

УДК 623.618:623.74:004.94:527. 6

Г. А. Дробаха, В. Е. Лісіцин

## ФОРМУВАННЯ ТРАСИ ПОЛЬОТУ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ З ФОТОГРАФУВАННЯ МІСЦЕВОСТІ

*Розглянуто підхід до автоматичного формування на електронній карті траси польоту безпілотного літального апарата. Подано методику розрахунку інтегральної зони обмежень на польоту літального апарата за допомогою оверлейних операцій та буферного аналізу, які виконуються у геоінформаційній системі. Запропоновано використання R-функцій для отримання рівняння опису траси.*

*К л ю ч о в і с л о в а: оверлейні операції, траса Д'юбинса, геоінформаційна система, безпілотний літальний апарат, R-функції.*

**Постановка проблеми.** Планування траси автоматичного польоту безпілотного літального апарата (БПЛА) за визначеною програмою потребує великих обсягів інформації про маршрут і стан території, над якою планується виконувати політ, про висотні, швидкісні та аеродинамічні характеристики літального апарата, технічні характеристики та можливості знімальної апаратури тощо.

У статті розглядається БПЛА, виконаний за літаковою або вертолітною (мультикоптерною) аеродинамічними схемами, який виконує завдання обльоту певної території з метою спостереження та фотографування. Апарат рухається повністю за програмою або їм керують дистанційно на деяких фрагментах траси.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вплив аеродинамічних характеристик та компоновки планера новітніх БПЛА на вигляд траси польоту не достатньо висвітлено у сучасній літературі. Тому для розрахунку маневру та траєкторії розвороту апаратів, корпус яких виконаний за класичною літаковою схемою, можливо використовувати аеродинамічні моделі, що застосовують для великих літаків [1]. Для мультикоптерної компоновки планера з урахуванням можливих поправок застосовуватимуться аеродинамічні моделі гелікоптера. Розрахункові моделі, що формують трасу БПЛА, наведено у [2]. Оптимізація маршруту за критеріями мінімальної тривалості польоту або довжини траси може бути здійснена за допомогою підходу, поданого у праці [3].

**Виклад основного матеріалу.** Існує низка загальних вимог до формування траси польоту БПЛА:

- оператор БПЛА зобов'язаний повністю виконати польотне завдання з фотографування та спостереження визначеної ділянки місцевості;
- БПЛА не повинен віддалятися від точки старту на відстань, що перевищує дальність радіозв'язку із системою його керування або унеможливує приймання та передавання з борту літака телеметричної інформації та зображення місцевості;
- уникнення можливості втрачання зв'язку з БПЛА внаслідок зникнення сигналу у районах з інтенсивними перепадами висот рельєфу або міських багатоповерхових забудов;
- у разі виконання польоту на надмалих висотах, майже впритул до рельєфу місцевості, уздовж траси польоту, необхідно враховувати природний рельєф місцевості, висоти будівель, наявність ліній електропередач.

Очевидно, що деталізація знімка, отриманого при фотографуванні у польоті, напряму залежить від висоти фотографування та коефіцієнта збільшення знімка у оптичній системі фотокамери. Замість коефіцієнта збільшення зручно використовувати фокусну відстань об'єктива. Тоді масштаб зйомки можна визначити як

$$m_3 = \frac{h}{f}, \quad (1)$$

де  $h$  – висота фотографування з борту БПЛА;  $f$  – фокусна відстань, яку було встановлено у цифровій камері у момент зйомки.

При обльоті території необхідно враховувати ширину зони спостереження  $b$ , яка за фіксованого значення фокусної відстані  $f$  фотокамери залежить від висоти фотографування  $h$  та кута обзору об'єктива  $\alpha$  (рис. 1).

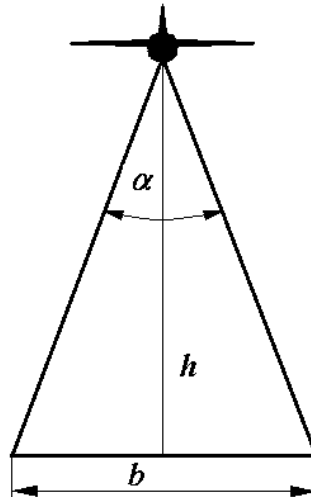


Рис. 1. Ширина зони спостереження БПЛА

Ширина зони спостереження  $b$  може бути розрахована за такою формулою:

$$b = 2 \frac{h}{\operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}. \quad (2)$$

Польотне завдання для фотографування великої площини може потребувати формування кількох паралельних маршрутів БПЛА для повного спостереження визначеної території. Якщо при цьому знадобиться фотознімання із певним поздовжнім перекриттям (подальше складання фотоплану з отриманих знімків, створення стереопар тощо), то значення ширини зони спостереження  $b$  на кожному з паралельних маршрутів має бути зменшено на відсоток, який дорівнює відсотку перекриття знімків. Наприклад, якщо загальна ширина зони спостереження  $L = 2000$  м, ширина зони спостереження, розрахована за формулою (2),  $b = 400$  м, а відсоток поздовжнього перекриття маршрутів  $P = 35\%$ , то для обльоту всієї території потрібно сформуванати таку кількість  $N$  паралельних маршрутів польоту БПЛА:

$$N = \frac{L}{b - \left(b \frac{P}{100}\right)} = \frac{2000}{400 - \left(400 \frac{35}{100}\right)} = 7,69 \sim 8.$$

Можливий вигляд трас, побудованих за зазначеними умовами, показано на рис. 2.

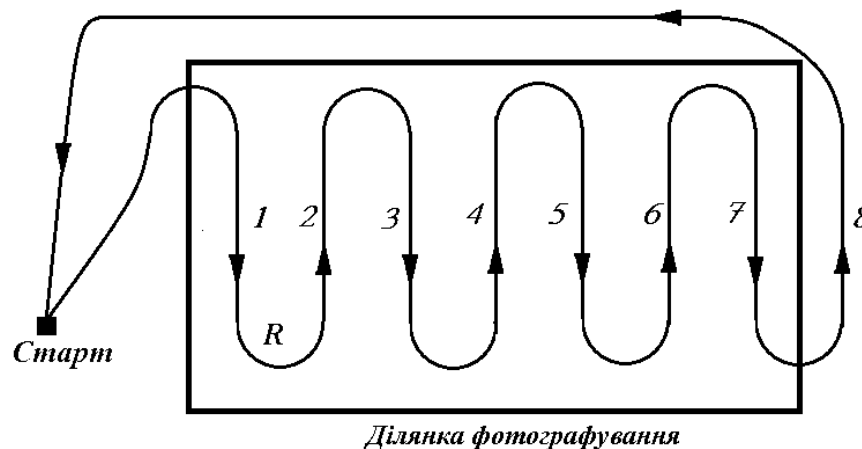


Рис. 2. Траси обльоту території, розраховані за умовами певного перекриття знімків

Перехід на рис. 2 з однієї траси на іншу здійснюється при виконанні розвороту літального апарата. Радіус  $R$  такого розвороту залежить, перш за все, від аеродинамічної схеми, за якою виконаний корпус БПЛА [4]. Для мультикоптерної схеми характерні зависання у польоті над однією точкою та можливість після цього різкої зміни напрямку руху (траса у вигляді ламаної лінії, коли радіус розвороту між сусідніми трасами взагалі відсутній). При формуванні траси автоматичного або напівавтоматичного польоту БПЛА, корпус якого виконаний за схемою літака, слід враховувати обмеження, які накладаються на радіуси розвороту, обумовлені діючими на корпус літака силами.

Радіус віражу БПЛА

$$r = \frac{V^2}{g \cdot \operatorname{tg} \gamma}, \quad (3)$$

де  $V$  – швидкість літального апарата;  $\gamma$  – кут проекції на вертикальну вісь координат підйомної сили.

Перевантаження на віражі

$$n = \frac{Y}{G} = \frac{1}{\cos \gamma}, \quad (4)$$

де  $Y$  – підйомна сила літального апарата;  $G$  – сила тяжіння літального апарата;  $\gamma$  – кут проекції на вертикальну вісь координат підйомної сили.

Розглянемо обмеження, за якими БПЛА не може здійснювати польоти над певними ділянками території. Це можуть бути ділянки, на яких відсутність радіозв'язку із літальним апаратом є наслідком екранування сигналів об'єктами природного рельєфу або будівлями, а також дії радіозавад від штучних джерел потужного електромагнітного випромінювання тощо. Створені без урахування цих умов траси (рис. 2) перетинатимуться із ділянками заборони польотів (зони закриття), і необхідно буде їх коректувати при проектуванні (рис. 3).

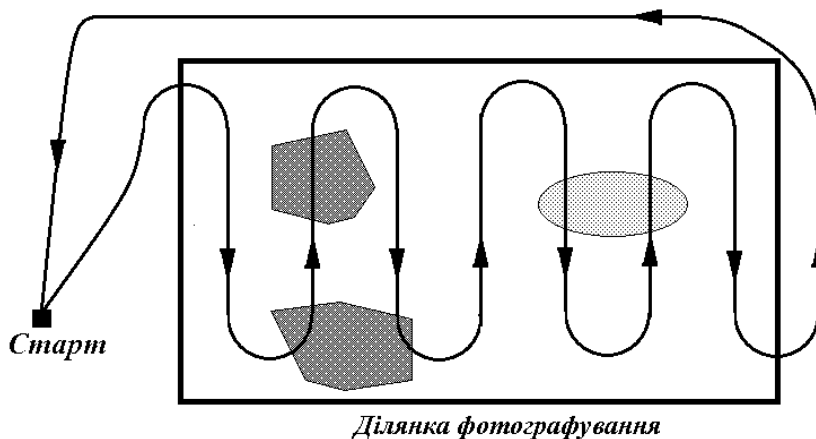


Рис. 3. Ділянки, над якими політ БПЛА заборонено

На цьому етапі проектування траси польоту доцільно скористатися можливостями електронної карти та геоінформаційних систем (ГІС). Потужні можливості геопросторового аналізу, автоматичних вимірів, буферних та оверлейних операцій дозволяють створювати у ГІС інструменти автоматичного формування траси польоту БПЛА.

У автоматичному або напівавтоматичному режимах польоту БПЛА траса польоту складається з окремих точок, які послідовно наносяться на електронну карту та зберігаються у оперативній пам'яті системи керування БПЛА протягом усього польоту. Покажемо, як на електронній карті ГІС за допомогою таких точок і буферних та оверлейних операцій створюється інтегральна зона спостереження уздовж трас, що плануються.

Електронна карта створюється у проекції Пулково-1942 (Гауса – Крюгера), яка, на відміну від географічної проекції WGS-84, мінімізує спотворення розмірів, масштабів та форм; об'єкти у цій проекції мають природний вигляд.

Використовуючи інформацію про польотні обмеження, розраховуємо потрібну кількість трас, з урахуванням ширини зони спостереження уздовж окремої траси (2), та радіуси розвороту при здійсненні переходу від однієї траси на іншу (3). Тепер треба виконати кілька кроків безпосередньо у ГІС.

Перший крок – на електронній карті створюємо новий лінійний шар, у якому зберігатимуться сегменти трас. Будуємо на карті безперервну лінію трас.

Другий крок – навколо безперервної лінії трас будуємо буферну зону завширшки  $\frac{1}{2}b\frac{P}{100}$ , де  $P$  – відсоток перекриття із сусідніми знімками;  $b$  – ширина зони спостереження. Зберігаємо побудовану зону як окремі полігональний шар електронної карти.

Третій крок – створюємо новий полігональний шар, який міститиме зони, заборонені для польоту БПЛА. Будуємо ці зони.

Застосуємо оверлейні операції, щоб отримати інтегральну зону можливого польоту БПЛА над територією фотографування (надалі – інтегральна зона польоту) з урахуванням геопросторових обмежень. Приклад побудови такої інтегральної зони на електронній карті ГІС показано на рис. 4.

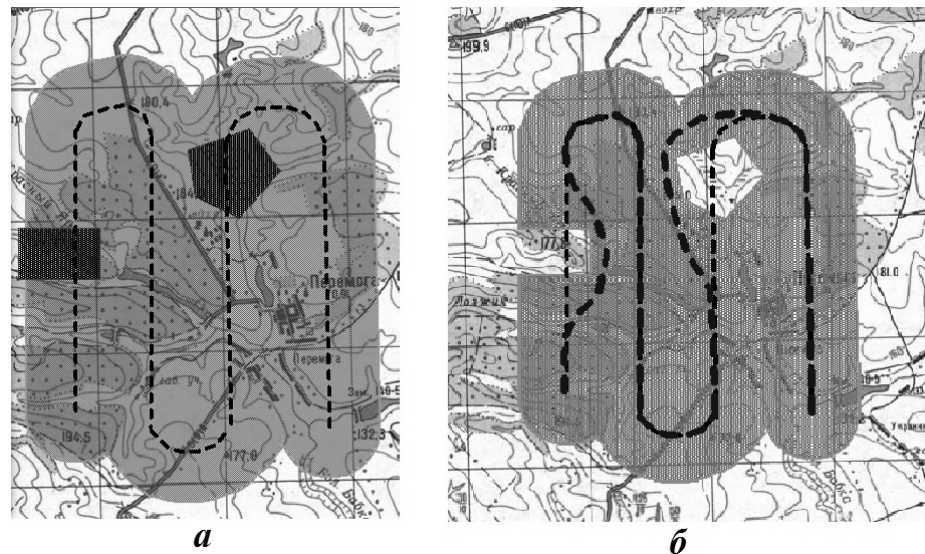


Рис. 4. Побудова інтегральної зони польоту:  
*a* – зона закриття та буферні зони, побудовані навколо вихідної траси; *б* – інтегральна зона польоту та скорегована траса

На практиці інтегральна зона може бути отримана як результат віднімання шару, що містить зони обмежень польоту  $B$ , від шару  $A$ , створеному з буферної зони спостереження навколо первинної траси. Це відповідає логічній операції віднімання двох шарів, у результаті якої на карті створюється новий шар  $S$ , який є результуючою інтегральною зоною польоту з урахуванням зон закриття:

$$S = A \text{ AND } (\text{NOT } B). \quad (5)$$

Після застосування такого підходу будується скорегована траса. У даному прикладі було враховане тільки одне геопросторове обмеження – зони, які заборонені для польоту БПЛА. Термін “геопросторові” використовується у тому контексті, що об’єкти, які визначають обмеження, можуть бути створені на електронній карті у вигляді точок, ліній, полігонів тощо. У реальності геопросторових обмежень може бути набагато більше. Тоді доцільно створити формальний покроковий опис логіки побудови буферних зон, виконати для них оверлейні операції, збереження і додавання на електронну карту шарів, які створюються у результаті такої побудови. Для цього скористаємося експертною системою геопросторового, буферного та оверлейного аналізу, яка входить до складу ГІС “Інструмент”. У автоматичному режимі ця система дозволяє виконувати такі операції:

- формувати геопросторові запити до об’єктів карти за критерієм відстаней або взаємного їх розташування та виділяти відповідні об’єкти;
- формувати за атрибутами шарів SQL-запити до об’єктів карти та виділяти відповідні об’єкти;
- будувати за означеними критеріями буферні зони навколо об’єктів і перетворювати ці зони у шари карти;
- здійснювати оверлейні операції з шарами карти та виділеними об’єктами;
- зберігати результати у вигляді шарів та додавати їх на карту.

На рис. 5 показане дерево рішень, сформоване в експертній системі для автоматичної побудови інтегральної зони польоту за умовою врахування обмежень на зони закриття для польоту БПЛА.

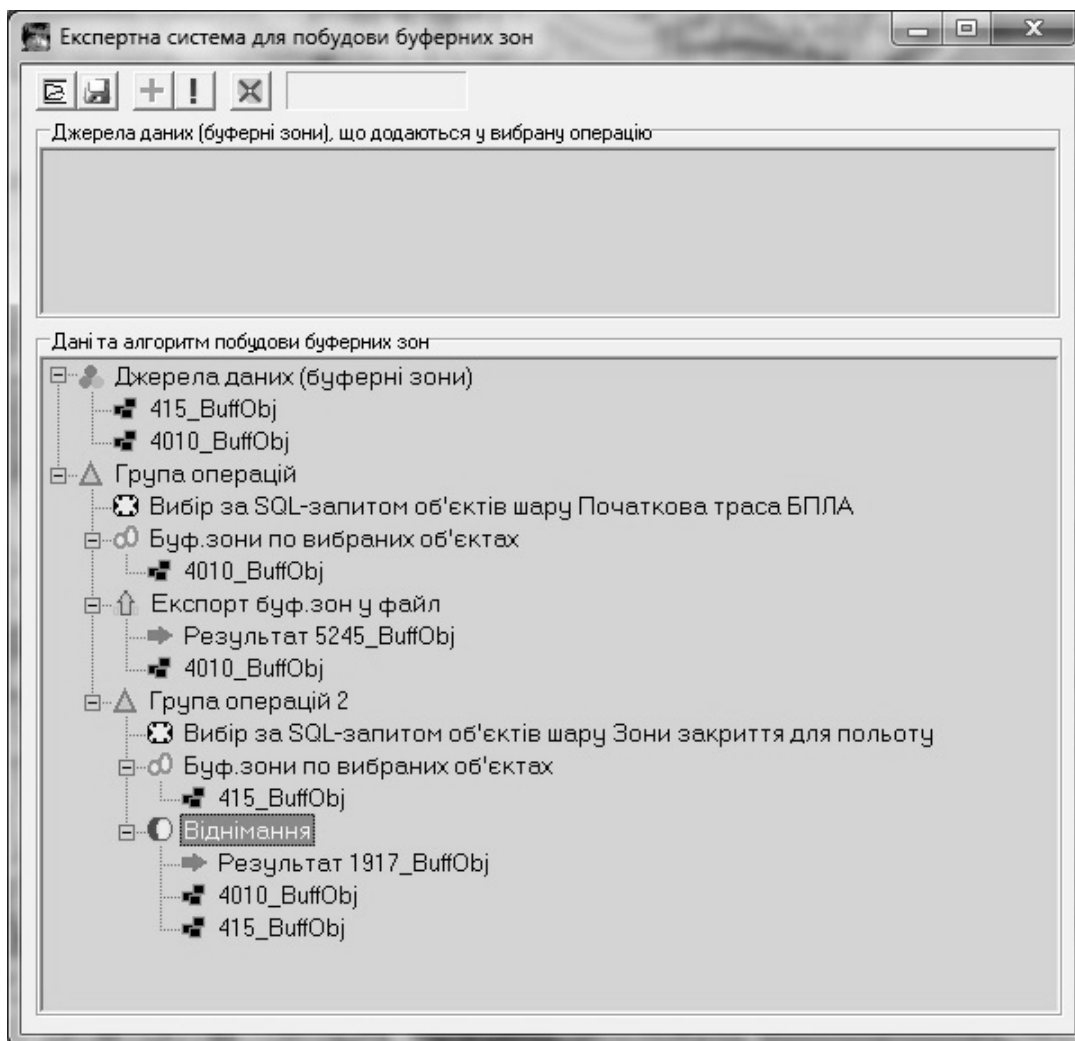


Рис. 5. Автоматична побудова інтегральної зони польоту БПЛА з урахуванням обмежень на зони закриття

В експертній системі ГІС “Інструмент” дерево рішень будується таким чином, що результати, отримані на попередньому кроці, стають вихідними даними для наступних операцій – створюється так званий конвеєр операцій. У результаті буде отримано складну область, яка може складатися з кількох окремих частин. Траса БПЛА, побудована всередині цієї області, цілком відповідає геопросторовим обмеженням, геометрія та логіка побудови яких була визначена в експертній системі.

На наступному етапі треба модифікувати вихідну трасу таким чином, щоб вона повністю проходила всередині побудованої зони спостереження, не виходячи за її межі.

Розглянемо загальну математичну постановку задачі для формування траси БПЛА у площині електронної карти. Припустимо, що БПЛА 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 масив опорних точок траси, що проектується. Знаходження БПЛА у певній опорній точці, кількість опорних точок та їх координати обумовлені польотним завданням літального апарата. Кожна опорна точка визначається [2] як елемент масиву

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

де  $x, y, z$  – координати поточної точки в системі електронної карти;  $\theta, \varphi$  – кути орієнтування літального апарата у поточній точці відповідно для вертикальної та горизонтальної площини.

Додавання у опис опорної точки траси БПЛА двох кутів обумовлено тим, що вкрай важливим є кутове орієнтування БПЛА у просторі. Наприклад, якщо у точці посадки БПЛА літакової аеродинамічної конструкції буде розвернутий хвостовим оперенням уперед, то, скоріш за все, він зазнає аварії. Для мультикоптерів цей приклад менш актуальний, але і для них існують ситуації, коли важливо контролювати кути орієнтування у просторі.

Узагальнена математична модель створення траси БПЛА має такий вигляд:

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

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

Серед обмежень у неявному вигляді в формулі (7) можуть бути обмеження на ширину зони спостереження уздовж траси та її можливого перекриття із зонами сусідніх трас, наявність зон закриття на трасі обльоту, обмеження на радіус розвороту при виконанні літаком віражу. Вони були розглянуті раніше.

Розглянемо два фрагменти траси, що створюється для БПЛА за масивом опорних точок (рис. 6).

Зрозуміло, що у реальному житті траса, зображена на рис. 6, а, не можлива для БПЛА, виконаного за аеродинамічною схемою літака. По-перше, існує інерційність при пересуванні у повітрі тіла певної ваги, тобто вказана зміна напрямку руху у точці 2 призведе до колосальних динамічних навантажень на корпус літального апарата. По-друге, елементи керування БПЛА не спроможні виконати такий перехід за нескінченно малий проміжок часу. Але для мультикоптера така траса не є незвичною, враховуючи його можливість зависання у повітрі над певними точками місцевості. З іншого боку, траса, яка зображена на рис. 6, б, формує плавний віраж літака за допомогою так званої траєкторії Д'юбинса (Dubinspath). У праці [2] сформульовані графоаналітичний та матричний методи розрахунку траєкторій Д'юбинса для двох випадків (рис. 7).

З урахуванням геопросторових обмежень формується низка можливих рішень, з котрих оператору необхідних вибрати найбільш, на його погляд, прийнятне (див. рис. 8).

В інтерактивному режимі в ГІС "Інструмент" можуть бути застосовані також засоби вимірювання відстаней та площин для врахування обмежень на довжину траси і загальну тривалість польоту.

Після того як на електронній карті сформована група можливих трас польоту у вигляді траєкторій Д'юбинса і здійснено вибір однієї з них, постає питання: яким чином отримати математичний опис цієї траси у вигляді рівняння? Воно може бути використане для внесення параметрів траси безпосередньо у систему керування БПЛА для виконання польоту та контролю точності руху літального апарата. Траєкторія Д'юбинса, яку вибрано, складається з набору вузлових точок та елементарних сегментів (дуги та прямі лінії), які з'єднуються у певній послідовності. Все це складає логіку геометричної побудови траси, для опису останньої у вигляді рівняння пропонується використати математичний апарат  $R$ -функцій [5].

Для цього зробимо деякі припущення. По-перше, польотна траса має формуватися у вигляді замкненої кривої. Якщо точка старту не співпадає з точкою зльоту, то додаємо у трасу ще кілька

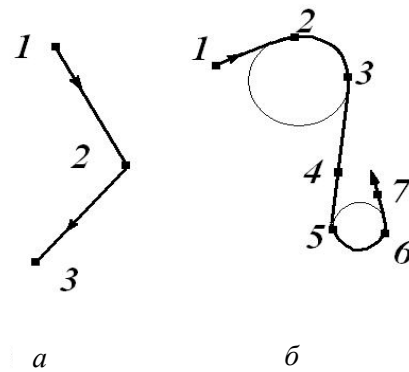


Рис. 6. Два фрагменти траси під час розвороту БПЛА:  
а – опорні точки з'єднані прямолінійними сегментами; б – опорні точки 2, 3, 5, 6 є дотичними до відповідних кіл

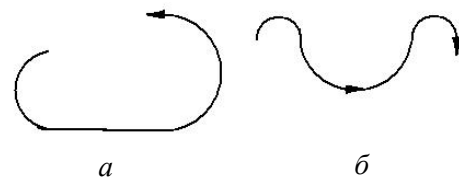


Рис. 7. Два типи траєкторій Д'юбинса для БПЛА:  
а – побудована на фрагментах двох кіл та лінійного сегмента; б – побудована на фрагментах трьох кіл



Рис. 8. Можливі траси, побудовані за допомогою траєкторій Д'юбинса (чорним кольором показано дві зони, в яких політ заборонено)

послідовних сегментів, які замикають її, з'єднуючи початкову та кінцеву точки. Наступне припущення вимагає, щоб уздовж траси були відсутні самоперетинні або взаємоперетинні сегменти. Третє припущення полягає в тому, що сегментами траєкторії Д'юбинса можуть бути тільки елементарні геометричні фігури – дуги кіл та відрізки прямих ліній. Ця умова була закладена вже на етапі проектування траси (див. рис. 7).

Виходячи з того, що крива, яка формує трасу, є замкненою, на електронній карті вона визначає полігональний об'єкт. Сформулюємо завдання контролю місцеположення літального апарата таким чином: БПЛА у польоті має знаходитися якнайближче до ребер такого полігону. Визначимо на площині функцію двох координат  $F(x, y)$ , яка набуває негативного значення, якщо БПЛА знаходиться зовні означеного полігону, позитивного значення, коли БПЛА знаходиться всередині полігону, та нульового значення при пересуванні мережею полігону. Тоді контроль місцезнаходження БПЛА у двовимірному просторі зводиться до того, щоб, отримавши поточні координати літального апарата, здійснити їх підстановку у функцію  $F$  та оцінити її значення. У разі відмінності цього значення від 0, система контролю виконання польоту за програмою передає команду в систему керування літальним апаратом та змінює координати таким чином, щоб мінімізувати абсолютне значення функції

$$|F(x, y)| \rightarrow 0. \quad (8)$$

Використовуючи третє припущення щодо вигляду сегментів траси, визначимо логіку побудови полігону, створеного сегментами траси. Розглянемо, наприклад, найпростішу трасу, наведену на рис. 9.

Полігон, який побудований за трасою польоту, визначається опорними точками  $a, b, c, d, e, f, g$  та радіусом  $R$  півкола. На площині цей полігон може бути описаний за допомогою шести напівплощин  $D_1 \dots D_6$  та кола  $D_7$  радіусом  $R = 1$ , які визначаються системою нерівностей

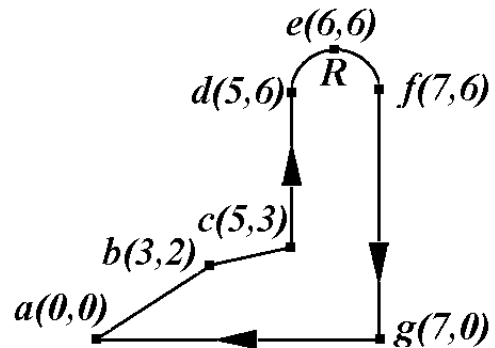


Рис. 9. Приклад траси, побудованої за допомогою траєкторій Д'юбинса

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= -2x + 3y \leq 0 \\ D_2 &= -x + 2y - 1 \leq 0 \\ D_3 &= x \geq 5 \\ D_4 &= y \leq 6 \\ D_5 &= x \leq 7 \\ D_6 &= y \geq 0 \\ D_7 &= x^2 + y^2 - 1 \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Область  $D$ , яка є результуючим полігоном, визначається у діз'юнктивній нормальній формі такою логікою побудови:

$$D = (D_3 \wedge D_4 \wedge D_5 \wedge D_6) \vee D_7 \vee (D_1 \wedge D_2 \wedge D_5 \wedge D_6). \quad (10)$$

У праці [5] для опису на площині складних геометричних областей пропонується система  $R$ -функцій дійсних аргументів (координати  $x, y$ ). Такі функції набувають позитивного чи негативного значення залежно від логіки побудови області та факту потрапляння чи не потрапляння точки з координатами  $(x, y)$  в область. Таким чином, моделюється поведінка логічних функцій – кон'юнкції, діз'юнкції, логічного заперечення тощо. У формулі (10) окремі аргументи поєднуються за допомогою діз'юнкції. Самі ж аргументи можуть складатися з елементів або їх логічних заперечень, можливо поєднаних операціями кон'юнкції. Для формалізації побудови складних областей у такому випадку в публікації [5] пропонується система  $R$ -функцій такого вигляду:

$$\left. \begin{aligned} z_1 \wedge z_2 &\equiv \frac{1}{2} \left( z_1 + z_2 - \sqrt{z_1^2 + z_2^2 - 2z_1z_2} \right) \\ z_1 \vee z_2 &\equiv \frac{1}{2} \left( z_1 + z_2 + \sqrt{z_1^2 + z_2^2 - 2z_1z_2} \right) \\ \bar{z} &\equiv -z \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Рівняння полігону у кінцевому вигляді складається з багатьох елементів. Покажемо, наприклад, як за допомогою рівнянь (11) може бути описана область  $D_8 = D_1 \wedge D_2$ :

$$D = D_1 \wedge D_2 = \frac{1}{2} \left( -2x + 3y - x + 2y - 1 - \sqrt{(-2x + 3y)^2 + (-x + 2y - 1)^2 - 2(-2x + 3y)(-x + 2y - 1)} \right).$$

Послідовно застосовуючи такий підхід, отримаємо рівняння полігональної області. У разі знаходження БПЛА безпосередньо на границях описаного полігону,  $R$ -функція, яка відповідає логіці побудови області, описаної рівнянням (10), набудатиме нульового значення. Якщо ж знак  $R$ -функції змінюється, система контролю польоту літального апарата повинна надіслати команду керуючим механізмам БПЛА на зміну його поточних координат таким чином, щоб мінімізувати абсолютне значення  $R$ -функції.

### Висновки

Запропонований підхід до відповідності поточних координат знаходження літального апарата програмі польоту БПЛА потребує складання рівняння траси та врахування багатьох геопросторових обмежень. Кінцеве рівняння, що описує трасу, у більшості випадків містить багато елементів і не є наочним, але воно легко формалізується та програмується у системі керування літального апарата. Також в оболонці ГІС можливо створити інструменти для автоматичної побудови рівнянь, що описують логіку побудови траси та геопросторові обмеження у вигляді зон закриття для польотів.

Доцільно реалізувати так званий планувальник трас БПЛА у вигляді окремого модулю ГІС "Інструмент". Кінцевою інформацією, яку видаватиме планувальник, буде масив опорних точок уздовж траси, що визначаються просторовими координатами та кутами орієнтування. Це дозволить уніфікувати процес підготовки польотних даних.

### 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. Sourdos, A. Cooperative path planning for unmanned aerial vehicles [Текст] / A. Sourdos, B. A. White, M. Shanmugavel. – West Sussex, UK : Wiley, 2011. – 190 p.
3. Диаграмма Вороного [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [https://ru.wikipedia.org/wiki/Диаграмма\\_Вороного](https://ru.wikipedia.org/wiki/Диаграмма_Вороного) (дата звернення: 20.06.15). – Назва з екрана.
4. Дробаха, Г. А. Формування траси польоту безпілотного літального апарата під час планування розвідувальних операцій [Текст] / Г. А. Дробаха, В. Е. Лісіцин // Честь і закон. – 2015. – № 4. – С. 68 – 75.
5. Рвачев, В. Л. Геометрические приложения алгебры логики [Текст] / В. Л. Рвачев. – К. : Техніка, 1967. – 212 с.

*Стаття надійшла до редакції 05.04.2016 р.*

**УДК 623.618:623.74:004.94:527. 6**

**Г. А. Дробаха, В. Э. Лисицин**

### **ФОРМИРОВАНИЕ ТРАССЫ ПОЛЕТА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЗАДАНИЯ ПО ФОТОГРАФИРОВАНИЮ МЕСТНОСТИ**

*Рассмотрен подход к автоматическому формированию на электронной карте трассы полета беспилотного летательного аппарата. Представлена методика расчета интегральной зоны ограничений на полеты летательного аппарата при помощи оверлейных операций и буферного анализа, выполняемого в геоинформационной системе. Предложено использование R-функций для получения уравнения, описывающего трассу.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а:* оверлейные операции, трасса Дьюбинса, геоинформационная система, беспилотный летательный аппарат, R-функции.

**UDC 623.618:623.74:004.94:527. 6**

**G. A. Drobakha, V. E. Lisitsin**

### **PLANNING OF UNMANNED AERIAL VEHICLE TRACE FOR AEROPHOTOGRAPHY TASKS**

*Automatic trace creating in digital maps for unmanned aerial vehicle is revealed. Method of calculation for integral limitation zone for unmanned aerial vehicle trace with the help of overlay an buffering analysis operations in geographical information system is proposed. Using of R-functions for formalization of trace equation is suggested.*

*К e y w o r d s:* overlay operations, Dubins trace, geographical information system, unmanned aerial vehicle, R-functions.

**Дробаха Григорій Андрійович** – доктор військових наук, професор, головний науковий співробітник науково-дослідного центру службово-бойової діяльності НГУ Національної академії Національної гвардії України.

**Лісіцин Володимир Едуардович** – науковий співробітник науково-дослідного центру службово-бойової діяльності НГУ Національної академії Національної гвардії України.