GLONASS: L1OF; Galileo: E1-B/C и E5a; BeiDou: B1I и B2a; QZSS: L1C/A, L1S и L5; SBAS: L1C/A; RTK хоризонтална точност 0.01 m +1 ppm; RTK вертикална точност 0.01 m +1 ppm.

Заклучение

RTK е мощен инструмент за повишаване на точността и ефективността на работата на БЛА. С негова помощ може значително да се подобри качеството на данните, получавани в различни области и да се оптимизират процесите, изискващи висока точност на позициониране.

Все повече индустриални потребители използват БЛА оборудвани с RTK с директна географска връзка при мисии за въздушно фотографиране.

Литература:

1. Tavasci, Luca, Francesco Nex, and Stefano Gandolfi. Reliability of real-time kinematic (RTK) positioning for low-cost drones' navigation across global navigation satellite System (GNSS) critical environments. *Sensors* (Basel, Switzerland) 24.18 (2024): 6096. ISSN: 1424-8220, pp. 1–16
<https://doi.org/10.3390/s24186096>
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11435761/pdf/sensors-24-06096.pdf>
2. Czyża, S., Szuniewicz, K., Kowalczyk, K., Dumalski, A., Ogrodniczak, M., & Zieleniewicz, Ł. (2023). Assessment of accuracy in unmanned aerial vehicle (uav) pose estimation with the real-time kinematic (rtk) method on the example of dji matrice 300 rtk. *Sensors*, 23(4), 2092. ISSN: 1424-8220, pp. 1–29
<https://doi.org/10.3390/s23042092>
<https://pdf.sciencedirectassets.com/270704/1-s2.0-S1110016821X00051>
3. Yildiz, Veysel, and Aydan Yaman. Comparison and accuracy assessment of unmanned aerial vehicle and terrestrial measurement in base map production. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 28.1 (2025): ISSN: 2090-2476, pp. 53–62
<https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2024.12.003>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110982324000875/pdf?md5=28efa9a157fdd7493c183f66a71aec67&pid=1-s2.0-S1110982324000875-main.pdf>
4. Tan, C., Chen, Z., Liao, A., & Zeng, X. (2024, July). Accuracy assessment of Mavic 3 industrial UAV based on DJI Terra and Pix4Dmapper. In *Fifth International Conference on Geology, Mapping, and Remote Sensing (ICGMRS 2024)* (Vol. 13223, pp. 498-504). SPIE
<https://doi.org/10.1117/12.3035344>
https://www.researchgate.net/profile/Chenyan-Tan/publication/382157170_Accuracy_assessment_of_Mavic_3_industrial_UAV_based_on_DJI_Terra_and_Pix4Dmapper/links/674bde11359dcb4d9d47192a/Accuracy-assessment-of-Mavic-3-industrial-UAV-based-on-DJI-Terra-and-Pix4Dmapper.pdf
5. Tamimi, Rami, and Charles Toth. Experiments with combining LiDAR and camera data acquired by UAS and smartphone to support mapping. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 48 (2024): ISSN: 2194-9050, pp. 619–627
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-2024-619-2024>
<https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLVIII-1-2024/619/2024/isprs-archives-XLVIII-1-2024-619-2024.pdf>
6. Jarahizadeh, Sina, and Bahram Salehi. A comparative analysis of UAV photogrammetric software performance for forest 3D modeling: A case study using AgiSoft photscan, PIX4DMapper, and DJI Terra. *Sensors* 24.1 (2024): 286. ISSN: 1424-8220, pp. 1–15
<https://doi.org/10.3390/s24010286>
<https://www.mdpi.com/1424-8220/24/1/286/pdf?version=1704850225>
7. Павлин Граматиков, Джулиан Тахов. Проучване на земните недра с безпилотни летателни апарати. *Proceedings SES'2024, Space Research and Technology Institute Bulgarian Academy of Sciences, 2024*, ISSN:p-ISSN 2603 – 3, e-ISSN 2603 – 3321, pp. 122–127
http://www.space.bas.bg/SES/archive/SES%202024_DOKLADI/2_Aerospace%20Technologies/6_Gramatikov.pdf
8. Калагирева Карина, Павлин Граматиков. Европейската SBAS: алтернативата за инструментална система за кацане. Международна научна конференция по "Авиационна, автомобилна и железопътна техника и технологии", Транспортен факултет, БулТранс 2014, 17–19 септември, гр. Созопол, 2014 г., 2014, ISSN: 1313-955X, pp. 49–54
<https://bultrans.org/files/proceedings/bultrans-2014.pdf>