

СИСТЕМА НАВІГАЦІЇ ТА КЕРУВАННЯ ПОЛЬОТОМ БПЛА НА БАЗІ СПЕКТРАЛЬНИХ ПОРТРЕТІВ МІСЦЕВОСТІ

Ф. В. Глуган, аспірант

В. П. Лисенко, доктор технічних наук, професор

С. А. Шворов, доктор технічних наук, професор

Н. А. Пасічник, кандидат сільськогосподарських наук, доцент

О. О. Опришко, кандидат технічних наук, доцент

І.Т. Цигульов, кандидат технічних наук, доцент

В. М. Теплюк, старший викладач

А. А. Руденський, старший викладач

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: sosdok@nubip.edu.ua

Анотація. Дослідження, на яке спрямована робота, присвячено автоматизації навігації безпілотних літальних апаратів (БПЛА) шляхом використання просторово-спектральних портретів місцевості. Цей вид навігації є важливим для військових потреб, оскільки він забезпечує більшу захищеність від засобів радіоелектронної боротьби, але для його впровадження потрібно вирішити декілька методологічних питань, зокрема, врахувати вплив змін освітлення на спектральні характеристики об'єктів. Застосування супутникових рішень на основі оптичних шаблонів не є прийнятним для низько літаючих БПЛА, тому більш перспективним є використання службових даних, отриманих від експонетра спектрального сенсорного обладнання БПЛА. У дослідженні розглянуто наявну методику корекції змін освітлення, засновану на значенні *Light Value*, для різних фотоапаратів у лабораторних та польових умовах. Експериментально було встановлено, що залежності між *Light Value* та інтенсивностями складових кольорів у різних фотоапаратах мають індивідуальний характер. Для корекції змін природного освітлення пропонується використовувати експериментально отримані залежності, специфічні для конкретних марок сенсорного обладнання. При організації системи навігації за допомогою спектральних портретів місцевості рекомендовано використовувати об'єкти з найстабільнішими оптичними характеристиками, що не піддаються значним змінам освітлення.

Ключові слова: *БПЛА, спектральні портрети, корекція освітлення*

Актуальність. Поява доступних широкому колу людей роботизованих безпілотних літальних апаратів створює нові виклики в контексті безконтактних

бойових дій. Вартість продуктивних коптерних БПЛА, які можуть пролетіти кілька кілометрів до місця атаки, значно менша (на 3-4 порядки) порівняно з пілотованими військовими апаратами. Це дає змогу кільком особам ефективно атакувати об'єкт зграєю БПЛА. Однак існуючі рішення щодо керування польотом БПЛА оператором через радіоканал можуть бути легко перешкоджені засобами радіоелектронної боротьби шляхом впровадження електромагнітних перешкод у керуючий канал. Використання систем супутникового позиціонування, таких як GPS або ГЛОНАСС, є більш захищеним для навігації БПЛА, але можуть виникати проблеми з точністю позиціонування при атаках на малих об'єктах. Крім того, при розробці систем супутникової навігації розглядається можливість введення похибок для цивільних діапазонів у разі бойових дій. За допомогою засобів радіоелектронної боротьби також може здійснюватися спотворення сигналів системи супутникової навігації - GPS spoofing. Оскільки такі технології доступні для нейтралізації, проводяться дослідження з протидії, зокрема, розробки стратегій протидії в роботах Jie Su та ін. (2016) [1] та A. Petrillo та ін. (2018) [2], фіксації початку кібератак в роботі Á. Guerrero-Higuera та ін. (2018) [3] тощо. Однак, в умовах військових дій велика ймовірність того, що потужність і цілеспрямованість засобів радіоелектронної боротьби противника призведе до відхилень у розмірі кількох десятків або навіть сотень метрів, що зменшує переваги БПЛА перед пілотованими апаратами.

Одним із можливих рішень для захисту від радіоелектронної боротьби противника є використання навігації на основі просторово-спектральних портретів місцевості, коли безпілотний літальний апарат (БПЛА) орієнтується за попередньо завантаженими бібліотеками орієнтирів на місцевості. У разі використання обмеженої кількості орієнтирів, їх можна підробити або знищити. Однак, при використанні великої кількості об'єктів, враховуючи не тільки їх геометрію, але й спектральний портрет, підробка стає значно складнішою. Тому просторово-спектральна навігація є одним з пріоритетних напрямків розвитку систем управління БПЛА для військових потреб. При використанні поширених і доступних спектральних сенсорів оптичного діапазону необхідно враховувати вплив освітлення на спектральні показники об'єктів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У традиційному вимірюванні спектральних показників об'єктів при змінному освітленні зазвичай використовується штучне освітлення. Наприклад, у роботі [4] D.W.Lamb та інші (2011) був описаний успішний експеримент з використання активного спектрального сенсора Raptor ACS-225LR, який був встановлений на легкомоторний літак і освітлював наземні об'єкти за допомогою потужних світлодіодів. Однак, враховуючи обмежену енергоозброєність та вантажопідйомність загальнопризначених та широко поширених безпілотних літальних апаратів, використання додаткових джерел освітлення на них наразі є малоперспективним.

Починаючи з 70-х років, була розроблена орієнтація на виключно сонячне освітлення для супутникових платформ спектрального моніторингу. Наприклад, у роботі Lawrence S. Bernstein та інші (2005) [5] був запропонований метод радіочастотної корекції, який використовує наземні об'єкти з відомими і стабільними параметрами, такими як глибокі водоймища, як опорні еталони. У роботі K. Soudani та інші (2012) [6] було показано створення мережі наземних станцій для вимірювань, що дозволяє калібрувати супутникові дані для спектрального моніторингу. Аналогічні рішення щодо використання оптичних шаблонів були запропоновані для безпілотних літальних апаратів. Наприклад, у роботі Haitao Xiang та інші (2011) [7] було показано високу точність вимірювань та відтворюваність результатів при використанні трьох штучних шаблонів. В дослідженнях Mónica Herrero-Huerta та ін. (2014) [8] для досягнення високої точності використовували шість різнокольорових шаблонів, зроблених з брезенту, розміри яких становили кілька метрів, щоб забезпечити достатню точність вимірювань з повітряних платформ, наприклад, дельтаплану. Незважаючи на гарну точність та відтворюваність результатів, наявність достатньої кількості природних або штучних спектральних шаблонів в реальних умовах викликає сумніви.

Для вирішення проблеми зміни освітлення для БПЛА можна розглянути використання додаткового зенітного сенсора, такого як Light Sensor, як це було запропоновано T.Duan та іншими (2017) у роботі [9] і Jyun-Ping Jhan та інші (2018) у [10], для комплексу камери MicaSense RedEdge. Апаратна фіксація освітлення не

потребує використання наземних шаблонів, але збільшить вартість БПЛА. Крім того, цей підхід буде ефективним лише в умовах рівномірного освітлення, і можуть виникати значні похибки при наявності хмар. Як альтернатива спеціалізованому сенсору, можна використовувати вбудований експонетр основного сенсорного обладнання для калібрування даних, як запропоновано М. М. Saberioona та інші (2014) у [11]. Методика використання штатного експонетру цифрової фотокамери була розвинена І. Korobiichuk та інші (2018) у [12] для камери Canon A460 щодо параметрів "балансу білого" для зйомки в польових умовах. Математичні рівняння для врахування змін освітлення були представлені V. Lysenko та інші (2017) [13], де обчислення інтенсивності кольорових компонентів базується на значенні Light Value для штатної фотокамери БПЛА DJI Phantom 3 PHANTOM VISION FC200. Авторами було встановлено експериментально, що в певному діапазоні залежність інтенсивності кольорових компонентів від значення Light Value є лінійною, але неясно, чи залишається така залежність для інших моделей камер. Таким чином, врахування змін освітлення у польових умовах на основі даних, отриманих від штатного експонетра цифрової фотокамери, є можливим, але потребує перевірки та адаптації до інших моделей сенсорного обладнання.

Мета дослідження – розробка методологічного підходу до корекції врахування освітлення для визначення спектральних портретів об'єктів в оптичному діапазоні.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження були проведені як в контрольованих лабораторних умовах, так і на дослідному польовому стаціонарі. У лабораторних умовах, крім спеціально розроблених цифрових фотоапаратів для БПЛА (FC200), також були використані смартфони, зокрема Apple iPhone 5s та Lenovo s660. Вибір смартфонів для досліджень пояснюється наявністю раніше проведених досліджень, зокрема робіт Fangning He та інших (2016) [14] та Milton C.P.Santos та інших (2017) [15], де була продемонстрована можливість використання такого обладнання як модуля керування при збірці БПЛА навіть в побутових умовах.

Дослідження проводилися шляхом аналізу взаємозв'язку між інтенсивністю складових кольорів та значенням Light Value. Для цього використовувався шаблон

сірого кольору з насиченістю 69 %, який був надрукований на офісному папері білого кольору. Також дослідження включали аналіз зразків пшениці, які були розташовані на цьому шаблоні (рис. 1).



Рис.1 Зразок оптичного шаблону із зразком пшениці

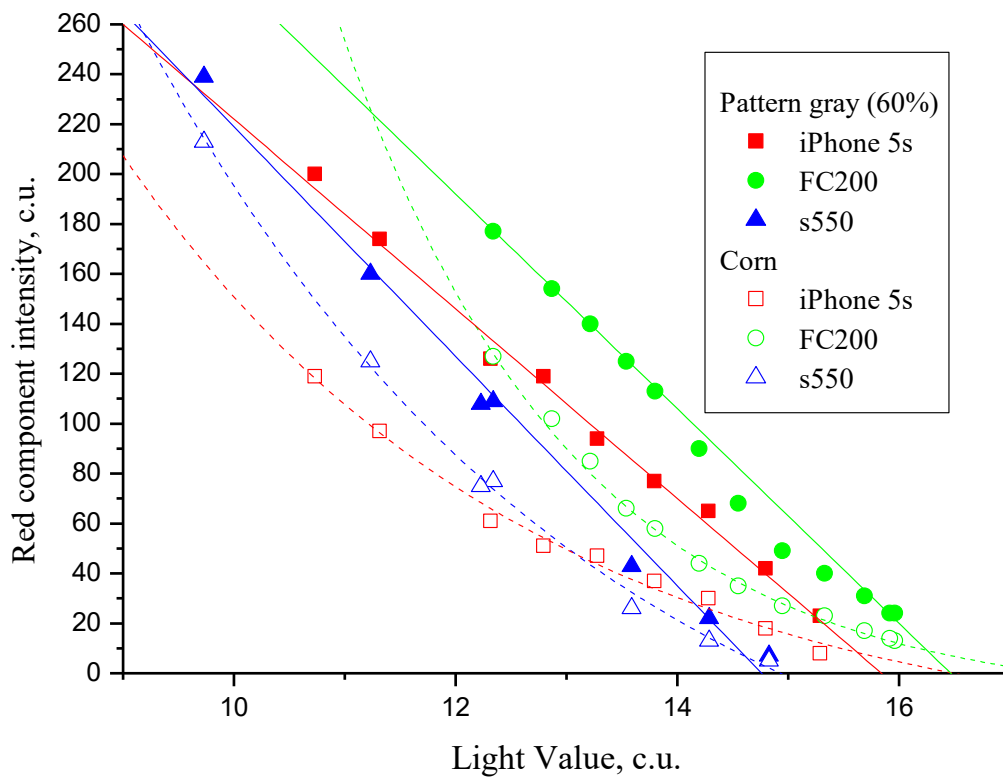


Рис. 2 Залежність інтенсивності червоної складової кольору від величини Light Value для різних моделей цифрових фотоапаратів

Фотоапарат був налаштований з використанням параметра "баланс білого" для ясної погоди. Зміни величини Light Value були досягнуті шляхом корекції експозиції в діапазоні від $ev = -2.0$ до 2.0 . Обробку отриманих результатів проводили за допомогою програмного середовища, яке було представлено в роботі V.Lysenko та інші (2016) [16]. Графічне відображення отриманих результатів наведено на рисунку 2.

Під час обробки експериментальних даних було виявлено, що характер залежності відрізняється для різних фотоапаратів. У випадку зі зразком сірого кольору, лінійна залежність між величиною Light Value та інтенсивністю складових кольору мала коефіцієнт детермінації (R^2) 0.957, 0.931 та 0.989 для фотоапаратів iPhone 5s, FC200 та s660 відповідно, тоді як експоненціальна залежність мала значення 0.989, 0.996 та 0.996 відповідно. Аналогічно, для зразків кукурудзи при лінійній залежності значення R^2 складали 0.993, 0.989 та 0.989 для вище згаданих фотоапаратів, а для експоненціальної залежності - 0.992, 0.991 та 0.986 відповідно.

Виходячи з отриманих даних, можна зробити висновок, що характер залежності в певній мірі залежить від об'єкта, який підлягає моніторингу. Для штучного шаблону цей характер краще описується нелінійною залежністю, але такі рівняння є складнішими у порівнянні з лінійними та потребують складнішої калібрування при змінному освітленні, як описано в методиці V. Lysenko та ін. (2017) [13]. Було встановлено, що характер залежності, описаний вище, є унікальним для кожної моделі камери, що потрібно враховувати при їх використанні для просторово-спектральної навігації. Також було припущено, що більш точну корекцію змін освітлення для практичних потреб можна здійснити, отримавши експериментальну залежність для об'єктів у реальних польових умовах.

Експериментальні дослідження виконувалися у польових умовах на спеціальній дослідній станції, що належить кафедрі агрохімії та якості продукції рослинництва. Під час досліджень були враховані різні об'єкти, зокрема пшеничне поле з ділянками, що мали відмінний стан мінерального живлення, а також ґрунтова дорога (див. рис. 3). Перед початком дослідів протягом трьох днів не було опадів на ділянці, і дорога знаходилась у повітряно-сухому стані.



Рис. 3 Дослідний стаціонар кафедри агрохімії та якості продукції рослинництва НУБіП 17.05.23, висота польоту БПЛА 100 метрів

Досліди були проведені 17 травня 2023 року з 15:00 до 21:00 години і охопили діапазон освітлення від 41500 до 500 люкс. При проведенні вимірів люксметр був розміщений на горизонтальній поверхні без будь-яких випадкових тіней, не пов'язаних з хмарами. У випадку наявності хмар під час зйомки, візуально оцінювалась рівномірність освітлення всіх об'єктів у кадрі, і нерівномірне освітлення не було допущено. В якості об'єктів досліджень була обрана ґрунтова дорога (дорога) та дві ділянки з озимою пшеницею в стадії вегетації колосіння (0 - фонові ділянки, 1 - ділянки, на яку штучно внесена нормована доза мінеральних добрив).

Результати досліджень та їх обговорення. Отримані результати по залежності інтенсивності складових кольору об'єктів від величини Light Value представлені на рис.4.

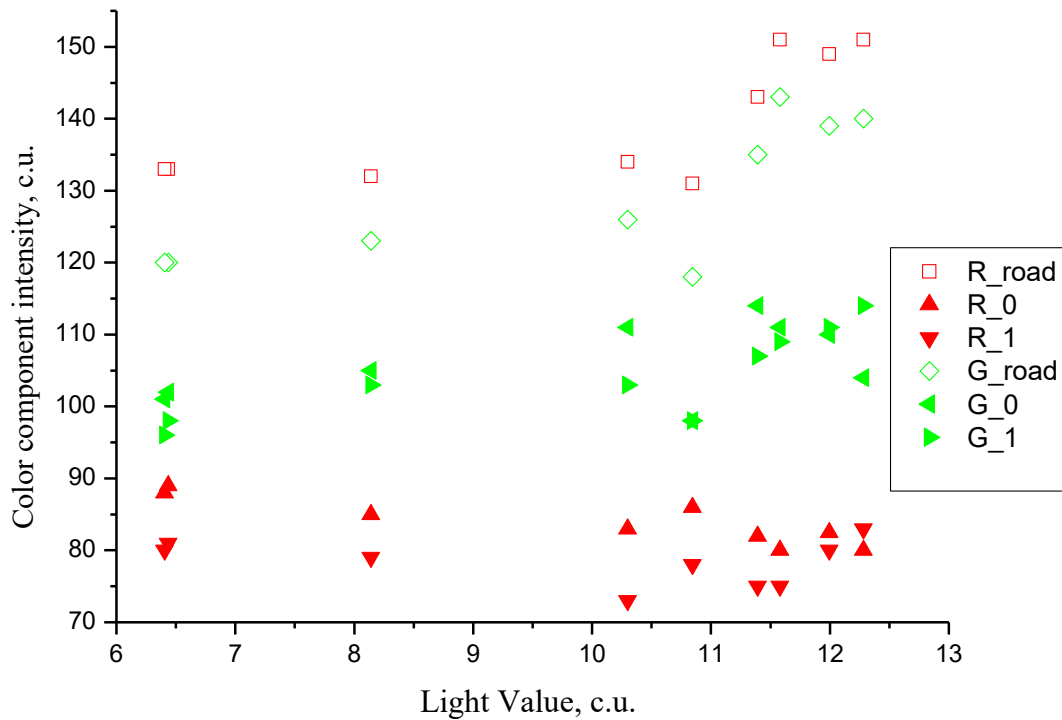


Рис. 4 Залежність червоної та зеленої складових кольору ґрунтової дороги та ділянок посівів пшениці озимої від величини Light Value:
road – ґрунтова дорога, 0 – без штучного внесення добрив, 1 – нормована доза.

Експериментальні результати вказують на те, що на початковій стадії колосіння при хмарності або вечірньому освітленні (Light Value в діапазоні 6-11), без корекції експозиції ($ev=0$), спостерігається найвища залежність інтенсивності складових кольору від рівня мінерального живлення (вмісту азоту) в рослин.

При використанні методу калібрування з використанням додаткового зенітного сенсора, який було включено до складу люксметра, також спостерігається нелінійна залежності. Зокрема, виявлено, що різниця у рівні мінерального живлення має найбільший вплив на інтенсивність складових кольору в діапазоні освітленості між 1000 та 20000 люкс (див. рис. 5).

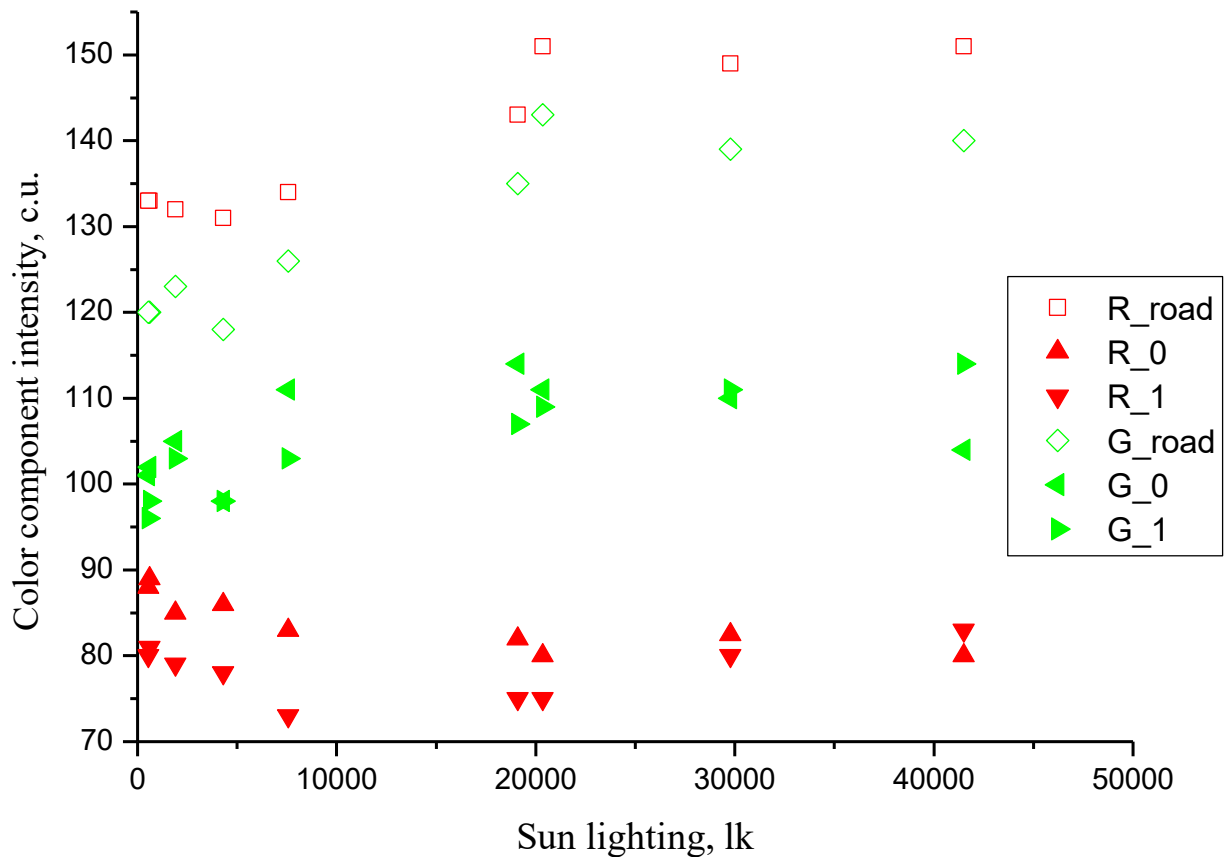


Рис. 5 Залежність інтенсивності складових кольору об'єктів від величини сонячного освітлення

Встановлено, що для розглянутих об'єктів найменший вплив освітлення було зафіксовано для ділянки пшеничного поля без штучного внесення добрив, а максимальний для ґрунтової дороги. Таким чином при побудові системи навігації на базі просторово-спектральних портретів можливо орієнтуватися на об'єкти із стабільними характеристиками.

Апробація роботи. Робота доповідалась на міжнародній науковій конференції 2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC) (S. A. Shvorov, D. S. Komarchuk, N. A. Pasichnyk, O. A. Opryshko, Y. A. Gunchenko and S. D. Kuznichenko, "UAV Navigation and Management System Based on the Spectral Portrait of Terrain," 2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), Kiev, Ukraine, 2018, pp. 68-71, doi: 10.1109/MSNMC.2018.8576304.). Висловлюємо щиру

вдячність Дмитру Комарчуку, Юрію Гунченко та Сергію Кузніченко за допомогу щодо організації проведення досліджень.

Висновки і перспективи.

1. Проведені експерименти підтвердили, що калібрування спектральних даних залежно від зміни освітлення можливо здійснювати для різних моделей фотоапаратів на основі службових даних, що надаються фотоапаратом.

2. Залежність інтенсивності складових кольору від величини Light Value має індивідуальний характер для різних фотоапаратів та об'єктів моніторингу.

3. Для практичних потреб просторово-спектральної навігації рекомендується корегувати зміни освітлення на основі експериментально отриманих залежностей для конкретної моделі сенсорного обладнання.

4. При організації системи навігації БПЛА на основі просторово-спектральних портретів рекомендується використовувати об'єкти орієнтації з найстабільнішими спектральними показниками.

References

1. Jie Su, Jianping He, Peng Cheng, Jiming Chen (2016). A Stealthy GPS Spoofing Strategy for Manipulating the Trajectory of an Unmanned Aerial Vehicle. IFAC-Papers On Line, 49 (22), 291-296.

2. Alberto Petrillo, Antonio Pescapé, Stefania Santini (2018). A collaborative approach for improving the security of vehicular scenarios: The case of platooning. Computer Communications, 122, 59-75.

3. Ángel Manuel Guerrero-Higueras, Noemí DeCastro-García, Vicente Matellán (2018). Detection of Cyber-attacks to indoor real time localization systems for autonomous robots. Robotics and Autonomous Systems, 99, 75-83.

4. Ángel Manuel Guerrero-Higueras, Noemí DeCastro-García, Vicente Matellán (2011). Extended-altitude, aerial mapping of crop NDVI using an active optical sensor: A case study using a Raptor™ sensor over wheat. Computers and Electronics in Agriculture, 77, 69-73.

5. Bernstein, L.S., Adler-Golden, S.M., Sundberg, R.L., Levine, R.Y., Perkins, T.C., Berk, A., et al. (2005). Validation of the QUick Atmospheric Correction (QUAC) Algorithm for VNIR-SWIR Multi- and Hyperspectral Imagery. Proceedings of SPIE, 5806, 668-678.

6. K. Soudani, G. Hmimina, N. Delpierre, J.-Y. Pontailler, M. Aubinet, D. Bonal, B. Caquet, A. de Grandcourt, B. Burban, C. Flechard, D. Guyon, A. Granier, P. Gross, B. Heinesh, B. Longdoz, D. Loustau, C. Moureaux, J.-M. Ourcival, S. Rambal, L. Saint André, E. Dufrêne, et al (2012). Ground-based Network of NDVI measurements for

tracking temporal dynamics of canopy structure and vegetation phenology in different biomes. *Remote Sensing of Environment*, 123, 234-245.

7. Haitao Xiang, Lei Tian (2011). An automated stand-alone in-field remote sensing system (SIRSS) for in-season crop monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture*, 78 (1), 1-8.

8. Mónica Herrero-Huerta, David Hernández-López, Pablo Rodriguez-Gonzalvez, Diego González-Aguilera, José González-Piqueras (2014). Vicarious radiometric calibration of a multispectral sensor from an aerial trike applied to precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 108, 28-38.

9. T. Duan, S. C. Chapman, Y. Guo, B. Zheng (2017). Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle. *Field Crops Research*, 210, 71-80.

10. Jyun-Ping Jhan, Jiann-Yeou Rau (2018). Robust and adaptive band-to-band image transform of UAS miniature multi-lens multispectral camera. Norbert Haala. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 137, 47–60.

11. M. M.Saberioona, M.S.M. Amina, A.R. Anuarb, A. Gholizadehc, A. Wayayokd, S. Khairunniza-Bejoda Smart (2014), Assessment of rice leaf chlorophyll content using visible bands at different growth stages at both the leaf and canopy scale. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 32, 35–45.

12. I. Korobiichuk, V. Lysenko, O. Opryshko. D. Komarchyk, N. Pasichnyk, A. Juś (2018). Crop Monitoring for Nitrogen Nutrition Level by Digital Camera. *Automation 2018, AISC*, 743. 595-603 (https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-77179-3_56).

13. Vitalii Lysenko, Oleksiy Opryshko, Dmytro Komarchuk, Nadiia Pasichnyk, Nataliia Zaets, Alla Dudnyk (2017). Usage of Flying Robots for Monitoring Nitrogen in Wheat Crops. *The 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications* 21-23 September, 2017, Bucharest, Romania, 1, 30-34.

14. Fangning He, Ayman Habib (2016). Automated Relative Orientation of UAV-Based Imagery in the Presence of Prior Information for the Flight Trajectory. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 82 (11), 879-891.

15. Milton C.P. Santos, Lucas V .Santana, Alexandre S. Brandão, Mário Sarcinelli-Filho, Ricardo Carelli (2017). Indoor low-cost localization system for controlling aerial robots. *Control Engineering Practice*, 61, 93-111.

16. V. Lysenko, O. Opryshko, D. Komarchyk, N. Pasichnyk (2016). Drones camera calibration for the leaf research. *Scientific Journal NUBiP*, 252, 61-65.

UAV NAVIGATION AND MANAGEMENT SYSTEM BASED ON THE SPECTRAL PORTRAIT OF TERRAIN

F.Glugan, V.Lysenko, S.Shvorov, N.Pasichnyk, O.Opryshko, I.Tsygulyov, V.Tepliyuk, A. Rudenskyi

Abstract. *This paper focuses on investigating the navigation of unmanned aerial vehicles (UAVs) using spatial-spectral representations of the terrain. This type of navigation is valuable in situations where GPS receivers and other navigation devices fail, but its implementation requires resolving several methodological challenges. One crucial*

aspect to consider is the impact of changes in illumination on the spectral characteristics of objects. The adoption of satellite-based solutions relying on optical patterns is not suitable for low-flying UAVs, and instead, utilizing service data from the spectral sensors on the UAV's meter display holds greater promise. This study examines an existing method that addresses illumination changes by utilizing the LightValue parameter for different cameras, both in laboratory and field conditions. Through experimentation, it has been established that the relationship between LightValue and the intensities of color components varies individually across different cameras. To correct for natural light variations, it is proposed to employ experimentally derived relationships specific to the sensory equipment brands. When designing navigation systems based on spectral representations of the terrain, it is advisable to select objects that exhibit the most consistent optical changes with respect to illumination.

Key words: UAV, spectral portraits, correction of illumination