

В.М. ГЛОТОВ¹, А.В. ГУНІНА¹, В.Б. КОЛЕСНІЧЕНКО², О.В. ПРОХОРЧУК², М.І. ЮРКІВ³

¹Кафедра фотограмметрії та геоінформатики, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери 12, Львів, Україна, 79013, тел.(098) -59-21-463, ел. пошта alla.v.hunina@lpnu.ua

² Фірма «Abris Design Group», вул. Маршала Рибалка 10/8, Київ, Україна, 04116

³Кафедра картографії та геопросторового моделювання, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери 12, Львів, Україна, 79013, ел. пошта mariana.i.yurkiv@lpnu.ua

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ БПЛА ДЛЯ АЕРОЗНІМАННЯ

Мета. Розробити БПЛА для топографічних аерознімальних цілей та дослідити його особливості і відповідність виконання поставлених завдань. **Методика.** Науковці Інституту геодезії НУ "Львівська політехніка" та виробничники фірми Abris Design Group послідовно розробляли та досліджували декілька моделей БПЛА з метою створення досконалого зразка, за допомогою якого можливо проводити аерознімання для топографічних цілей. В результаті раніше проведених експериментальних робіт визначено технічні вимоги до створення аерознімальних БПЛА. Саме за цими вимогами сконструйовано одну з останніх розробок БПЛА Agtow. Для апробації створеної моделі літака розроблено технологічну схему випробування з метою визначення конструкторських недоліків та отримання відповідних кондиційних матеріалів аерознімання для подальшого опрацювання: створення великомасштабних топографічних планів та ортофотопланів. **Результати.** У результаті проведення експериментальних робіт із застосуванням БПЛА Agtow виявлено можливі проблеми, пов'язані з запуском БПЛА та наведені засоби їх усунення. В результаті апробаційного аерознімання з БПЛА Agtow отримано 132 знімки з 7 маршрутів. Для проведення оцінки точності визначення координат точок місцевості, на ділянці дослідження замарковано 57 контрольних точок. Координати контрольних точок визначалися під час проведення ПВП GPS - приймачами Trimble R7 у режимі RTK. Після створення ортофотопланів, у програмному пакеті Digitals на цих матеріалах виміряні координати вищеозначених контрольних точок і визначені СКП. СКП планових координат становили: $m_x = 0,19$ м, $m_y = 0,11$ м, що підтверджує можливість створення планів в масштабі 1:2000. **Наукова новизна.** Розроблено та досліджено БПЛА Agtow, застосування якого дає змогу виконувати аерознімання та опрацьовувати великомасштабні ортофотоплани з необхідною точністю. **Практична значущість.** Доведено можливість застосування матеріалів, отриманих за результатами аерознімання з БПЛА Agtow, для опрацювання ортофотопланів в масштабі 1:2000.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат; аерознімання; цифрова знімальна камера, ортофотоплан.

Вступ

Можливістю застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) як нового засобу отримання фотограмметричної інформації є недоліки двох традиційних способів отримання даних: за допомогою космічних супутників і повітряних пілотованих апаратів, а саме, можливість знімання з невеликих висот і безпосередньо в районі об'єктів, отримання знімків високої роздільної здатності, застосування в зонах надзвичайних ситуацій без ризику для життя і здоров'я пілотів, рентабельність [Глотов В., 2016].

Необхідно зазначити, що технологія аерознімання з БПЛА сьогодні в основному відпрацьована, однак є ще достатньо проблем, вирішенню яких потрібно приділити увагу [Галецький В., 2012; Глотов В., 2010, 2013, 2014].

Роботою з дослідження можливості великомасштабного аерознімання сільських населених пунктів з метою створення ортофотопланів займаються вже більше ніж вісім років вітчизняні фахівці [Галецький В., 2012; Глотов В., 2014]. Коротко нагадаємо як починались експериментальні роботи стосовно створення та дослідження аерознімального БПЛА. Дослідження розпочато апробацією БПЛА «Птах», з двоциліндровим двигуном внутрішнього згоряння, яким проведено багатомаршрутне аерознімання. В результаті аналізу отриманих результатів виявлено суттєві недоліки запропонованої конструкції БПЛА та технології аерознімання, зокрема: недостатньо точне дотримання швидкості та висоти польоту через відсутність у пілота оперативної телеметричної інформації; різномасштабність знімків в більшості незадовільна (>16%), особливо між маршрутами; перекриття як повздовжнього та і поперечного незадовільне

(<56%); відсутність у деяких знімків потрібного перекриття; нестабільність системи дистанційного керування літаком на відстані більше ніж 700 метрів; прямолінійність маршрутів незадовільна – про що свідчила наявність розривів (>3%); кути зносу та кути нахилу знімків перевищували допуски > 3-5°; низька стійкість системи до електромагнітних завад; недостатній захист ЦЗК при русі по землі; незручний доступ до камери, що ускладнював зміну налаштувань; високий рівень вібрації, що призводив до змазування зображення; порівняно велика швидкість польоту на маршруті.

За результатами обробки отриманих матеріалів зроблено висновок про необхідність удосконалення конструкторсько-технологічної схеми. З цією метою розроблено спеціалізований малий БПЛА «Пегас» з електричним двигуном. Особливу увагу при конструюванні літака зосереджено на забезпеченні захисту бортового обладнання та ЦЗК при кадруванні та глісаді. Літак оснащений новою дистанційною системою керування з великим радіусом дії, сучасною інтегрованою системою визначення, реєстрації та дистанційного моніторингу параметрів польоту. Основним завданням експерименту було дослідження точності пілотування під час проходження паралельних маршрутів довжиною 1000 м на висоті польоту 300 м відносно точки старту. Маршрути побудовано за наземними орієнтирами, контроль БПЛА оператор здійснював візуально.

Проаналізувавши якість отриманих маршрутів, необхідно зазначити, що прямолінійність, кут зносу та повздовжнє перекриття знімків зафіксовано у межах допусків. Також задовільним було дотримання висоти та швидкості польоту. Захист систем літака та ЦЗК забезпечений на належному рівні і дозволяє надійну експлуатацію з непередбачених майданчиків в реальних умовах сільських населених пунктів. Дистанційне керування літаком «Пегас» відповідно до запропонованої технології дозволило в зоні прямої видимості витримувати з прийнятною для задач аерознімання точністю маршрути довжиною до 1000 м на висоті польоту 200–500 м. Однак залишилась невирішеною проблема – доволі великі кути тангажу та крену, що, імовірно, зумовлено недостатньою стабілізацією БПЛА.

Для виправлення вищенаведених недоліків створено нову модифікацію БПЛА Sky Bow-E, обладнаний радіомаяком, парашутом. На літаку

також встановлена відповідна навігаційна апаратура, яка дає змогу виконувати аерознімання в автоматичному режимі. Результати дослідження БПЛА «Sky Bow-G» показали, що він відповідає основним вимогам щодо класичного аерознімання: забезпечена максимальна стабільність польоту за допомогою відповідного гіростабілізуючого обладнання; розроблено обмеження злітно-посадочної смуги: кабрирування з катапульт, а посадки з допомогою парашутної системи. Багаторазові випробування підтвердили вірність більшості конструкторських рішень, але в той же час значення кутів зносу залишилися не задовільними, тобто перевищували допустимі значення. В нашому випадку на якість отриманих матеріалів вплинула неправильна оцінка швидкості та напрямку вітру на висоті польоту, що призводило до неправильної оцінки кута зносу і, відповідно, неправильної орієнтації камери відносно осі літака. Окрім цього, конструкція літака стосовно конфігурації фюзеляжу та площин не зовсім відповідала сучасним розробкам.

З подібними проблемами зіштовхнулись автори [Altena, 2014, Hadjimitsis, 2004; Mahiny, 2007; Smith, 1999], які прийшли до висновку, що вихідні дані зображення залежать і змінюються під впливом атмосферних умов. Вплив вітру і теплові ефекти можуть легко стати причиною виникнення досить великих кутових елементів зовнішнього орієнтування – до десятків градусів, що є проблемою для традиційної аналітичної фотограмметричної обробки у програмному забезпеченні.

Тому для усунення остаточних недоліків попередніх моделей перед авторами залишилось завдання розробити оптимальну модель літака у якому всі вищеперераховані вади були би відсутні.

Мета

Розробити БПЛА для топографічних аерознімальних цілей та дослідити його особливості і відповідність виконання поставлених завдань.

Методика

Виходячи з наведеного вище, сформульовані вимоги для створення БПЛА для аеротопографічного знімання:

1). Забезпечення максимальної стабільності польоту за допомогою відповідного гіростабілізуючого обладнання;

2). Наявність на борту геодезичного GPS-приймача, за допомогою якого у кінематичному режимі з достатньою точністю (10–20 см) визначатимуться лінійні елементи зовнішнього орієнтування знімків;

3). Встановлення навігаційного обладнання, за допомогою якого можливо реалізовувати напівавтоматичне та автоматичне керування апаратом;

4). Наявність аеропристрою, за допомогою якого компенсується кут зносу;

5). Важливими є засоби безпеки стосовно самого БПЛА та бортового обладнання (парашутна система, радіомаяк тощо);

6) Наявність достатньо потужної ЦЗК, з точки зору розрізняльної здатності (20–60 Мп);

7). Важливо забезпечити можливість транспортування БПЛА без наявності спеціальних засобів;

8). Бажаним є обмеження злітно-посадочної смуги (реалізація режиму «зліт з руки» і глісаду у точку).

Враховуючі ці вимоги, науковці Інституту геодезії НУ "Львівська політехніка" та виробничники фірми ABRIS Design Group розробили аерознімальний БПЛА сімейства FLIRT (Flying Intelligent Robotic Tool) Arrow (Рис.1), який виявився в рази дешевшим, ніж аналогічні моделі, які представлені на світовому ринку (Рис. 2).



Рис. 1. БПЛА Arrow перед стартом

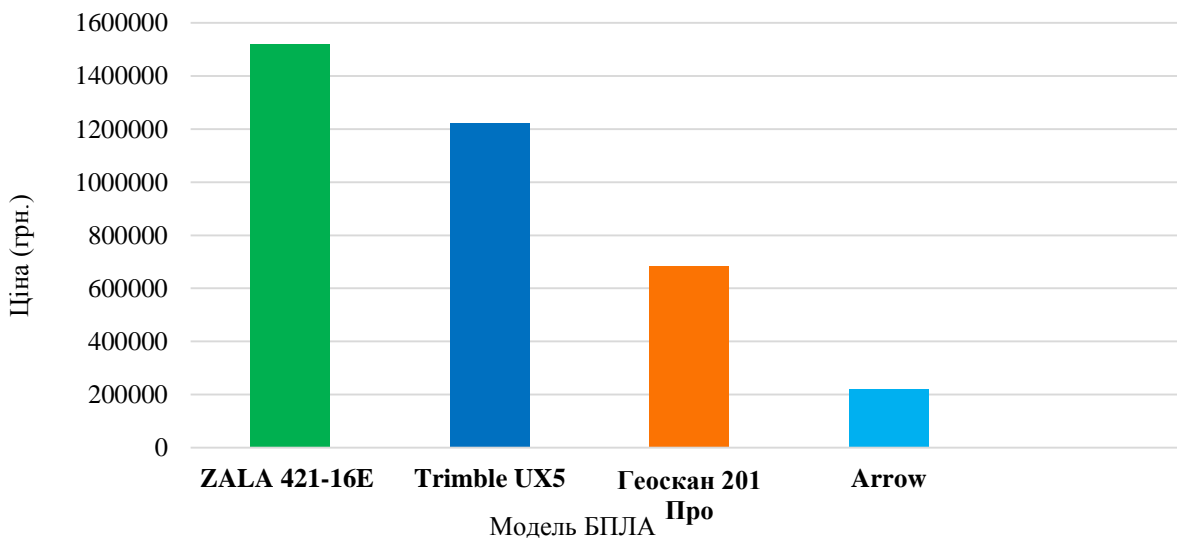


Рис. 2. Переваги отриманого результату порівняно з існуючими аналогами

Технічні характеристики БПЛА Arrow приведені в табл. 1.

Таблиця 1

Технічні характеристики БПЛА Arrow

Характеристики	Параметри
Злітна маса, кг	4,8
Ємність батареї, А	16
Мінімальна швидкість польоту, км/год	50
Крейсерська швидкість польоту, км/год	60-80
Максимальний час польоту, хв	100
Максимальна дальність польоту, км	100
Максимальне контрольоване віддалення від бази, км	15
Максимальна висота польоту, м	5000
Мінімальна робоча висота польоту, м	75
Максимальна роздільна здатність знімків, см/піксель	2
Габарити в транспортувальній конфігурації, см	120x25x25
Гранична швидкість вітру, м/с	12

Корпус літака виконаний з міцного склопластику і вуглепластику, стійкого до зовнішніх впливів, але не є вологозахисним. Для зменшення ударних навантажень при посадці він оснащений парашутною системою, а також застосовані гумові демпфери. БПЛА призначений для експлуатації в простих метеорологічних умовах в діапазоні температур -25—+40 градусів Цельсія. В літаку забезпечено визначення у польоті кута зносу за та його автоматичне компенсування шляхом розвороту аеропристрою на кут відхилення від курсу. Літак легко розбирається для перевезення в компактному транспортувальному кейсі. Мала

робоча висота та швидкість польоту дозволяють отримати високоякісні знімки з роздільною здатністю від 2 см/піксель. Створення проекту аерознімання та керування БПЛА відбувається за допомогою комп'ютера з встановленим відповідним програмним забезпеченням. Для спрощення та зручності підготовки БПЛА Arrow до старту передбачений пульт ручного керування, який під'єднують до комп'ютера, з якого відбувається запуск проекту. Для виконання знімання земної поверхні застосовується ЦЗК Sony QX1. Технічні характеристики ЦЗК Sony QX1 приведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Технічні характеристики цифрової камери Sony QX1

Вага:	216 г
Габарити:	74×70×53 мм
Тип матриці:	CMOS
Фокусна віддаль	25 см
Ефективна роздільна здатність:	20.1 Мп
Формат матриці:	APS-C
Розмір матриці:	357.28 мм ² (23.20 мм×15.40 мм)
Розмір пікселя матриці:	4.25 microns
Співвідношення сторін матриці:	3:2
Файловий формат знімків:	JPEG, RAW (12-bit ARW 2.3)
Серійне знімання, кадри/с:	3.5
Налаштування ISO:	Auto, 100, 200, 400, 800, 1600, 3200, 6400, 12800, 16000
Діапазон витримки:	30 - 1/4000

Для побудови маршрутів аерознімання застосовують програму **Flirt planner**, за допомогою якої проектують ділянку аерознімання, обирають місце старту та посадки, будують коробку за якою набиратиме висоту літак, маршрути аерознімання, зону глісади та місце розкриття парашуту, Рис. 3.

Під час проектування маршрутів необхідно перевірити чи завантажились дані з найближчої метеостанції, проконтролювати швидкість та напрямок вітру, обрати відповідні погодні умови, вказати фокусну віддаль камери, роздільну здатність знімків, значення поздовжнього та поперечного перекриття, тип

рельєфу, напругу на акумуляторі, спосіб посадки, напрямок посадки, зону сканування. Інші параметри встановлюються автоматично: висота аерознімання, відстань між маршрутами,

довжина всіх маршрутів, час аерознімання, максимальний кут зносу на маршрутах, напруга акумулятора, яка буде задіяна (не більше 12 А), площа знімання.



Рис. 3. Побудова маршруту аерознімання:

1 – місце старту, 2 – коробка набору висоти, 3 – коло зниження, 4 – місце відкриття парашуту, 5 – місце приземлення.

Результати

В результаті проведення експериментальних робіт виявлені проблеми, пов'язані з запуском БПЛА, аерознімальною камерою, глісадою, які в процесі дослідження були усунені.

1. Якщо елерони та стерно висоти не реагують на крен та тангаж, потрібно перевірити важелі елеронів, стерно висоти та при необхідності замінити їх.

2. У разі, якщо камера не робить пробний знімок – необхідно перевірити підключення живлення камери та зробити пробний знімок за допомогою програми Mission Planner, щоб уникнути засинання камери.

3. Якщо програма Flirt Planner не відкривається чи не відповідає – перевірити наявність інтернету та перезапустити програму.

4. В програмі Mission Planner не відкривається збережений WP-файл – він пошкоджений, тому спробувати відкрити іншу

збережену копію цього файлу або створити новий WP-файл.

5. У випадку, якщо висота польоту літака різко зменшується та істотно менша заданої висоти на відповідній ділянці польоту, просторове положення нестабільне протягом значного часу, є інші явні ознаки ненормального польоту: вимкнути двигун БПЛА, після чого відкрити парашут.

6. У разі, якщо напруга батареї стабільно нижче величини 13.8В і починає швидко падати, необхідно повернути БПЛА до точки старту, де він буде здійснювати політ по колу на безпечній висоті, після чого вибрати сприятливий для посадки сектор, вимкнути двигун БПЛА та відкрити парашут.

7. Якщо виконання проекту йде не за планом, якість навігації незадовільна, тоді БПЛА потрібно повернути до точки старту і діяти за схемою, описаною в попередньому пункті.

8. При зникненні сигналу телеметрії, треба перевірити якість підключення кабелю USB до док-станції та якість фіксації антен на телеметрії. Перемістити телеметрію, змінити положення антени в просторі. Перезавантажити програму Mission Planner і встановити підключення заново.

9. Для того, щоб підтвердити можливість опрацювання великомасштабних ортофотопланів за матеріалами, отриманими з БПЛА Arrow, авторами проведено аерознімання території м. Винники з висоти 520 м при швидкості літака 80 км/год. В налаштуваннях камери обирали наступні параметри: фокус

нескінченності, апертура – F/4,5, автоматична чутливість ISO, витримка – 1/1000 секунди. Варто відзначити, що процес пілотування проводився в повністю автоматичному режимі. В результаті отримано 132 знімки з 7 маршрутів.

Для визначення роботи аеропристрою літака Arrow проведено аерознімання з БПЛА Trimble UX5 тієї ж самої ділянки м. Винники. Зроблено порівняльний аналіз значень кутів зносу, крену та тангажу БПЛА Arrow та Trimble UX5 за кожним маршрутом. Для прикладу на рис. 4–6 представлені графіки за трьома маршрутами.

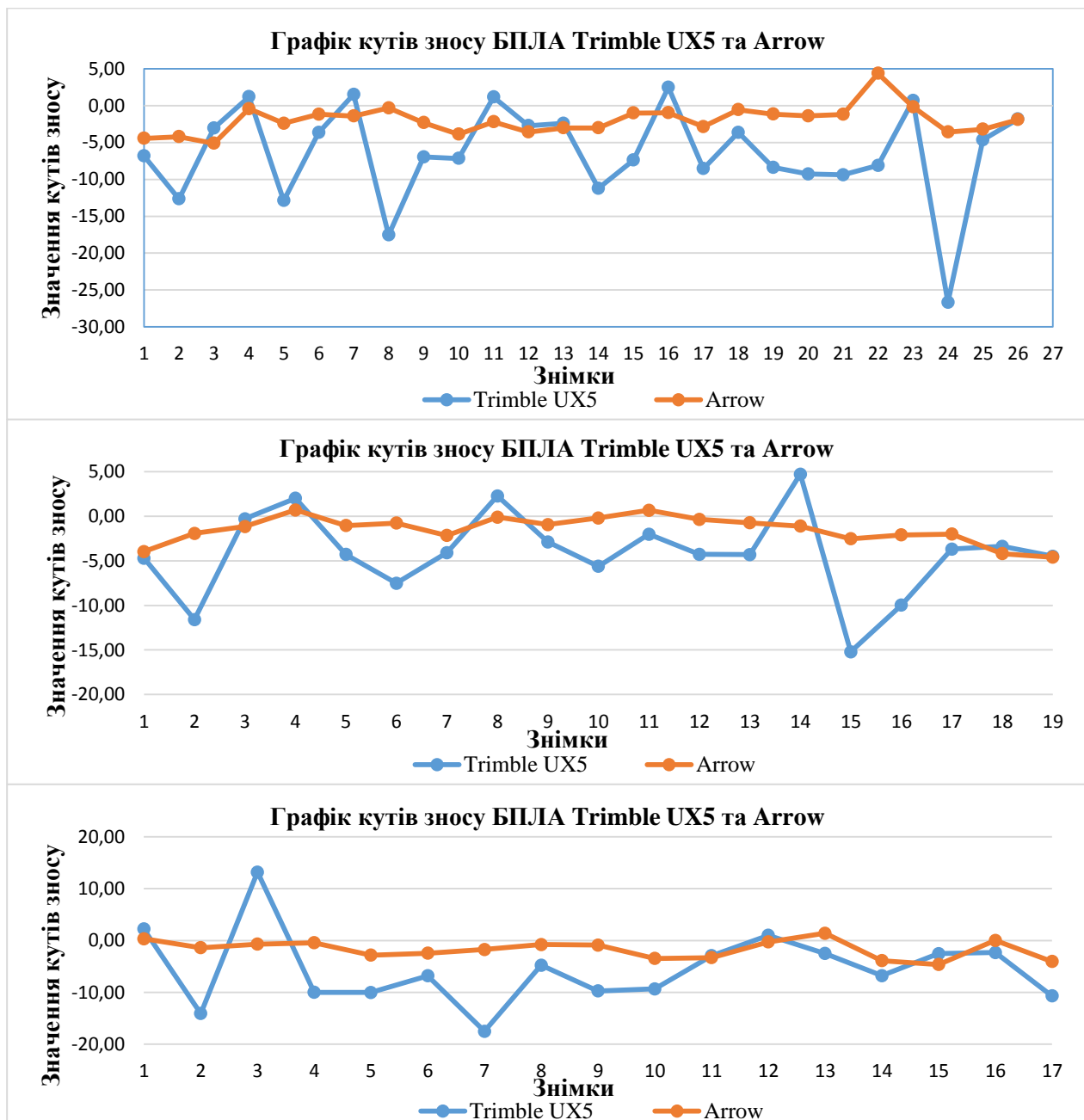


Рис. 4. Значення кутів зносу БПЛА Trimble UX5 та Arrow

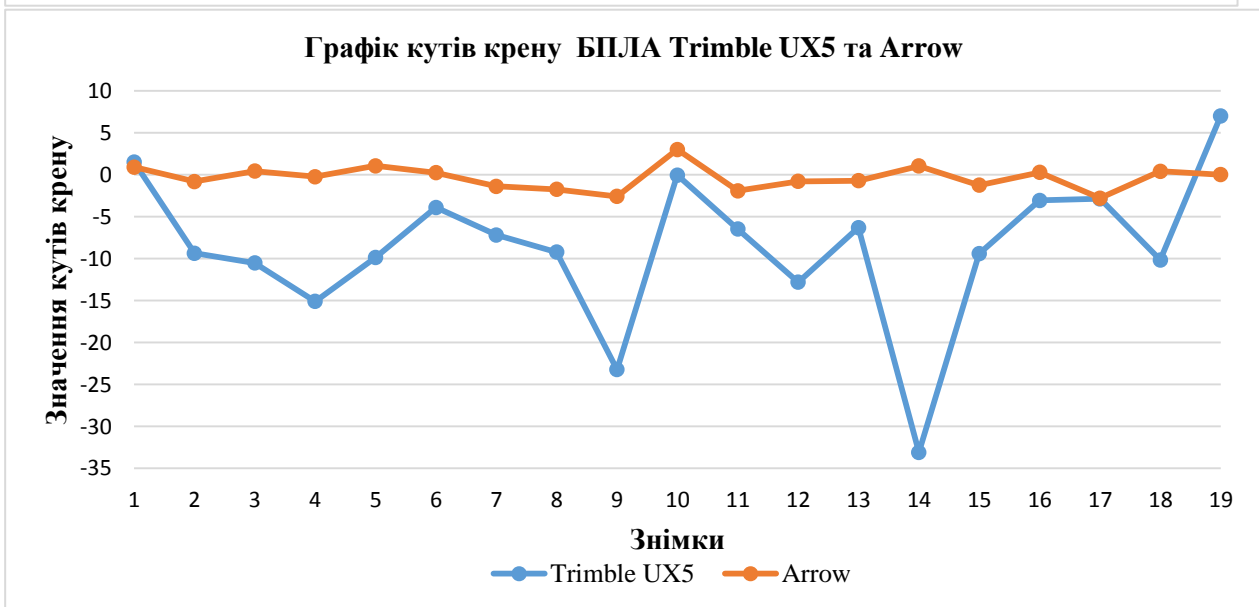
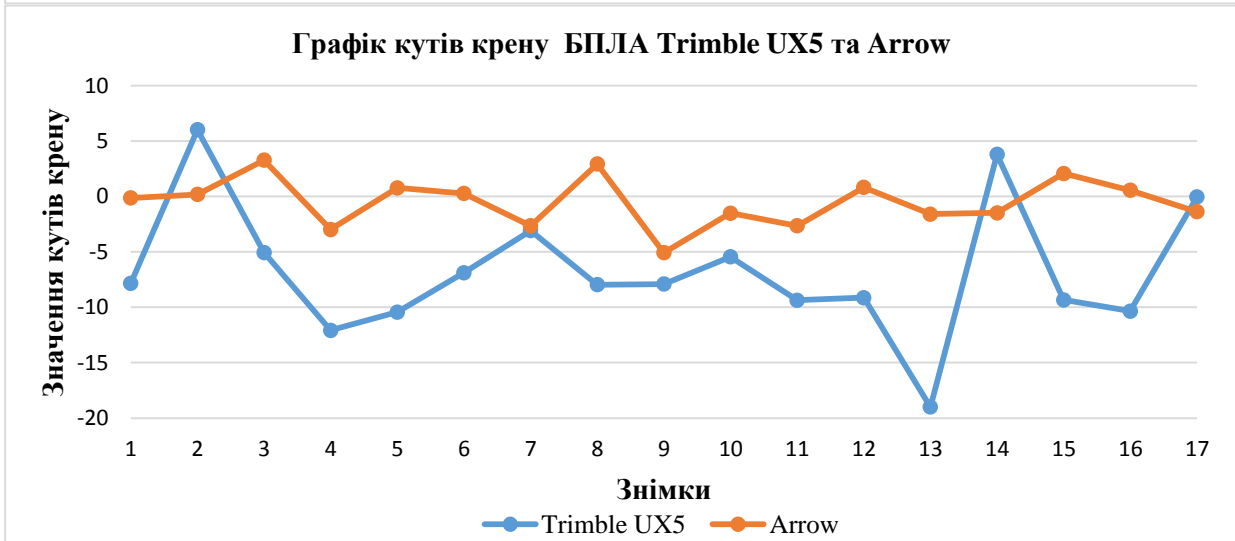
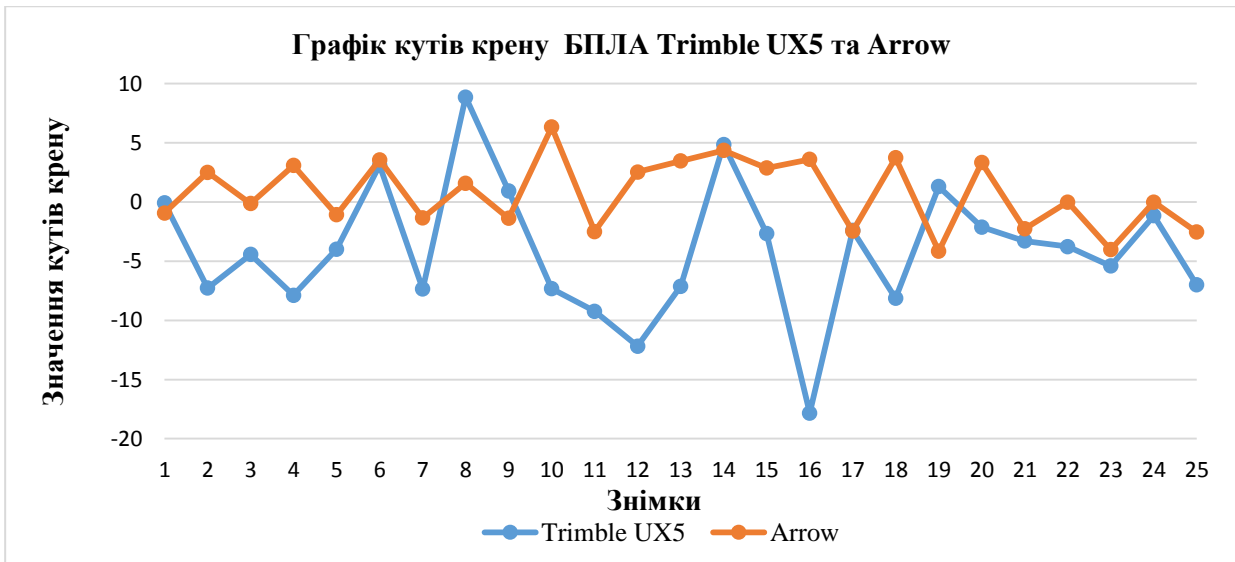
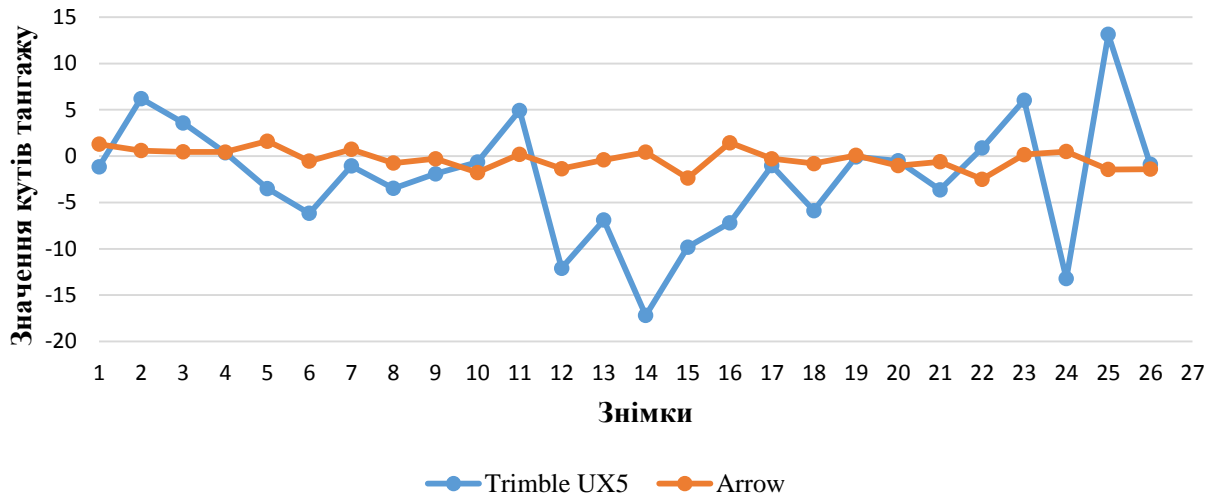
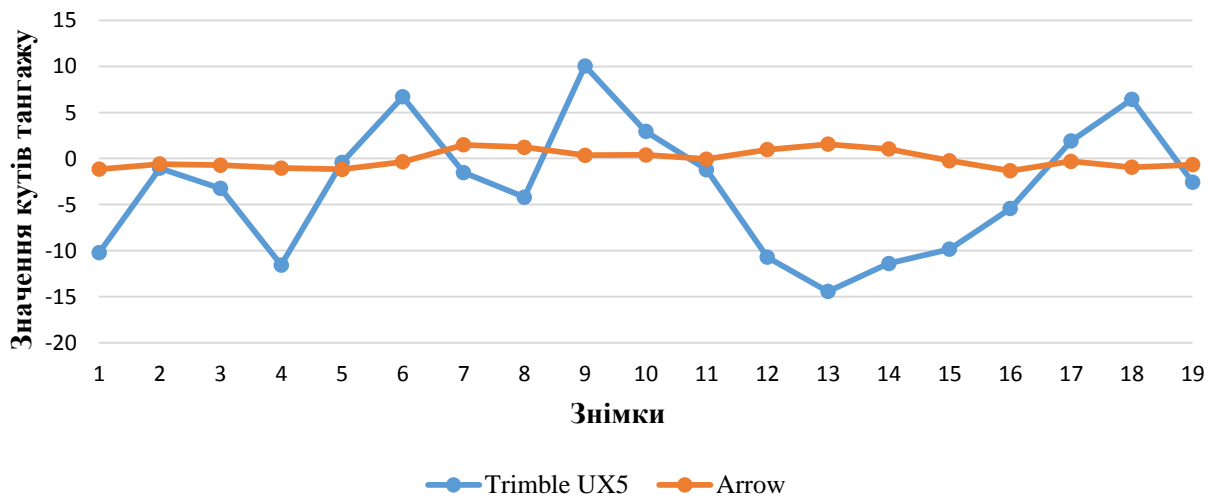


Рис. 5. Значення кутів крену БПЛА Trimble UX5 та Arrow.

Графік кутів тангажу БПЛА Trimble UX5 та Arrow



Графік кутів тангажу БПЛА Trimble UX5 та Arrow



Графік кутів тангажу БПЛА Trimble UX5 та Arrow

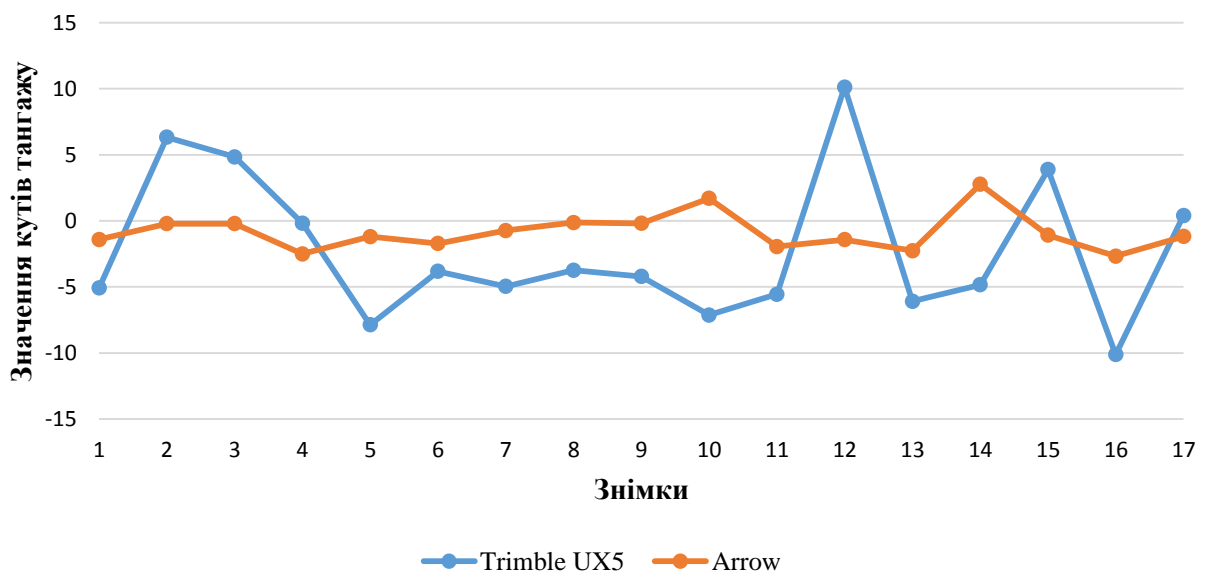


Рис. 6. Значення кутів тангажу БПЛА Trimble UX5 та Arrow.

1. Графіки значень кутів зносу БПЛА Agrow (рис. 4) свідчать що максимальне відхилення від курсу коливається від -5° до $+5^\circ$, такі результати пояснюються тим, що кут зносу автоматично компенсувався шляхом розвороту аеропристрою на кут відхилення від курсу. В той час кути зносу БПЛА Trimble UX5 коливаються від -25° до $+15^\circ$, що виходить за межі допуску.

2. З графіків значень кутів крену БПЛА Agrow (рис. 5) видно, що кути коливаються максимально від -6° до $+5^\circ$, що обумовлюється стабілізацією конструкції. Кути крену БПЛА Trimble UX-5 коливаються від -34° до $+9^\circ$, що свідчить про фактичне не допустиме значення цих елементів, оскільки як відомо за досвідом обробки знімків аналітичним методом ці значення не повинні перевищувати 10° - 12° .

3. За графіками значень кутів тангажу БПЛА Agrow (рис. 6) видно, що кути максимально коливаються від -3° до $+4^\circ$, що як вже згадувалося вище пояснюється стабілізацією літака. Значення кутів тангажу БПЛА Trimble UX-5 коливаються від -15° до $+14^\circ$, що також перевищує допуск.

Для проведення оцінки точності визначення планових координат точок місцевості, на ділянці дослідження замарковано 57 контрольних точок. Координати контрольних точок визначалися при проведенні ПВП GPS - приймачами Trimble R7 у режимі RTK. Після створення ортофотопланів, у програмному пакеті Digitals з цих матеріалів зняті координати вищеозначених контрольних точок і визначені СКП. СКП планових координат склали: $m_x=0,19$ м, $m_y=0,11$ м, що підтверджує можливість створення ортофотопланів в масштабі 1:2000.

Наукова новизна

Розроблено та досліджено БПЛА Agrow, застосування якого дозволяє виконувати аерознімання та опрацьовувати великомасштабні ортофотоплани з необхідною точністю.

Практична значущість

Доведення можливості застосування знімків, отриманих за результатами аерознімання з розробленого авторами БПЛА Agrow, для опрацьовування ортофотопланів в масштабі 1:2000.

Висновки

У результаті проведених експериментальних робіт можна зробити наступні висновки:

1. Опрацьовано розробку і дослідження декількох моделей БПЛА, в результаті випробувань яких були визначені конструкторські та технологічні особливості до створення БПЛА для топографічного знімання.

2. Сконструйовано та досліджено аерознімальний БПЛА Agrow.

3. Виявлені проблеми, пов'язані з запуском БПЛА Agrow, аерознімальною камерою, глісадою, які в процесі дослідження були усунені.

4. Проведено порівняльний аналіз значень кутових елементів зовнішнього орієнтування знімків, отриманих в результаті аерознімання з БПЛА Agrow та Trimble UX5.

5. Доведено, що застосування БПЛА Agrow дозволяє створювати ортофотоплани масштабу 1:2000 з відповідною точністю визначення планових координат.

6. Перспективою подальших досліджень є вдосконалення аерознімального БПЛА та покращення стабілізації польоту з метою зменшення кутових значень зовнішнього орієнтування знімків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Галецький В. Аналіз експериментальних робіт з створення великомасштабних планів сільських населених пунктів при застосуванні БПЛА / Галецький В., Глотов В., Колісниченко В., Прохорчук О., Церклевич А. // Геодезія, картографія і аерофотознімання. Вип. 76, 2012, с.85-93.
- Галецький В. Другий етап експериментальних робіт з аерознімання сільських населених пунктів БПЛА / В. Галецький, В. Глотов, В. Колісниченко, О. Прохорчук, А. Церклевич // Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища GPS і GIS технології: зб. наук. матер. XVII Міжн. наук.-техн. симпозиуму. – (Алушта, вересень 2012). – Львів. – 2012. – С.274-277.
- Глотов В. Аналіз і перспективи аерофотознімання з БПЛА / В. Глотов, А. Церклевич, В. Колісниченко, О. Прохорчук. // Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища GPS і GIS технології: зб. наук. матер. XVIII Міжн. наук.-техн. симпозиуму. – (Алушта, вересень 2013). – Львів. – 2013. – С.5-10.
- Глотов В. Аналіз і перспективи аерознімання з безпілотного літального апарата / В. Глотов, А. Церклевич, О. Збруцький, В. Колісниченко, О. Прохорчук, Р. Карнаушенко, В. Галецький //

- Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва, випуск I(27) – 2014. – с.131-136.
- Глотов В. Порівняльний аналіз сучасних методів опрацювання великомасштабних планів / В. Глотов, А. Гуніна // – Міжвідомчий науково-технічний збірник “Геодезія, картографія і аерофотознімання”, Вип. 83– 2016. – с.53-63.
- Глотов В. Результати експериментально-випробувальних робіт / В. Глотов, В. Колісниченко // Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища GPS і GIS-технології: зб. наук. матер. XIV Міжн. наук.-техн. симпозіуму. – (Алушта, вересень 2010). – Львів. – 2010. – С.164–169.
- Altena V., Goedeme T. Assessing UAV platform types and optical sensor specifications. ISPRS–Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2014, vol. II-5, pp. 17-24.
- Hadjimitsis D., Clayton C., Hope V. An assessment of the effectiveness of atmospheric correction algorithms through the remote sensing of some reservoirs International Journal of Remote Sensing, 2004, vol.25, vol. 18, pp. 3651–3674.
- Mahiny A.S. and Turner B. J. A Comparison of Four Common Atmospheric Correction Methods. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007, Vol.73, vol. 4, pp. 361–368.
- Smith M., Edward J., Milton G. The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance. International Journal of Remote Sensing. 1999, Vol.20, no. 13, pp. 2653–2662.

Надійшла 28.02.2018 р.