

Г. А. Дробаха, В. Е. Лісіцин

ФОРМУВАННЯ ТРАСИ ПОЛЬОТУ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА ПІД ЧАС ПЛАНУВАННЯ РОЗВІДУВАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ

Розглянуто особливості автоматичного формування на електронній карті трас польоту безпілотних літальних апаратів (БПЛА), побудованих за різними аеродинамічними схемами. Подано методику розрахунку інтегрованої зони обмежень на польоти БПЛА за допомогою оверлейних операцій та буферного аналізу, які виконуються у геоінформаційній системі.

Ключові слова: БПЛА, траса Дьюбинса, геоінформаційна система, безпілотний авіаційний комплекс.

Постановка проблеми. Планування аеророзвідки за допомогою безпілотних літальних апаратів потребує великих обсягів інформації про маршрут і стан території, над якою планується виконувати політ, про висотні, швидкісні та аеродинамічні характеристики літального апарата, тактико-технічні характеристики знімальної апаратури тощо. Деякі аспекти цієї проблеми розглядаються у статті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вплив аеродинамічних характеристик та компоновання планера новітніх БПЛА на вигляд траси польоту у сучасній літературі висвітлено не достатньо. Тому для розрахунку маневру та траєкторії розвороту апаратів, корпус яких виконано за класичною літаковою схемою, можливо використовувати аеродинамічні моделі, що застосовуються для “великих” літаків [1]. Для мультикоптерного компоновання планера з урахуванням можливих поправок застосовуватимуться моделі гелікоптера. Розрахункові моделі, що формують трасу БПЛА, наведено у [3]. Оптимізація маршруту за критеріями мінімальної тривалості польоту або довжини траси може бути отримана за допомогою підходу, описаного у [4].

Виклад основного матеріалу. Під БПЛА далі будемо розуміти літальний апарат, виконаний за літаковою або гелікоптерною аеродинамічною схемою, який призначений для виконання розвідувальних, розвідувально-ударних та інших завдань, керований дистанційно або такий, що виконує рух за програмою. В інформаційному середовищі також використовуються такі визначення:

- дрон;
- мультикоптер (квадрокоптер, шестикоптер, октокоптер);
- дистанційно пілотований літальний апарат (ДПЛА).

Більш загальним поняттям є “безпілотний авіаційний комплекс” (БАК) – сукупність

матеріально-технічних засобів, що може містити один або кілька БПЛА, обладнання для керування та транспортування, технічні пристрої, які формують канали зв'язку та передавання інформації, пристрої оброблення інформації тощо.

Головним елементом такого комплексу лишається літальний апарат, який для виконання завдань Національної гвардії України (НГУ) може застосовуватися:

- на оперативному-тактичному рівні під час взаємодії НГУ із Збройними Силами України на рівні оперативних командувань;
- на тактичному рівні у ланці бригади або полку;
- для ланок рівня взводу чи роти, де як засіб розвідки використовуються, так звані, міні-БПЛА, оперативність розгортання яких та незалежність від інших джерел розвідувальної інформації роблять їх дуже ефективними.

Є низка загальних вимог до формування траси польоту для всіх типів БПЛА, а саме:

- траса літального апарата має по можливості прокладатися зовні розвіданої зони дії засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) противника;
- літак повинен уникати входження у розвідану зону дії засобів протиповітряної оборони (ППО) противника (хоча ефективність дії “традиційних” засобів ППО проти малопомітних та малорозмірних цілей вкрай низька);
- БПЛА не має віддалятися від точки старту на відстань, що перевищує дальність радіозв'язку із системою його керування або робить неможливим приймання і передавання з борту літака телеметричної та розвідувальної інформації;

– додатковою умовою є уникання втрати зв'язку із БПЛА через зникнення сигналу у районах з інтенсивними перепадами висот рельєфу або у міських багатоповерхових забудовах.

Виокремлюючи більш детально типи завдань, що постають перед Національною гвардією України, можна виділити найбільш поширений клас БПЛА – це розвідники, які

виконують фотографування і відеознімання місцевості.

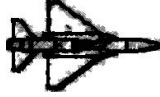
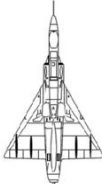
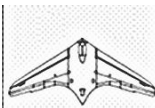

Траси польоту для таких апаратів прокладаються вздовж маршрутів та вглиб районів, що підлягають розвідуванню. Важливими параметрами у розрахунковій моделі літака-розвідника є тривалість виконання завдання (мінімізація часу знаходження на території противника) та максимально повний обліт території, що є об'єктом розвідки. Якщо ж літаки виконують, так зване, баражування – багатогодинний обліт певної ділянки, моніторинг та фіксацію змін на позиціях противника, то сплановані траса і висота польоту мають виключити виявлення літака візуальними засобами спостереження противника.

Своєю чергою, для літаків ударного типу

тактика застосування зазвичай потребує швидкого і не помітного для спостерігачів та засобів ППО пересування до цілі, координати якої виявлені попередньою розвідкою. Це вимагає виконання польоту на надмалих висотах, майже впритул до рельєфу місцевості вздовж траси польоту. Треба також урахувати не тільки природний рельєф місцевості, а й висоти будівель, ліній електропередачі тощо у тому разі, якщо траса проходить через населені пункти.

Залежно від аеродинамічної схеми, за якою виконаний корпус БПЛА, суттєво різняться вимоги щодо вигляду траси його польоту, послідовності виконання зльоту та посадки. У таблиці подано найпоширеніші на сьогодні аеродинамічні схеми БПЛА.

Класифікація БПЛА за аеродинамічною схемою фюзеляжу

Тип схеми	Назва	Приклад	Примітки
За схемою літака	Класична схема		Найвні всі аеродинамічні елементи класичного, пілотованого літака: хвостове оперення, вузли крила. На початку масового застосування БПЛА у бойових операціях така схема була найпоширенішою для літаків ударного типу
	Безхвоста схема		У БПЛА немає окремих площин горизонтального керування (хвостові елерони, кермо висоти). Їх роль виконують, так звані, елевони, що знаходяться у площині крил
	Літаюче крило		Аеродинамічна схема, яка надійно працює для БПЛА, але з великими обмеженнями може бути застосована для звичайних пілотованих літаків тому, що їх великі розміри та аеродинамічні показники призводять до нестійкого за кутом ристання польоту
За схемою гелікоптера	Гелікоптер за класичною схемою або мультикоптер (багатороторний гелікоптер)		На відміну від “великих” гелікоптерів, конструкція мультикоптера не містить автомата перекоосу, що керує положенням гвинтів, відповідаючи за їх крен і тангаж. Гвинти мультикоптера працюють з різною швидкістю, і апарат сам себе стабілізує у польоті

Апарати мультикоптерного типу літають повільніше, ніж БПЛА літакового типу, “шумлять” сильніше (оскільки мають більшу кількість гвинтів), запасу батареї вистачає на менший час. Але більш проста і безпечна посадка, здібність зависання над однією точкою та можливість після цього різко змінювати напрям польоту (траса у вигляді ламаної лінії) роблять таку схему майже ідеальною для виконання БПЛА функцій розвідника місцевості, коригування вогню та цілевказування. Тому літаки, виконані за такою схемою, найчастіше використовують для аерофотознімання.

Для класичної аеродинамічної схеми літакового типу є ще одне суттєве обмеження на вигляд траси польоту. У горизонтальному польоті за відсутності крену піднімальна сила дорівнює вазі літального апарата. Під час виконання розвороту [1] здійснюється його крен і відповідно змінюється кут нахилу піднімальної сили (рис. 1).

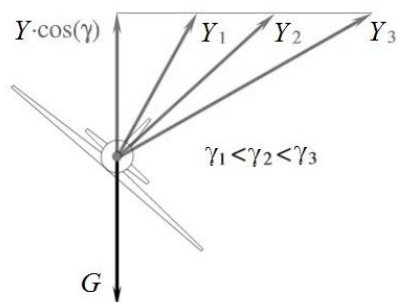


Рис. 1. Зміна кута нахилу піднімальної сили під час виконання розвороту літального апарата у повітрі

Тоді, на відміну від сталого режиму польоту, рівновагу літака забезпечує не вся піднімальна сила, а тільки її складова – проекція на вертикальну вісь координат:

$$Y \cos(\gamma). \quad (1)$$

Незалежно від кута крену літального апарата під час виконання розвороту у горизонтальній площині вертикальна складова піднімальної сили має залишатися постійною величиною, щоб урівноважувати силу тяжіння літака. Це, своєю чергою, обумовлює потребу у збільшенні піднімальної сили літака під час виконання розвороту:

$$Y = G n_y, \quad (2)$$

де $n_y = 1/\cos(\gamma)$ – нормальне перевантаження літака на розвороті.

Тому зі збільшенням кута крену літака має зростати і його піднімальна сила (рис. 1):

$$Y_1 < Y_2 < Y_3.$$

Умовою викривлення траєкторії польоту під час розвороту є наявність дії на корпус літака невідношеної доцентрової сили:

$$F_{д.ц.} = Y \sin \gamma. \quad (3)$$

У нашому випадку її роль відіграє горизонтальна проекція піднімальної сили літака. Така доцентрова сила обумовлює доцентрове прискорення БПЛА, особливістю якого є те, що вектор поступальної швидкості змінюється не за величиною, а за напрямом. Вектор цього прискорення спрямовано вздовж лінії дії доцентрової сили, перпендикулярно до лінії, яка визначає траєкторію розвороту ЛА (рис. 2).

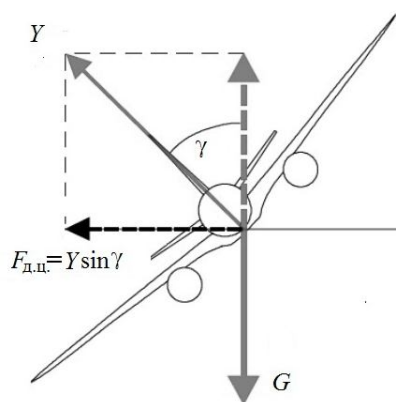


Рис. 2. Проекції піднімальної сили під час розвороту ЛА

Додамо ще дві формули, які можуть бути використані у процесі розрахунку геометричних параметрів трас польоту БПЛА.

Радіус виражу:

$$r = \frac{V^2}{g \operatorname{tg} \gamma}, \quad (4)$$

де V – швидкість ЛА.

Перевантаження на віражі:

$$n = \frac{Y}{G} = \frac{1}{\cos \gamma}. \quad (5)$$

Таким чином, під час формування траси автоматичного або напівавтоматичного польоту БПЛА слід урахувати обмеження на величину радіуса розвороту, які обумовлені діючими на корпус літака силами.

Незалежно від аеродинамічної схеми БПЛА та варіантів його бойового застосування є три основних варіанти керування польотом літака.

1. Політ цілком у *ручному режимі* (але за допомогою стабілізації, яку виконує автопілот). При цьому зображення зі знімальної відеокамери, а також дані про стан літального апарата оператор,

що керує польотом, отримує за допомогою телеметрії – сукупності вимірів (швидкість, курс, крен, тангаж, рівень заряду акумулятора тощо), які здійснюються на борту БПЛА за допомогою різних датчиків і передаються оператору БАК на екран комп'ютера.

2. Переміщення цілком в автономному режимі, згідно з визначеною програмою польоту.

3. Автономний політ за визначеною програмою з можливістю втручання оператора та коригування траси або повернення до режиму автономного польоту (напіваавтоматичний режим).

Для візуального контролювання місця знаходження літального апарата та оперативного коригування його траси слід підключити наземний компонент системи приймання та оброблення телеметричної інформації БАК до єдиної програмної оболонки, в якій відображатиметься ця інформація. У процесі відображення на екрані комп'ютера якнайменш має бути така інформація:

– поточні GPS-координати БПЛА у вигляді траси польоту та параметри орієнтування літака (або кількох БПЛА водночас, якщо планується групова авіаційна операція);

– рельєф місцевості (цифрова модель), населені пункти, водні ресурси тощо у районі виконання польоту з можливістю зменшення або збільшення масштабу відображення;

– растрове зображення місцевості у районі виконання завдання.

Можливо реалізувати таку програмну оболонку “з нуля”, використовуючи одну з потужних професійних оболонок ГІС (від виробників ESRI або ERDAS). Проте можна скористатися й однією з існуючих систем з відкритим для розробників кодом. Такою системою, наприклад, є ГІС “Інструмент”, що розроблено у Національній академії Національної гвардії України. У ній можлива інтерактивна підготовка польотної траси БПЛА з урахуванням багатьох геопросторових чинників. Остання версія геоінформаційної системи НГУ “Інструмент” дозволяє використовувати стандартні процедури роботи з електронними картами, серед яких є такі:

– підтримка роботи з найвідомішим векторним форматом географічних даних (так званий “шейп-файл”) і картами у проекціях Красовського 1942 та WGS-84;

– можливість підключення до електронної карти растрових даних (сканованих паперових карт, аерофотознімків, фрагментів карт Google),

підготовлених та геоприв'язаних у відповідній проекції карти [2], а також масштабування такої електронної карти і проведення вимірів по ній;

– робота з рельєфом місцевості (по ізолініях або за масивом точок), побудова профілю перерізу рельєфу, отримання інформації стосовно висот на карті;

– побудова тривимірної карти району, відображення колірних карт рельєфу, розрахунок ухилів;

– розрахунок довжини траси з урахуванням висот та характеру рельєфу місцевості;

– модуль підключення до карти пристрою GPS та відображення отриманих точок траси (див. рис. 3).

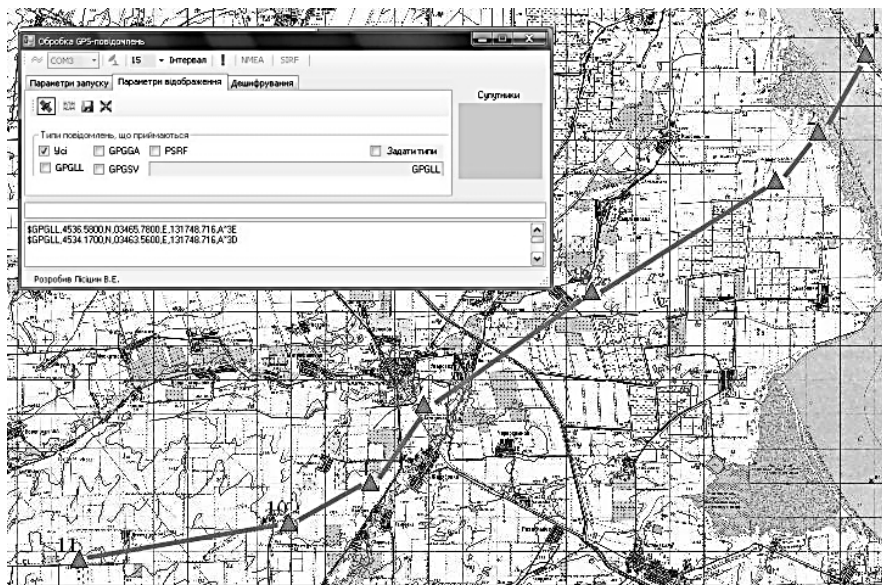
Траса польоту в автоматичному або напіваавтоматичному режимі польоту БПЛА складається з окремих точок, які за допомогою модуля підготовки даних БАК послідовно наносяться на електронну карту і зберігаються в оперативній пам'яті пристрою протягом усього польоту.

Розглянемо загальну математичну постановку для визначення завдання формування траси БПЛА у площині електронної карти. Припустимо, що ЛА переміщується від вихідної точки P_s до кінцевої точки P_f . Уздовж маршруту польоту БПЛА визначають також додаткові точки P_i , які сумісно з P_s та P_f складають трасу, що проектується. Такі точки називатимемо опорними. Знаходження БПЛА у певній опорній точці і кількість опорних точок та їх координати обумовлені бойовим завданням літального апарата. Кожна опорна точка визначається [3] як елемент масиву

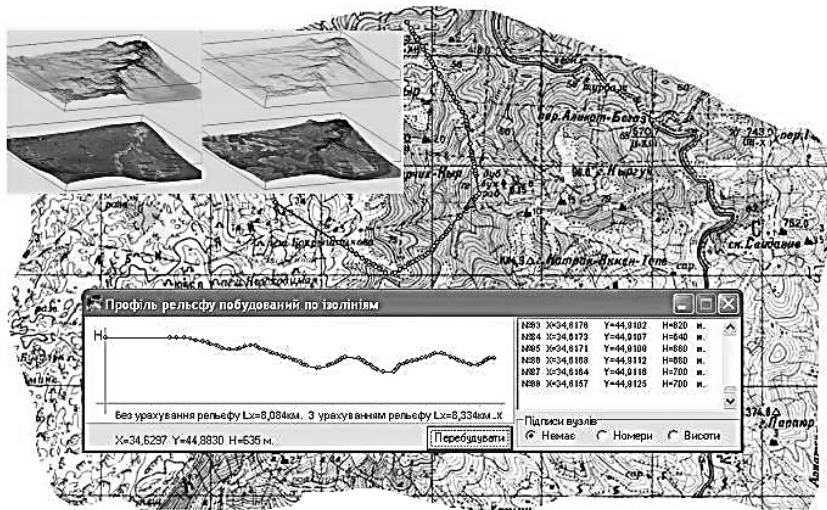
$$P_i(x, y, z, \theta, \varphi), \quad (6)$$

де x, y, z – координати поточної точки в системі електронної карти; θ, φ – кути орієнтування літального апарата у поточній точці відповідно для вертикальної та горизонтальної площин.

Додаткове визначення опорної точки траси БПЛА за допомогою двох кутів має глибокий сенс. Залежно від типу завдання, що виконує ЛА, вкрай важливим може бути його кутове орієнтування у просторі. Наприклад, якщо після виконання бойового польоту у точці посадки БПЛА з літаковою аеродинамічною схемою конструкції буде зорієнтований хвостовим оперенням уперед, то, скоріш за все, він зазнає аварії. Для мультикоптерів цей приклад менш актуальний, але і для них є ситуації, де важливо контролювати кути орієнтування у просторі.



а



б

Рис. 3. Можливості ГІС "Інструмент":
 а – приймання від GPS та відображення на карті точок траси;
 б – робота з рельєфом

Узагальнена математична модель створення траси БПЛА має вигляд

$$P_{si}(X_{si}, Y_{si}, Z_{si}, \theta_{si}, \varphi_{si}) \xrightarrow{Lr_i(q)} P_{fi}(X_{fi}, Y_{fi}, Z_{fi}, \theta_{fi}, \varphi_{fi}), \quad (7)$$

де $r_i(q)$ – сегмент, що з'єднує поточну пару опорних точок траси; q – параметр сегмента (обмеження та вимоги до його геометрії); L – обмеження на форму сегмента.

Серед обмежень у неявному вигляді у формулі (7) можуть бути такі: присутність параметрів трас переміщення інших літальних апаратів, маршрути яких перетинаються з поточною трасою; наявність на шляху БПЛА будинків, ліній електропередач (ЛЕП) або

інших перешкод; гранична дальність зв'язку оператора БАК з БПЛА; максимальна висота польоту та дальність; динамічні обмеження на величину радіуса розвороту БПЛА, які було розглянуто вище; обмеження швидкості польоту; зони дії ППО та засобів РЕБ противника тощо.

Для формалізації геопросторових обмежень зазвичай використовують, так званий, метод дорожньої карти. Сутність його полягає у тому, що на електронній карті створюють усі зони, над якими політ БПЛА не може бути здійснений (див. рис. 4).

Є чимало математичних вирішень того, як прокласти оптимальні (наприклад, найбільш віддалені від усіх зон заборони польотів) траси



Рис. 4. Ілюстрація методу дорожньої карти
(чорним кольором показано дві зони заборони польоту БПЛА)

на такій дорожній карті. Зокрема, можна скористатися діаграмами Вороного [4]. Зрозуміло, що доцільніше виконувати таке моделювання за допомогою ГІС та електронної карти.

Розглянемо два фрагменти траси, що створюється для БПЛА за масивом опорних точок (рис. 5).

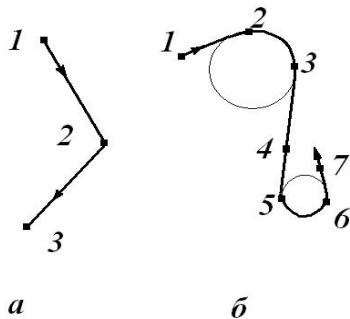


Рис. 5. Два фрагменти траси під час розвороту БПЛА:

a – опорні точки з'єднані прямолінійними сегментами; *б* – опорні точки 2, 3, 5 та 6 є дотичними до відповідних кіл

Зрозуміло, що у реальному житті траса, зображена на рис. 5*a*, не можлива для БПЛА, виконаного за аеродинамічною схемою літака. По-перше, існує інерційність під час переміщення у повітрі тіла певної ваги, тобто вказана зміна напрямку руху у точці 2 призведе до колосальних динамічних навантажень на корпус ЛА. По-друге, елементи керування літака не спроможні виконати такий перехід за нескінченно малий проміжок

часу. Але для мультикоптера така траса не є чимось незвичним з огляду на його здібності зависання у повітрі над певними точками місцевості. З іншого боку, траса, яка зображена на рис. 5*б*, формує плавний віраж літака за допомогою, так званої, траєкторії Дьюбинса (Dubinspath). У [3] формалізовано графоаналітичне та матричне вирішення розрахунку траєкторій Дьюбинса для двох випадків (рис. 6).

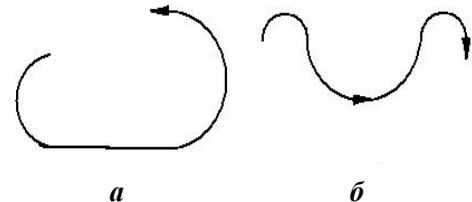


Рис. 6. Два типи побудови траєкторій Дьюбинса для БПЛА:

a – побудований на фрагментах двох кіл та лінійного сегмента (тип CLC);
б – побудований на фрагментах трьох кіл (тип CCC)

З урахуванням можливості знаходження на електронній карті районів, через які траса, що проектується, не може бути прокладена згідно з обмеженнями формули (7), інструменти із комплексу програмних засобів БАК зазвичай формують низку можливих рішень, серед яких оператору слід вибрати найбільш, на його погляд, оптимальне (див. рис. 7).



Рис. 7. Можливі траси, побудовані за допомогою траєкторій Дьубинса (чорним кольором показано дві зони, в яких політ заборонено)

Повернемося до можливості створення траси БПЛА за допомогою геоінформаційних систем. Більшість обмежень у формулі (7) на електронній карті подається у вигляді полігональних ділянок, політ БПЛА над якими заборонено (можливо, з певним ступенем імовірності). Тобто кожне обмеження у математичній моделі розрахунку трас відіграє роль чинника, геопросторові координати якого описують деяку полігональну область. За

допомогою операцій булевої алгебри (AND, OR) такі ділянки поєднуються у складну область. Для автоматизації цього процесу в геоінформаційній системі “Інструмент” пропонуються потужні засоби геопросторового, буферного та оверлейного аналізу (рис. 8).

В інтерактивному режимі у ГІС “Інструмент” можуть бути застосовані також засоби вимірювання відстаней для врахування обмежень на довжину траси і загальну тривалість польоту.

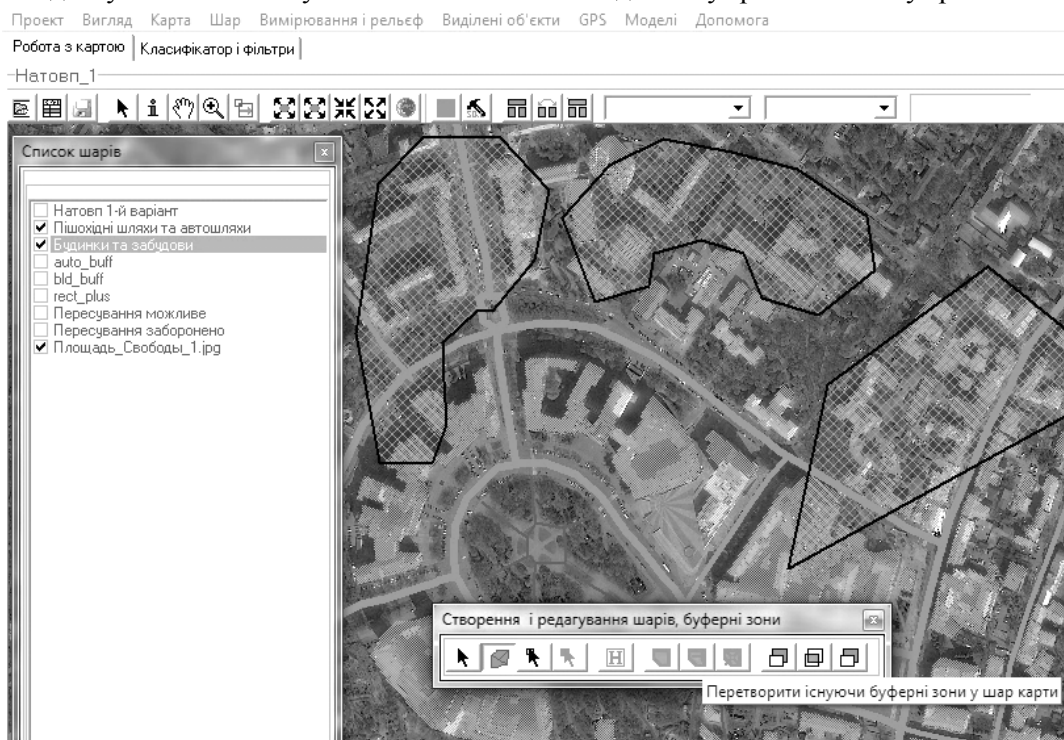


Рис. 8. Три буферних зони, створені у ГІС “Інструмент”, формують складний геопросторовий чинник, який обмежує області побудови траєкторій Дьубинса

Висновки

Розглянуто низку обмежень, які накладаються на форму трас польоту БПЛА за його аеродинамічними та кінематичними характеристиками. Проте коло таких обмежень значно ширше.

Дальність польоту БПЛА, або його бойовий радіус – це гранична відстань, яку може подолати ЛА під час виконання бойового завдання. Якщо це не ударна зброя одноразового використання, то ЛА повинен не тільки дістатися необхідної точки на карті, але й провести розвідку визначеного району або здійснити коригування вогню артилерії і повернутися на базу (із залишком пального чи заряду акумулятора, що гарантовано дозволяє здійснити посадку).

Для БПЛА, який виконує завдання стратегічної або оперативно-тактичної ланки, характерним є багатогодинне баражування над районом збирання розвідувальної інформації. Для апаратів тактичної ланки висуваються більш жорсткі вимоги до ємності акумуляторних батарей або кількості пального на борту. Дальність польоту легкого розвідника у середньому складає 25–35 км. Робочий діапазон висот польоту БПЛА – це максимальна та мінімальна висоти, у межах яких апарат спроможний виконувати розвідку.

З одного боку, розвідка, яка виконується з великої висоти, більш безпечна відносно виявлення та ураження засобами ППО противника. З іншого боку, якщо район розвідування характеризується великою середньорічною кількістю днів із хмарною погодою (що має місце у Донбасі з жовтня по квітень), то така розвідка не буде ефективною. Більш того, завдяки сучасним матеріалам, які застосовуються у процесі виготовлення БПЛА, такі апарати малопомітні на екранах ППО, а завдяки малому розміру застосування комплексів ППО типу “земля – повітря” не доцільне по таких літальних апаратах. Тому для легкого БПЛА траса може бути визначена у висотному діапазоні 200–300 м.

Комплексне розв’язання завдання з формування траси БПЛА вимагає врахування багатьох параметрів. Деякі із цих параметрів тісно пов’язані з характеристиками місцевості, що потребує попереднього складного геоінформаційного аналізу. Тому доцільно реалізувати, так званий, планувальник трас БПЛА у вигляді окремого модуля геоінформаційної системи “Інструмент”. Кінцевою інформацією, що розраховується у такому планувальнику, є масив опорних точок уздовж траси, які визначаються просторовими координатами та кутами орієнтування. Це дасть змогу уніфікувати процес підготовки польотних даних і у майбутньому стандартизувати інтерфейси введення інформації для різних типів БПЛА.

Список використаних джерел

1. Байдаков, В. Б. Аэродинамика и динамика полёта летательных аппаратов [Текст] / В. Б. Байдаков, А. С. Клумов. – М. : Машиностроение, 1979. – 344 с.
2. Дробаха, Г. А. Створення просторових даних для електронних карт геоінформаційної системи внутрішніх військ МВС України [Текст] : монографія / Г. А. Дробаха, Л. В. Розанова, В. Е. Лісіцин. – Х. : Акад. внутрішніх військ МВС України, 2013. – 192 с.
3. Sourdos, A. Cooperative path planning for unmanned aerial vehicles [Текст] / A. Sourdos, V. A. White, M. Shanmugavel. – West Sussex, UK : Wiley, 2011. – 190 p.
4. Диаграмма Вороного. Википедия [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [https://ru.wikipedia.org/wiki / Диаграмма Вороного](https://ru.wikipedia.org/wiki/Диаграмма_Вороного) (дата звернення: 20.06.15).

Стаття надійшла до редакції 19.11.2015 р.

Рецензент – доктор військових наук, професор О. М. Шмаков, Національна академія Національної гвардії України, Харків, Україна