

Юрій Григорович Даник (доктор техн. наук, професор)¹

Ігор Іванович Балицький (канд. техн. наук, доцент)²

¹Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ, Україна

²Національна академія Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького, Хмельницький, Україна

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОВІТРЯНОГО МОНІТОРІНГУ МІСЦЕВОСТІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

З метою підвищення ефективності моніторингу (зондування) місцевості із застосуванням безпілотних літальних апаратів запропонована методика визначення раціональних траєкторій їх польоту при виконанні задач із спостереження за ділянками місцевості, об'єктами, тощо та їх оперативного корегування. Для вирішення цього питання розроблена та розглянута, на прикладі вирішення задач по охороні державного кордону, модель спостереження за ділянкою місцевості на основі якої запропонований показник ефективності здійснення спостереження з безпілотного літального апарату при його знаходженні в різних точках повітряного простору. Запропонована методика розрахунку введеного показника ефективності моніторингу.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, ефективність моніторингу, прогнозування, траєкторія, спостереження, місцевість, методика.

Вступ

Постановка проблеми. Оскільки безпілотні літальні апарати (БПЛА), в більшості, використовуються для ведення спостереження (розвідки), а в Державній прикордонній службі України (ДПСУ) для виконання завдань повітряного моніторингу державного кордону (ПМДК) [1], вибір раціональних траєкторій польоту БПЛА має здійснюватись виходячи з ефективності результатів спостереження за визначеною для контролю ділянкою місцевості. При цьому необхідно враховувати цілий ряд факторів, які включають: потребу уникнення зіткнення зі статичними та динамічними (рухомими) об'єктами, перешкоджаючий для спостереження вплив рельєфу місцевості, залежність ефективності результатів спостереження від характеристик цільового навантаження, а при застосуванні БПЛА для ПМДК – недопущення його польоту над суміжною територією.

З точки зору польоту по різних траєкторіях ефективність результатів спостереження визначених ділянок буде також різною. Тому необхідно визначити такі траєкторії польоту БПЛА (та їх корекції в процесі виконання завдань, у разі необхідності), які забезпечують максимальну ефективність результатів спостереження.

При визначенні оптимального для забезпечення заданої якості результатів спостереження діапазону висот, враховується залежність від висоти польоту розмірів смуги розвідки та лінійної роздільної здатності. Окрім того, враховується, що при польоті на невеликій висоті значний перешкоджаючий вплив на спостереження матимуть нерівності рельєфу. За таких умов,

також, необхідне уникнення значної кількості статичних перешкод (башт, високих будівель, тощо), а також різних рухомих повітряних перешкод.

Тому виникає необхідність в такому збільшенні висоти польоту при якій площа огляду зростатиме, а роздільна здатність (деталізація) зменшуватиметься не нижче рівня, за якого отримані результати спостережень забезпечують вирішення задачі з прийнятною якістю. Тобто, роздільна здатність буде достатньою, а ефективність спостереження (за рахунок охоплення більших площ і меншому перешкоджаючому впливу рельєфу) зростатиме. Однак при досягненні певної висоти, роздільна здатність зменшиться нижче порогу ефективного розпізнавання цілей (об'єктів), що негативно впливатиме на ефективність моніторингу. Виходячи з цього, існує певний діапазон висот польоту БПЛА в межах якого забезпечуватиметься ефективне спостереження за визначеною ділянкою місцевості.

Якщо розглядати ефективну траєкторію в горизонтальній площині, можливо припустити, що вона пролягатиме, наприклад, по середині прикордонної смуги в межах якої потрібно забезпечити спостереження. Однак вплив рельєфу та форми лінії державного кордону може привести до певного викривлення цієї лінії. Для точного визначення траєкторії для ефективного моніторингу визначеної місцевості необхідно оцінити його ефективність для кожної точки досліджуваного повітряного простору (з відповідним кроком). Одним з важливих завдань в цьому контексті і є визначення траєкторій польоту БПЛА, які є раціональними з точки зору виявлення потенційних цілей, з врахуванням тактико-

технічних характеристик (ТТХ) самих БПЛА і особливостей задач, які ними вирішуються.

Отримані з використанням такого підходу результати забезпечують вибір траєкторій польоту БПЛА найбільш прийнятних з точки зору збільшення ймовірності виявлення цілей за умови, що інші показники знаходяться в допустимих межах. Методика та отримані результати моделювання польоту БПЛА з різними ТТХ дозволяють вибрати для виконання завдань ті з них, що забезпечують максимальну ефективність спостереження за умови задоволення інших вимог.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Оцінці ефективності аеророзвідки з використанням для спостереження різного обладнання присвячена значна кількість досліджень. Оскільки останнім часом для отримання зображень значного поширення отримало цифрове обладнання, у працях [2–5] значна увага приділена вивченню впливу роздільної здатності цифрових камер на ефективність виявлення і розпізнавання цілей. При цьому здійснюється оцінка ефективності спостереження по всій площі зображення. Однак використання БПЛА в задачах охорони кордону вимагає особливої постановки задачі оцінки ефективності аеророзвідки. Зокрема, для охорони кордону необхідним є виявлення порушників в межах смуги прикриття, яка має складну форму.

Для встановлення залежності ймовірності виявлення цілі засобом спостереження від відстані до неї в певних умовах спостереження на основі експериментальних досліджень з встановленням статистичних характеристик відомим є застосування методики [5]. Проте, при застосуванні БПЛА необхідно встановити залежність між кількістю пікселів на які відбувається відображення цілі на матриці камери, яка є різною для різних частин загального зображення.

Дослідження ефективності застосування різних засобів спостереження прикордонного відомства проводились у роботах [6–9]. З цієї метою у цих працях використаний принцип оцінки частки площі смуги перекриття складної форми на якій забезпечене ефективне використання систем спостереження. При цьому враховувався загороджуючий вплив рельєфу місцевості. Однак при проведенні такої оцінки ймовірність виявлення цілей в певних умовах спостереження визначалась лише від відстані до неї. При використанні БПЛА необхідно врахувати той факт, що при віддаленні від центру цифрового зображення відстань до об'єктів змінюється. Потребує також оцінки залежності кількості пікселів об'єкту на зображенні камери від його положення та точки знаходження БПЛА з подальшим визначенням ймовірності виявлення цієї цілі в певних умовах спостереження. Також у працях [5–9] не врахований перешкоджаючий для спостереження вплив рослинності в різні пори року. Наявність інформації про рослинний покрив місцевості у геоінформаційній системі ДПСУ робить можливим таке урахування.

Мета статті – розробка методики оцінки

ефективності повітряного моніторингу (зондування) місцевості із застосуванням безпілотних літальних апаратів в залежності від особливостей місії і місцевості де вона виконується, умов в яких здійснюється її виконання та ТТХ БПЛА.

Виклад основного матеріалу дослідження

Однією з важливих передумов забезпечення якісної охорони кордону є ефективна побудова і функціонування систем спостереження з метою виявлення порушень законодавства з прикордонних питань. З цієї метою доцільно поставити питання визначення раціонального маршруту польоту БПЛА для здійснення ПМДК. Слід враховувати, що в залежності від маршруту польоту БПЛА буде забезпечуватись різна ефективність спостереження, яка в загальному випадку, буде залежати від значної кількості факторів. Окрім цього, на політ БПЛА накладатиметься комплекс обмежень загального характеру (без урахування певних льотних особливостей БПЛА обумовлених їх конструктивними характеристиками), які, зокрема, визначатимуться безпековим середовищем. Також, на ефективність ПМДК суттєво впливатиме висота польоту БПЛА. Це обумовлює необхідність розгляду задачі у тривимірному просторі.

Отже, задачу визначення раціональної траєкторії польоту БПЛА можна визначити (рис. 1), як пошук множини точок M у тривимірному просторі, які поєднують початкову точку маршруту A з кінцевою B . При цьому має забезпечуватись умова:

$$\forall (x_m, y_m) \in M, (x_m, y_m) \notin Z.$$

Тобто будь-яка точка маршруту не має належати до заборонених областей. При цьому, множина M має бути обрана таким чином, щоб максимізувати ефективність спостереження за визначеною смугою контролю.

Множина Z має формуватись виходячи з питань забезпечення безпекового середовища при польоті БПЛА та з урахуванням обмежень щодо виконання задач з охорони кордону.

Важливим аспектом знаходження раціонального маршруту є оцінка ефективності спостереження при польоті БПЛА. При проведенні такої оцінки слід врахувати комплекс факторів, що впливають на цю ефективність та розробити відповідну методику.

Вирішення визначеної вище задачі потребує також розвитку науково-методичного апарату пошуку найкоротших шляхів у графах з урахуванням додаткових факторів (заборони окремих вершин, урахування пріоритетності вершин, тощо). Існуючі методи орієнтовані на пошук шляхів у звичайних графах. Аналіз планарних графів (з ребрами що поєднують вершини у двовимірному просторі) є більш складним завданням, для вирішення якого розроблена низка методів, які постійно вдосконалюються. Однак вирішення описаного вище завдання потребує побудови маршруту у просторі, що визначає необхідність суттєвого розвитку відповідного науково-методичного апарату (розширення планарного графу до трьохвимірного і формуванні методу пошуку найкоротшого маршруту у ньому).

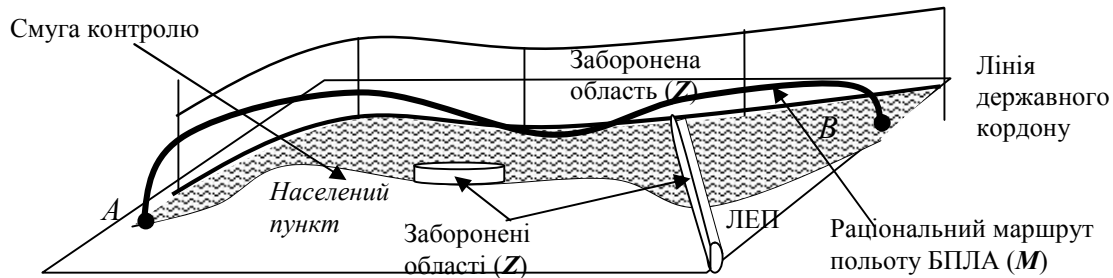


Рис. 1. Схематичний опис задачі визначення раціонального маршруту БПЛА

Як було показано, в задачі визначення раціонального маршруту польоту БПЛА надзвичайно важливим є формування множини заборонених областей Z . Точки, які належать цій множині не можна використовувати в траєкторії польоту БПЛА. При цьому необхідно врахувати дві сукупності факторів: особливості виконання відповідних задач спостереження (для ДПСУ ПМДК) і питання безпеки польоту БПЛА.

Прокладання раціонального маршруту польоту БПЛА для ПМДК робить важливим урахування проходження лінії державного кордону та виключення з простору, в межах якого прокладається маршрут польоту, територій які належать до суміжних держав. Для визначення цих територій можливо використати інформацію геоінформаційних систем (ГІС) (наприклад, ArcGIS, «Гарт-17» ДПСУ). Однак, при такому визначенні складових множини Z потрібно врахувати обмежені можливості БПЛА щодо маневрування і можливість впливу зовнішніх факторів на траєкторію руху БПЛА. З цією метою, в залежності від типу БПЛА, пропонується встановити граничну відстань R_{gr} від лінії державного кордону у бік території України, за межами якої заборонено прокладання маршруту польоту конкретного типу БПЛА. Для остаточного визначення відповідної складової множини Z , яку позначимо Z_1 , пропонується використати базову функцію геообробки ГІС щодо розширення географічно прив'язаних множин (які відповідають території суміжних держав) на відстань R_{gr} (рис. 2).

Слід відмітити, що при урахуванні неможливості польоту БПЛА за межами території України, у тривимірному просторі до множини Z_1 включаються відповідні точки з усіма можливими висотами.

Іншими факторами, які потребують урахування при формуванні множини заборонених областей Z є питання безпеки польоту. З цією метою необхідне розширення даної множини за рахунок включення точок простору, проліт через які є небезпечним. В якості таких небезпечних областей пропонується з використанням ГІС визначити проходження ліній електропередачі, місця розташування веж різного призначення, ділянки які відповідають населеним пунктам та інші. Для кожної з цих областей планується визначити максимальну висоту перешкод (над рельєфом місцевості). Всі точки простору, які відповідають описаним вище перешкодам і висоти яких не перевищують відповідні висоти перешкод, пропонується включити до множини Z . Цю складову множини Z позначимо Z_2 .

$$Z_2 = \bigcup_k (x_k, y_k) \in P_k \cap z_k < h_k, \quad (1)$$

де: k – індекс перешкоди; P_k – множина плоских координат точок, що відповідають k -тій перешкоді; h_k – максимальна висота в межах k -тої перешкоди.

Іншим фактором, який потребує урахування при визначенні небезпечного для польотів простору є планові польоти інших засобів малої авіації. Оскільки ці польоти, звичайно, здійснюються за визначеним розкладом, їх урахування доцільно проводити додатково за необхідності, коли час патрулювання БПЛА збігається з часом польотів цих засобів. При цьому навколо планової траєкторії польоту кожного засобу малої авіації пропонується створити заборонену для польотів зону з радіусом R_{zab} , яка матиме циліндричну форму. Сукупність цих заборонених зон утворюватиме множину Z_3 .

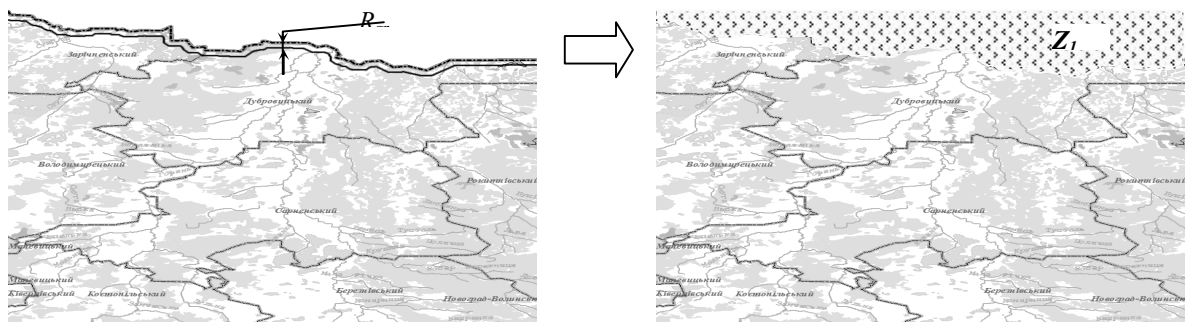


Рис. 2. Використання геообробки при визначенні множини Z

Остаточню, множину Z пропонується визначити, як об'єднання складових небезпечного для польотів простору:

$$Z = Z_1 \cup Z_2 \cup Z_3. \quad (2)$$

Відповідно до загальної постановки задачі визначення маршруту польоту БПЛА, при його побудові необхідно уникнути точок, які належать до множини Z .

При побудові раціональних маршрутів польоту БПЛА необхідне визначення заборонених для польоту областей (множини Z). Однак ще більш важливим є завдання знаходження для кожної елементарної ділянки (сукупності точок простору) значення показника ефективності, який буде визначати траєкторію польоту БПЛА. В багатьох методах пошуку оптимальних маршрутів у планарних графах використовуються показники специфічні для конкретних оптимізаційних задач.

Значення показника у кожній вершині графу визначає доцільність її використання у маршруті. При здійсненні спостереження БПЛА шуканий показник має описувати його ефективність.

Схема оцінки ефективності спостереження з використанням БПЛА який знаходиться в певній точці простору представлена на рис. 3. До лінії державного кордону дотична смуга, в межах якої необхідно здійснювати спостереження. Ця смуга (рис. 3) представлена множиною точок S_0 . БПЛА знаходиться в точці p_0 з координатами (x_0, y_0, h_0) . Припустимо, що ведеться планова розвідка (камера БПЛА спрямована вертикально вниз). За таких умов цією камерою забезпечується огляд області в межах можливої видимості, обумовленої оптичними характеристиками, лінійними розмірами сенсора і висотою h_0 .

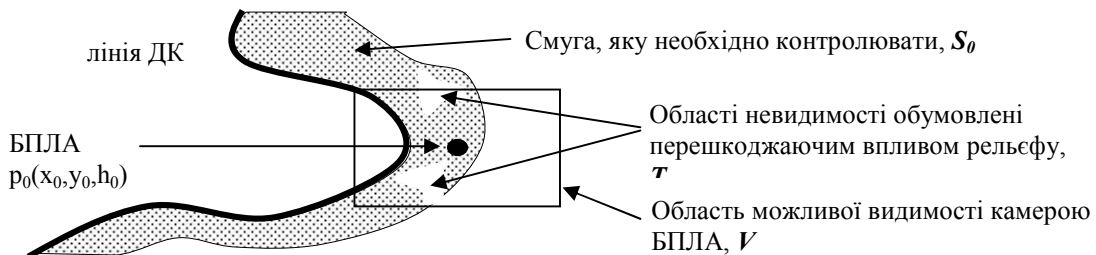


Рис. 3. Схема оцінки ефективності спостереження з використанням БПЛА

Таким чином частка смуги S_0 яка за певних умов може бути доступною для спостереження обмежується множиною $S_0 \cap V$. Для об'єктивної оцінки ефективності спостереження необхідно врахувати перешкоджаючий вплив рельєфу місцевості (рис. 4).

Нерівності рельєфу обумовлюють виникнення області недоступної для спостереження з БПЛА (T). Звичайно ця область залежить від рельєфу місцевості та поточного положення БПЛА ($p_0(x_0, y_0, h_0)$) і може бути визначена з використанням методів геооброки даних в ГІС.

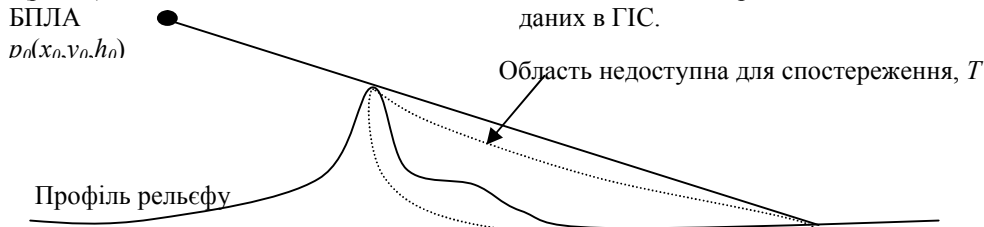


Рис. 4. Перешкоджаючий вплив рельєфу

Отже, з урахуванням вищевикладеного, область спостереження додатково звужується і обмежується множиною $M = S_0 \cap V \cap \bar{T}$.

(рис. 3), щільність заповнення пікселями буде максимальною для точки з координатами (x_0, y_0) . По мірі віддалення від цієї точки, в залежності від Евклідової відстані $\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$, висот h, h_0 , фокусної відстані об'єктива камери та параметрів сенсора камери ця щільність, а відповідно і ймовірність виявлення буде зменшуватись. Позначимо цю ймовірність $p(x, y)$.

Однак ефективність виявлення об'єктів, яку можливо описати відповідною ймовірністю в межах цієї множини не буде сталою. В залежності від координат точки (x, y) в межах множини M , ймовірність виявлення об'єкту пошуку в цій точці буде залежати від його розмірів та щільності його представлення точками растру. Якщо об'єкт пошуку (наприклад людина) буде на зображенні описуватись 1 пікселем, його розпізнати буде неможливо і відповідна ймовірність дорівнюватиме 0. Зі збільшенням кількості пікселів при відображенні об'єкту на поверхні матриці приймача сенсора ймовірність зростатиме і при досягненні певного граничного числа наблизиться до 1. За даної постановки завдання

З урахуванням вищевикладеного, остаточний показник ефективності спостереження з використанням БПЛА можна сформулювати, як

$$E_s(x_0, y_0, h_0) = \frac{\sum_{(x,y) \in M} p(x, y)}{|S_0|}, \quad (3)$$

де: $M = S_0 \cap V \cap \bar{T}$, $|S_0|$ – потужність множини S_0 .

Фізичний зміст даного показника полягає у визначенні доступної для спостереження частки площі смуги, яку потрібно контролювати. Відповідно до такого визначення, показник E_s є нормованим і знаходиться в межах $[0,1]$. Нульове значення показника відповідатиме відсутності спостереження за потрібною ділянкою місцевості. Наближення показника до 1 означає максимально ефективно спостереження з виявленням об'єктів в межах заданої ділянки. Звичайно, реальні значення показника ефективності E_s визначатимуться: складністю рельєфу місцевості, положенням БПЛА в просторі, характеристиками камери спостереження, встановленої на БПЛА та іншими умовами в яких здійснюється спостереження. Практичний розрахунок даного показника потребуватиме: геообробки даних для отримання множини T з метою визначення остаточної множини видимості M . Окрім цього, для розрахунку даного показника в заданих умовах спостереження необхідно визначити функцію $p(x,y)$.

Визначення $p(x,y)$ є складним завданням, в ході вирішення якого потрібно врахувати наступні основні фактори: тип цілі, умови в яких ведеться спостереження (погодні умови, стан атмосфери), освітлення цілі (зокрема пора доби), кількість пікселів поверхні матриці приймача сенсору на яких відображається ціль (nc) та додаткові загороджуючі властивості покриття поверхні (ліс, кущі, населені пункти, тощо). Перешкоджаючий вплив рельєфу врахований при визначенні множини M , в межах якої здійснюється розрахунок загального показника ефективності.

Однак вплив значної кількості інших факторів на процес виявлення приводить до значної невизначеності при розрахунку $p(x,y)$. Тому, для вирішення завдання визначення $p(x,y)$, пропонується використати підхід, аналогічний тому, який в дослідженні [5] застосовується для отримання залежностей ймовірності виявлення цілей засобами спостереження від відстані до неї в певних умовах ведення спостереження. Аналогічний підхід можливо використати для визначення $p(x,y)$ на основі кількості пікселів nc на матриці, на які проєцюється ціль. В теорії ймовірностей для опису випадкових величин використовується закон розподілу, який представляється, зокрема, функцією густини розподілу. В багатьох випадках, за однорідних типових умов досліджуваного процесу, застосовується нормальний закон розподілу. В цьому випадку функція густини розподілу задається двома параметрами: математичним сподіванням m_{nc} і середнім квадратичним відхиленням σ_{nc} . Математичне сподівання визначається впливом контрольованих факторів, середнє квадратичне відхилення – впливом неконтрольованих факторів.

Для розрахунку параметрів розподілу m_{nc} і σ_{nc} можливо для кожного варіанту умов, в яких здійснюється спостереження, провести однорідні дослідження факту виявлення цілі в залежності від

відображення її розміру на матрицю приймача в пікселях. При цьому розмір проєкції цілі на поверхні матриці приймача необхідно поступово збільшувати до забезпечення її виявлення з заданими показниками ймовірності правильного виявлення. Розмір проєкції цілі при її виявленні в i -тому кадрі позначимо nc_i . Такі дослідження слід провести для всіх основних типів цілей. На основі отриманих статистичних результатів, з використанням відомих з математичної статистики та теорії ймовірностей виразів можливо обчислити параметри нормального розподілу наступним чином:

$$m_{nc} = \frac{\sum_{i=1}^n nc_i}{n}, \quad (4)$$

$$\sigma_{nc} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (nc_i - m_{nc})^2}{n}}, \quad (5)$$

де: n – кількість випробувань;
 nc – розмір проєкції цілі в пікселях.

Звичайно, з метою забезпечення достатньої точності кількість статистичних даних n має бути достатньо великою (декілька сотень випробувань).

Відповідно до відомих з теорії ймовірності положень [10], для випадкового процесу в однорідних типових умовах розподіл виявлення цілі описується нормальним законом. Такі умови забезпечуються при обмеженні окремих домінуючих при виявленні цілі факторів. Важливою умовою для застосування нормального закону є незмінність всієї сукупності факторів, що впливають на результат виявлення цілі за досліджуваній проміжок часу.

При використанні нормального закону розподілу, функція густини розподілу має вигляд

$$\rho(x) = \frac{1}{\sigma_{nc}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_{nc})^2}{2\sigma_{nc}^2}} \quad (6)$$

Ймовірність виявлення цілі, при її відображенні N пікселями на матриці приймача відеокамери буде дорівнювати

$$P(N) = \frac{1}{\sigma_{nc}\sqrt{2\pi}} \int_0^N e^{-\frac{(x-m_{nc})^2}{2\sigma_{nc}^2}} dx. \quad (7)$$

Фізичний зміст виразу (7) полягає у наступному. Коли $N=0$ інтеграл у (7) і, відповідно, ймовірність виявлення рівні нулю. При збільшенні N ймовірність буде зростати. Різка збільшення цієї ймовірності від малих значень майже до 1 відбудеться в межах інтервалу $[m_{nc} - 3\sigma_{nc}, m_{nc} + 3\sigma_{nc}]$ і при подальшому зростанні кількості пікселів наближається до 1.

Однак умови, за яких відбувається виявлення цілі, можуть бути нетиповими, зі швидкою зміною різних факторів, що впливають на процес виявлення. При цьому виявлення цілі характеризуються значною невизначеністю. В цьому випадку розподіл кількості пікселів для виявлення підпорядковується закону Релея [5]. У

цьому випадку функція густини розподілу відповідає закону Релея і ймовірність виявлення цілі в залежності від кількості пікселів на які відбувається відображення цілі, буде мати вигляд

$$P(N) = \int_0^N \frac{x}{\sigma_{nc}^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_{nc}^2}} dx. \quad (8)$$

Розподіл (8) характеризується одним параметром σ_R . Слід відмітити, що всі викладки необхідно провести для кожного варіанту можливих комбінацій основних факторів, що впливають на процес виявлення цілі на основі її растрового представлення камерою БПЛА. Тому необхідно провести класифікацію цих факторів.

З метою зменшення загальної кількості досліджень, можливо зменшити кількість варіантів поєднання описаних вище факторів до тих, які в подальшому будуть використовуватись на практиці.

З використанням (7)–(8) можливо розрахувати $P(N)$. Однак, для розрахунку $p(x,y)$, необхідно встановити залежність $N(x,y)$ і врахувати додатковий перешкоджаючий вплив на спостереження рослинності.

Отже, для остаточного встановлення $p(x,y)$, необхідно для певної цілі з врахуванням висоти БПЛА, фокусної відстані камери, фізичних

розмірів матриці камери, кількості пікселів матриці камери по горизонталі і вертикалі, поточних координат БПЛА та координат (x,y) точки для якої проводиться розрахунок $p(x,y)$ знайти вираз для обчислення кількості точок на матриці для прийняттого відображення цієї цілі. З цією метою побудуємо модель формування зображення на матриці камери БПЛА і на її основі сформуємо методику визначення шуканої кількості пікселів N . Процес формування зображення схематично відображений на рис. 6.

Оскільки відстань до об'єкта, при застосуванні БПЛА, звичайно, є значно більшою за фокусну відстань об'єктива камери БПЛА, формування зображення розглянемо у фокальній площині. Для розрахунку кількості пікселів об'єкту потрібно знати: лінійні розміри об'єкту L , розміри проекції об'єкту на матрицю камери l , розмір пікселя матриці dp . На основі схеми рис. 6 отримаємо вираз, для визначення розмірів проекції об'єкту l .

$$l = L \cdot \frac{f}{h_0 - h(x,y)}. \quad (9)$$

Позначимо розміри цілі L_x, L_y . Відповідні розміри проекції цієї цілі на матриці камери БПЛА, визначені за (9) позначимо l_x, l_y .

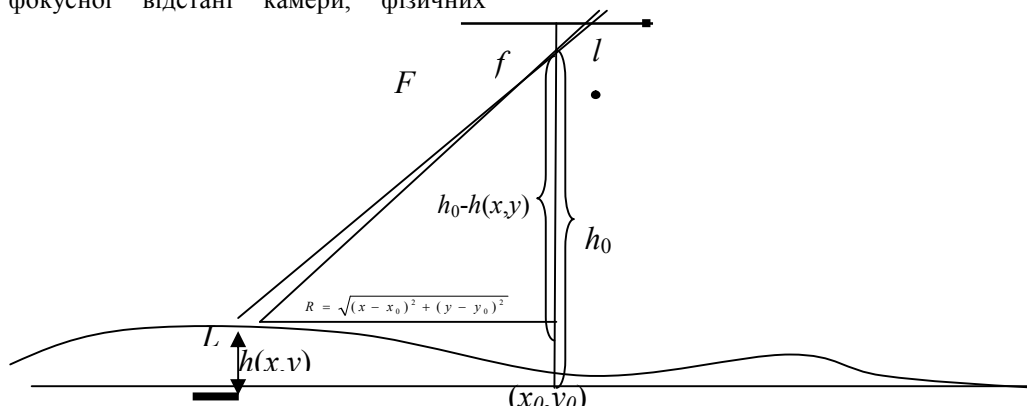


Рис. 6.Схема формування зображення на матриці

Для отримання кількості точок відображення цілі на поверхні матриці приймача потрібно мати розмір пікселя матриці dp . Цей параметр можливо отримати розділивши лінійний розмір матриці (наприклад ширину) на відповідну кількість пікселів.

З урахуванням цього, можливо записати вираз для розрахунку розміру цілі в пікселях:

$$N(x,y) = L_x \cdot L_y \cdot \frac{f^2}{dp^2 \cdot (h_0 - h(x,y))^2} \quad (10)$$

З урахуванням (7) і (10) для однорідних умов спостереження можливо записати:

$$P(x,y) = \frac{1}{\sigma_{nc} \sqrt{2\pi}} \int_0^{L_x \cdot L_y \cdot \frac{f^2}{dp^2 \cdot (h_0 - h(x,y))^2}} e^{-\frac{(x - m_{nc})^2}{2\sigma_{nc}^2}} dx \quad (11)$$

Аналогічно, з урахуванням (8) можливо отримати вираз і для нетипових (швидкозмінних) умов спостереження

$$P(x,y) = \int_0^{L_x \cdot L_y \cdot \frac{f^2}{dp^2 \cdot (h_0 - h(x,y))^2}} \frac{x}{\sigma_{nc}^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_{nc}^2}} dx \quad (12)$$

Однак, для остаточного визначення ймовірності виявлення цілей, необхідно врахувати ймовірність перешкоджаючого впливу рослинності яку позначимо $p_1(x,y)$. Із застосуванням ГІС для кожної точки (x,y) можливо отримати тип і характер рослинного покриву або встановити його відсутність. З застосуванням методу експертних оцінок та на основі статистичних досліджень для кожного можливого варіанту рослинного покриву встановлена ймовірність відсутності його перешкод процесу виявлення цілі. З урахуванням цього і (11)–(12) отримано остаточний вираз для розрахунку ймовірності виявлення цілі (13):

Вираз (3) з урахуванням (13) визначає методику обчислення ефективності моніторингу

заданих ділянок місцевості і спостереження цілей з використанням БПЛА, який знаходиться у певній точці простору. Однак важливим етапом при розрахунку (3) є визначення недоступних для спостереження ділянок, поява яких обумовлена перешкоджаючим впливом рельєфу місцевості. Хоча в існуючих ГІС існують стандартні засоби геообробки щодо визначення таких ділянок, потреба розрахунку показника (3) для значної кількості можливих точок знаходження БПЛА на ділянці місцевості, обумовлює пошук найбільш

швидких відповідних методів.

Отже ефективність спостереження за ділянкою місцевості з БПЛА відповідно до рис. 3 розраховується з урахуванням сукупності факторів: точки розміщення БПЛА у тримірному просторі (x_0, y_0, h_0) ; технічних характеристик камери БПЛА (параметрів об'єктиву, розмірів матриці тощо); перешкоджаючого впливу рельєфу місцевості; умов спостереження; типу цілі.

$$p(x, y) = \begin{cases} \frac{p_1(x, y)}{\sigma_{nc} \sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^{L_x \cdot L_y \cdot \frac{f^2}{dp^2 \cdot (h_0 - h(x, y))^2}} e^{-\frac{(x - m_{nc})^2}{2\sigma_{nc}^2}} dx, \text{ умови однорідні} \\ p_1(x, y) \cdot \int_0^{L_x \cdot L_y \cdot \frac{f^2}{dp^2 \cdot (h_0 - h(x, y))^2}} \frac{x}{\sigma_{nc}^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_{nc}^2}} dx, \text{ умови неоднорідні} \end{cases} \quad (13)$$

Розрахунок показника ефективності спостереження з використанням БПЛА, за виразом (3), проводиться за наступною методикою:

1) з урахуванням координат (x_0, y_0, h_0) та даних про рельєф місцевості з проекту SRTM з використанням геообробки проводиться обчислення множини T ;

2) на основі інформації про фокусну відстань камери та розміри матриці камери БПЛА, визначається область можливої видимості (множина V);

3) обчислюється множина $M = S_0 \cap V \cap \bar{T}$;

4) для всіх точок (x, y) , що належить множині M з урахуванням попередньо встановлених для кожного варіанту умов спостереження параметрів розподілів та інформації з геоінформаційної системи про ймовірність відсутності перешкод для спостереження $p_1(x, y)$, на основі (13) визначаються ймовірності виявлення цілі;

5) за виразом (3) проводиться остаточний розрахунок показника ефективності спостереження, як частки забезпеченої ймовірності виявлення цілей в межах заданої смуги спостереження від максимально можливої (одиночної ймовірності виявлення по всіх точкам множини S_0).

Висновки й перспективи подальших досліджень

Література

1. Розпорядження АДПСУ «Про порядок організації та забезпечення польотів на повітряний моніторинг державного кордону безпілотними авіаційними комплексами Державної прикордонної служби України» Вих. № 0.21-5075/0/6-17 від 08.06.2017 р. 2. **Багінський В. А.** Обґрунтування роздільної здатності пристрою візуалізації безпілотного авіаційного комплексу / В. А. Багінський, Ю. П. Сальник, І. І. Опанасюк, Ю. М. Пащук // Науковий вісник НЛТУ України – Львів : Видавництво НЛТУ України, 2015. – № 25.4. – С. 331-337. 3. Системи безпеки двійного и военного назначения. [Електронний ресурс]. - Доступний с http://www.pergam-vision.ru/files/file_name_19913aff8724bfac99cbcd64764b7052.pdf 4. **Слюсар В. В.** Передача данных с борта БПЛА: стандарты НАТО. - Электроника НТБ. – Вып. #3/2010. [Електронний ресурс]. - Доступний с <http://www.electronics.ru/journal/article/53> 5. **Горбунов В. А.** Эффективность обнаружения целей / В. А. Горбунов. – М. : Воениздат, 1979. – С. 160. 6. **STANAG 7023/AEDP-9.** NATO

Primary Image Format. [Electronic resource], – Mode of access http://www.nato.int/structur/AC/224/standard/7023/7023_documents/7023Eed04.pdf

7. **Боровик О. В.** Методика оцінки ефективності функціонування однієї вежі системи оптико-електронного спостереження / О. В. Боровик, Р. В. Рачок, М. М. Дармороз // Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія : військові та технічні науки / голов. ред. Олексієнко Б. М. – Хмельницький : Вид-во НАДПСУ, 2016. – № 4(70). – С. 208–226. 8. **Боровик О. В.** Оцінка ефективності функціонування системи оптико-електронного спостереження / О. В. Боровик, Р. В. Рачок, М. М. Дармороз // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2017. – № 2 (41). – С. 93–99. 9. **Рачок Р. В.** Структурна оптимізація системи оптико-електронного спостереження / Р. В. Рачок, О. В. Боровик, Л. В. Боровик, // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2017. – № 4 (43). – С. 151–161. 10. **Гмурман В. Е.** Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшая школа, 1972. – 368 с.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДУШНОГО МОНИТОРИНГА МЕСТНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Юрий Григорьевич Даник (доктор техн. наук, профессор)¹
Игор Иванович Балицкий (канд.ехн.аук., доцент)²

¹Национальный университет обороны Украины имени Ивана Черняховского, Киев, Украина

²Национальна академия Государственной пограничной службы Украины имени Богдана Хмельницкого, Хмельницкий, Украина

З целью повышения эффективности мониторинга (зондирования) местности с применением беспилотных летательных аппаратов предложена методика определения рациональных траекторий их полета при выполнении задач по наблюдению за участками местности, объектами и т.д. и их оперативной корректировки. Для решения этого вопроса разработана и рассмотрена на примере решения задач по охране государственной границы, модель наблюдения за участком местности, на основе которой предложен показатель эффективности осуществления наблюдения с беспилотного летательного аппарата при его нахождении в разных точках воздушного пространства. Предложена методика расчета введенного показателя эффективности наблюдения.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, эффективность мониторинга, прогнозирование, траектория, наблюдение, местность, методика.

EVALUATION METHOD OF TERRAIN MONITORING EFFICIENCY BY MEANS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

Yurii G. Danyk (Doctor of Technical Science, Professor)¹
Igor I. Baleckiy (Candidate of Technical Sciences, Researcher)²

¹National Defence University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovsky, Kyiv, Ukraine

²Bohdan Khmelnytskyi National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine, Khmelnytskyi, Ukraine

In order to increase the efficiency of terrain monitoring (sensing) by means of unmanned aerial vehicles, a method has been proposed for determining the rational trajectories of their flight when performing tasks for surveillance of sectors of the terrain, facilities, etc., and their operational correction. The model of surveillance over the sectors of the terrain has been worked out and considered in order to solve this problem in the context of solving tasks on the state border guarding. The measure of effectiveness concerning the surveillance performance by means of an unmanned aerial vehicle has been proposed when it is located at different points of the airspace. The calculation method of the introduced measure of monitoring efficiency has been proposed.

Key words: unmanned aerial vehicle, monitoring efficiency, forecasting, trajectory, surveillance, terrain, method.

References

1. Regulation of the ASBGSU "On the Procedure for Organizing and Providing Flights for Air Monitoring of the State Border by Unmanned Aerial Complexes of the State Border Guard Service of Ukraine" Ref. No. 0.21-5075/0/6-17 of June 08, 2017 [Rozporiadzhennia ADPSU «Pro poriadok orhanizatsii ta zabezpechennia polotiv na povitrianyi monitorynh derzhavnoho kordonu bezpilotnymi aviatstynymy kompleksamy Derzhavnoi prykordonnoi sluzhby Ukrainy»] 2. Bahinskyi V. A. Justification of the unmanned aerial complex image device resolution. [Obgruntuvannia rozdilnoi zdatnosti prystroiu vizualizatsii bezpilotnoho aviatstynoho kompleksu] / V. A. Bahinskyi, Yu. P. Salnyk, I. I. Opanasiuk, Yu. M. Pashchuk // Scientific Bulletin of NL TU of Ukraine– Lviv: Publishing House of NL TU of Ukraine, 2015. – No. 25.4. – P.331-337. 3. Security systems for dualand military use. [Systemy bezopasnosti dvojnogo voennogo naznachenija][Electronic resource]- available at: http://www.pergam-vision.ru/files/file_name_19913aff8724bfac99cbcd64764b7052.pdf. 4. Sliusar V. V. Data transfer from UAV: NATO standards. [Peredacha dannykh s borta BPLA: standarty NATO.]-NTB electronics. – Issue No. 3/2010. [Electronic resource]. – available at: <http://www.electronics.ru/journal/article/53>. 5. Gorbunov V. A. Targets detection efficiency. [Effektivnost obnaruzhenija tselej] / M. A. Gorbunov. – M.: Military

Publishing, 1979. – P. 160. 6. STANAG 7023/AEDP-9. NATO Primary Image Format. [Electronic resource], – Mode of access http://www.nato.int/structur/AC/224/standard/7023/7023_documents/7023Eed04.pdf

7. Borovyk O. V. Estimation method of functioning efficiency of one tower of the system of optoelectronic observation. [Metodyka otsinky efektyvnosti funktsionuvannia odniei vezhi systemy optyko-elektronnoho sposterezhennia] / O. V. Borovyk, R. V. Rachok, M. M. Darmoroz // Collection of scientific works of the National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine. Series: Military and Technical Sciences / Chiefeditor Oleksiienko B. M. –Khmelnytskyi: Publishing House of NASBGUSU, 2016 - No. 4 (70). - P. 208-226. 8. Borovyk O. V. Estimation method of functioning efficiency of the system of optoelectronic observation [Otsinka efektyvnosti funktsionuvannia systemy optyko-elektronnoho sposterezhennia] / O. V. Borovyk, R. V. Rachok, M. M. Darmoroz// Radioelectronics, informatics, management. - 2017 - No. 2 (41). - P. 93-99. 9. Rachok R. V. Structural optimization of the system of optoelectronic observation. [Strukturna optymizatsiia systemy optyko-elektronnoho sposterezhennia] / R. V. Rachok, O. V. Borovyk, L. V. Borovyk, // Radioelectronics, informatics, management. - 2017 - No. 4 (43). - P. 151-161. 10. Hmurman V.E. Theory of probability and mathematical statistics. [Teoriya verojatsnostej i matematicheskaja statistika] – M.: Higher School, 1972. - 368 p.