

Загальні питання

УДК 355. 58.001

В.В. Хижняк, А.В. Гурник

Український науково-дослідний інститут цивільного захисту, Київ

ВИБІР ДОЦІЛЬНОГО СПОСОБУ ПОШУКУ ОБ'ЄКТА НА ОСНОВІ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ СИЛ І ЗАСОБІВ ПОШУКУ І РЯТУВАННЯ

Розглянуто для одномірного (осьового) пошуку один із способів покращення результатів проведення авіаційного пошуку чи авіаційних робіт з пошуку за рахунок оптимального розподілу сил і засобів пошуку та рятування, що є у розпорядженні органів управління ними, який міг би зробити максимальними шанси виявлення і врятування об'єкта пошуку в заданому районі та виявити слабкі місця для його знаходження, у тому числі на відносному траверзі.

Ключові слова: авіаційний пошук, авіаційні роботи з пошуку, сили і засоби пошуку, спосіб пошуку, цільність пошуку, дієвість пошуку, ймовірність виявлення, об'єм пошукових зусиль.

Вступ

Постановка проблеми. У процесі планування та проведення авіаційного пошуку чи авіаційних робіт з пошуку (далі – пошук) виникає проблема досягнення оптимальних (найкращих) результатів шляхом покращення методів його проведення з метою своєчасного рятування постраждалих. Як один із варіантів, вирішити це завдання можливо за рахунок оптимального розподілу сил і засобів пошуку та рятування [1, 2].

Аналіз останніх досліджень. У науково-дослідній роботі (НДР) [3] здійснено постановку задачі оптимального розподілу пошуково-рятувальних повітряних суден за критерієм мінімуму кількості задіяних при умові виконання повного обсягу пошуково-рятувальних робіт і обґрунтовано порядок залучення авіаційних пошуково-рятувальних сил і засобів суб'єктів Єдиної системи проведення авіаційних робіт з пошуку і рятування (далі - авіаційна система) до несення чергування та проведення авіаційного пошуку й авіаційних робіт з пошуку і рятування.

У НДР [4] проведено аналіз особливостей виконання авіаційного пошуку і рятування в різних умовах. Досліджено методи пошуку, які можуть використовуватися в різних типах місцевості, зокрема особливості радіотехнічного пошуку й розроблено основний практичний документ з організації взаємодії органів управління та аварійно-рятувальних сил авіаційної системи держави під керівництвом Державної служби України з надзвичайних ситуацій (далі – ДСНС України). У НДР [3, 4] проведено загальний аналіз стану авіаційної системи держави й науково обґрунтовано напрями удосконалення та розроблено пропозиції щодо підвищення її дієвості. Але ці дані не дають повну інформацію про окремі способи пошуку й не описують їх логіко-математичне прогнозування результатів.

Недостатньо дослідженими є закономірності доцільного способу пошуку об'єкта та його своєчасного виявлення й визначення місцезнаходження на основі вибору й розподілу оптимальних сил і засобів пошуку і рятування.

Постановка завдання. Рятувальній фазі авіаційного пошуку чи авіаційних робіт з пошуку і рятування (далі – рятування) передують пошук. Але через проведення пошуку в умовах невизначеності й під впливом безлічі різноманітних факторів, фаза рятування може не розпочатися, оскільки роботи з виявлення повітряного (морського) судна з екіпажем (командою) і пасажиром, чи групи туристів або рибалок тощо, які зазнали або зазнають лиха (далі – об'єкт пошуку), не дивлячись на докладені зусилля, інколи не дають позитивного результату.

Існує необхідність, в умовах застосування високих технологій і вимог стандартів Міжнародної організації цивільної авіації (ІКАО) до пошуку [5], більш уміло визначати доцільні способи для своєчасного виявлення місцезнаходження об'єкта пошуку. Є можливість більш дієво виявляти об'єкт пошуку на основі оптимального розподілу пошуково-рятувального повітряного (морського) судна чи суден (ПРС) й повітряної і (або) наземної (морської) пошуково-рятувальної команди чи команд (ПРК) у визначеному районі пошуку і рятування (далі – сили і засоби пошуку та рятування), використовуючи закономірності його виявлення, що ґрунтуються на логіко-математичному описі [6] який поєднаний з практичним досвідом оперативності пошуку об'єкта.

Виклад основного матеріалу

Розрахунки в авіаційній системі по характеру вирішуваних питань підрозділяються на прямі, зворотні і розрахунки на оптимізацію. Прямі розрахунки зазвичай дозволяють отримати кількісні дані для

визначення очікуваного результату використання наявних сил і засобів пошуку та рятування.

Зворотні розрахунки здійснюються в тих випадках, коли необхідно визначити, яку кількість сил і засобів пошуку та рятування буде потрібно для досягнення заданого результату дій з наміченого варіанту плану. Розрахунки на оптимізацію дозволяють отримати кількісні дані для визначення найбільш вигідного варіанту прогнозованих дій, тобто як наявними силами і засобами пошуку та рятування добитися найбільшої дієвості, найкращого результату, залежно від їх розподілу (далі – оптимальний розподіл). Проблемою розрахунків оптимального розподілу є те, що вони найбільш важкі, а методи їх виконання найбільш складні й потребують, як правило, залучення складного сучасного математичного апарату й реалізації за допомогою електронно-обчислювальних машин й спеціального програмного забезпечення до них.

Сутність проблеми оптимального розподілу сил і засобів пошуку та рятування) полягає в такому.

Передбачимо, що для виявлення об'єкта пошуку проводиться його пошук із залученням сил і засобів пошуку та рятування. Відомо, що положення об'єкта пошуку характеризується ймовірністю його знаходження в різних секторах заданого району пошуку [6]. Відомо також, що для виявлення об'єкта пошуку необхідно затратити деяку кількість сил і засобів пошуку (далі - об'єм пошукових зусиль) в секторі заданого району пошуку і рятування, у якому він може знаходитися [7]. При плануванні пошуку об'єм пошукових зусиль, як правило визначається числом сил і засобів пошуку і рятування, дальністю дії засобів пошуку (спостереження), швидкістю й часом пошуку [7]. Цей об'єм пошукових зусиль може бути використаний за різними способами пошуку й їх схемами виконання завдання з пошуково-рятувальних робіт.

Практичне завдання полягає у знаходженні оптимального способу використання сил і засобів пошуку та рятування, які є у розпорядженні ДСНС України, такого способу, який міг би зробити максимальними шанси знайти об'єкт пошуку. Таким чином, суть оптимального розподілу пошукових зусиль полягає в тому, що на основі визначеної ймовірності місцезнаходження об'єкту пошуку й заданих: району пошуку й сектору в цьому районі пошуку, об'єму пошукових зусиль, визначається спосіб пошуку.

Задача визначення оптимального розподілу пошукових зусиль може рішатися в тривимірній системі координат (тривимірний пошук), двовимірній (площинній) полярній координатній системі (двовимірний (площинний) пошук) й одновимірній осьовій (одномірний пошук) [8].

З огляду на те, що в найбільш загальному випадку, як сили пошуку так і об'єкти пошуку можуть розміщатися в деякому об'ємі, їх місцезнаходження повинне визначатися для тривимірного пошуку [9]. Проте, так як завданням пошуку завжди є виявлення об'єкту пошуку, місцезнаходження якого невідоме,

задачі в теорії пошуку в основному рішення відносно сил і засобів пошуку з використанням двовимірного й одновимірного пошуку, що проходять на площині й уздовж лінії відповідно. При цьому сили і засоби й об'єкти пошуку вважаються точковими об'єктами.

Вирішення завдання оптимального розподілу сил і засобів пошуку та рятування для вибору доцільного способу пошуку об'єкта розглянемо для випадку осьового одномірного пошуку [10], коли пошук проходить «уздовж лінії».

Під одновимірним пошуком розуміється ситуація, в якій положення об'єкту пошуку характеризується розподілом ймовірності його знаходження на лінії пошуку (на вісі), включаючи найкоротший напрямок – траверзну дальність (відносний траверз). Пошукові можливості також розглядаються відносно лінії пошуку (вісі координат). Лише за результатом такої характеристики сил і засобів пошуку та рятування й ймовірного місцезнаходження об'єкту пошуку можна мати одну координату.

У нашому випадку одновимірний пошук може бути використаний за умови, коли органи управління ДСНС України й авіаційної системи: визначилися з районом пошуку; організували й проводять пошук об'єкта, рух і місце зникнення якого були відомі до певного моменту часу; розрахували й вийшли на передбачувану «умовну» лінію (траверзу) зустрічі об'єкта пошуку; дають високу ймовірність щодо відсутності помилок в розрахунках елементів руху й можливого знаходження об'єкта пошуку в деякий момент часу на передбачуваній «умовній» лінії зустрічі, включаючи траверз. На ній мають знаходитися сили і засоби пошуку та рятування й за підтвердженнями розрахунками – об'єкт пошуку.

У той же час, якщо підпорядковуватися нормальному закону розподілу, є необхідність все ж таки прийняти деякі помилки про зафіксоване місце можливого знаходження об'єкту пошуку, на розрахунковій «умовній» лінії зустрічі. З урахування цього припущення, щільність розподілу місцезнаходження об'єкту пошуку (P) буде мати вигляд:

$$P = (1/\sigma\sqrt{2\pi}) \cdot \exp(-x^2/\sigma^2), \quad (1)$$

де σ – середнє квадратичне відхилення, обумовлене помилками про передбачуване місце знаходження (курс) об'єкту пошуку після його зникнення в підконтрольній точці (координаті); x – траверзна дальність до передбачуваного місця виявлення (курсу) об'єкту пошуку. На цій же «умовній» лінії зустрічі можна визначити об'єм пошукових зусиль ($V_{пз}$). Він буде залежати від дальності дії засобів пошуку (спостереження) й числа сил і засобів пошуку, а саме:

$$V_{пз} = 2 \cdot D_{сп} \cdot N_{сп}, \quad (2)$$

де $D_{сп}$ – дальність дії засобів пошуку (спостереження); $N_{сп}$ – кількість сил і засобів пошуку.

З виразів (1) і (2) видно, що пошукові можливості при осьовому одномірному пошуку є функцією, аргумент якої виражається дальністю дії засобів

пошуку (спостереження). В результаті за оптимальний розподіл сил і засобів на лінії пошуку приймається такий розподіл, при якому відстань між засобами пошуку (спостереження) робить максимальні можливості виявлення об'єкту пошуку. Таким чином, завдання розподілу оптимальних зусиль для випадку одномірного осевого пошуку зводиться до визначення оптимальних відстаней між силами й засобами пошуку (спостереження), які роблять максимальними можливості пошуку (спостереження).

Для знаходження, наприклад, аналітичним способом оптимального розподілу пошукових зусиль необхідно вибрати критерій дієвості АРП в залежності від розташування сил і засобів пошуку на лінії пошуку. Очевидно ним являється ймовірність успішного виявлення об'єкту пошуку. Оскільки оптимальний план пошуку виходить з максимізації ймовірності виявлення об'єкту пошуку, звідси дієвість пошуку має характеризуватися максимальною величиною ймовірності його виявлення. Для її знаходження позначимо: вісь X з початком відліку в точці O – лінія пошуку; точка на осі X з координатою x відносно початку відліку – об'єкт пошуку; щільність ймовірності знаходження об'єкту пошуку в точці на лінії пошуку (функція безперервна) $P(x)$; $\varphi(x)$ – щільність пошукових зусиль в точці x .

Щільність пошукових зусиль в точці x представляє собою коефіцієнт покриття (потенціал виявлення) в кожній точці лінії пошуку.

При $\varphi(x) = 0$ виявлення буде неможливе, так як пошук у точці x не здійснюється. При $\varphi(x) > 0$ являється можливість виявлення об'єкту пошуку в точці x . Величина $\varphi(x)$ залежить від розподілу сил і засобів пошуку на лінії пошуку. При чому оскільки на лінії пошуку число точок безмежне, щільність пошуку $\varphi(x)$ в кожній точці буде безмежно малою величиною. Підсумовуючи щільність пошуку у всіх точках, отримаємо чисельний об'єм пошукових зусиль $V_{пз}$. На підставі цього можна зробити висновок, що для щільності пошуку, яка залежить від розподілу сил і засобів пошуку будуть характерними два наступних вирази в їх сукупності:

$$\varphi(x) > 0; \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(x) dx = V_{пз}. \quad (3)$$

Тоді застосувавши показниковий закон виявлення, можна написати:

$$q(x) = 1 - \exp(-\varphi(x)), \quad (4)$$

де $q(x)$ – ймовірність виявлення об'єкту пошуку за умови його знаходження в точці з координатою x .

Проте ймовірність виявлення залежить не тільки від щільності пошуку $\varphi(x)$ в даній точці, але й від можливості знаходження в ній об'єкту пошуку. Як відомо, можливість знаходження об'єкту пошуку в кожній точці лінії пошуку характеризується законом його розподілу – щільністю ймовірності знаходження об'єкту пошуку на лінії пошуку $P(x)$. Виявлення об'єкту пошуку буде можливе при $P(x) > 0$. При цьому ймовірність знаходження об'єкту пошуку розгля-

дається тільки в деякому інтервалі $(x; x+dx)$, де вона дорівнює добутку $P(x) dx$. В результаті ймовірність виявлення об'єкту пошуку в інтервалі $(x; x+ dx)$ буде

$$q(x; x+ dx) = P(x) (1 - \exp(-\varphi(x))) dx, \quad (5)$$

звідси ймовірність виявлення об'єкту пошуку на лінії пошуку $Q(\varphi)$ може бути отримана інтегруванням

$$Q(\varphi) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(x) (1 - \exp(-\varphi(x))) dx. \quad (6)$$

де $Q(\varphi)$ – ймовірність виявлення об'єкту пошуку на лінії пошуку. Вираз (6) є критерієм дієвості АРП в залежності від розподілу сил і засобів пошуку й об'єкту пошуку на лінії пошуку. Очевидно, що максимальна величина критерію дієвості буде відповідати оптимальному розміщенню сил і засобів пошуку на лінії пошуку, яке визначається функцією $\varphi(x)$.

Таким чином, необхідно знайти розподіл функції $\varphi(x)$ що має задовольняти вираз (3), який максимізує коефіцієнт дієвості $Q(\varphi)$, даний у виразі (6).

Покажемо, яким чином оптимальна функція $\varphi(x)$ фактично може максимізувати коефіцієнт дієвості $Q(\varphi)$. Для цього використаємо метод, запропонований відомим спеціалістом з теорії пошуку Б.О. Кулманом [1], який довів, що необхідною умовою максимізації $Q(\varphi)$ є постійність для кожної точки лінії пошуку добутку щільності ймовірності знаходження об'єкту пошуку $P(x)$ на ймовірність його не виявлення $\exp(-\varphi(x))$. У нашому випадку буде мати місце положення, де:

$$P(x) \exp(-\varphi(x)) = \text{const}, \text{ за умови } -\varphi(x) > 0. \quad (7)$$

Такий оптимальний розподіл пошукових зусиль у відповідності до функції $\varphi(x)$, коли та максимізує ймовірність виявлення об'єкту пошуку $Q(\varphi)$ згідно формули (6), можна, показати для наочності графічно (рис. 1) на лінії пошуку (вісь OX), і описати.

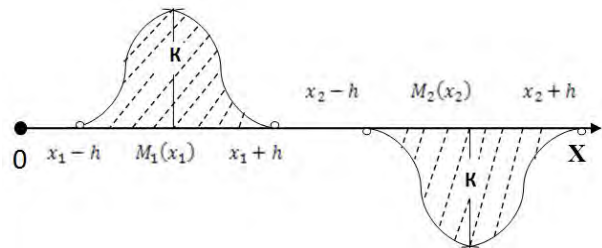


Рис. 1. Розподіл функції $\varphi(x)$

З рис. 1 видно, якщо змінити розподіл пошукових зусиль шляхом переносу частини їх з околиць одних точок в інші (наприклад з M_2 в M_1 , абсциси яких дорівнюють x_2 в x_1 , і які характеризуються інтервалами $(x_1 - h, x_1 + h, x_2 - h, x_2 + h)$, які не пересікаються відповідно, то цей розподіл при $\varphi(x) > 0$ вже не буде оптимальним. Це пов'язано зі зняттям пошукових зусиль з околиць точки M_2 і призведе до: $\varphi(x) < 0$ в інтервалі $(x_2 - h, x_2 + h)$, $\varphi(x) > 0$ в інтервалі $(x_1 - h, x_1 + h)$ $\varphi(x) = 0$, що означає відсутність пошуку поза вказаних інтервалів. За всіх цих умов аргумент x функції $\varphi(x)$ буде приймати певні значення області її визначення в будь-якій точці вісі OX . Тому $\varphi(x)$ буде безперервною й буде мати в певних

місцях екстремальні значення K (рис. 1). За таких умов, об'єм пошукових зусиль все рівно буде постійним, але не оптимальним, тобто:

$$K = \max \varphi(x) = \varphi(x_1), x \in (x_1 - h, x_1 + h); \quad (8)$$

$$K = - \max \varphi(x) = -\varphi(x_1), x \in (x_2 - h, x_2 + h). \quad (9)$$

$$\text{Відповідно: } \int_{x_1-h}^{x_1+h} \varphi(x) dx = - \int_{x_2-h}^{x_2+h} \varphi(x) dx. \quad (10)$$

Якщо прийняти за параметр t ту частину пошукових зусиль, що визначаються функцією $\varphi(x)$ і переносяться з околиці M_2 до околиці M_1 то при $t = 1$ будуть всі зусилля перенесені, а при $t = 0$ жодних зусиль не буде перенесено. Таке пояснення можна записати у вигляді виразу:

$$\varphi(x) + t \varphi(x), \text{ де } 0 \leq t \leq 1. \quad (11)$$

Таким чином, ми визначили, що до переносу частини пошукових зусиль ймовірність виявлення об'єкту пошуку (критерій дієвості) характеризувався виразом (6). Тоді після переносу частини пошукових зусиль ймовірність виявлення об'єкта пошуку буде характеризуватися наступним виразом:

$$Q(\varphi + t \varphi) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(x) \left(1 - e^{-(\varphi(x) + t\varphi(x))} \right) dx. \quad (12)$$

Оскільки $\varphi(x)$ має максимізувати $Q(\varphi)$ то логічним буде необхідність у дотриманні нерівності:

$$Q(\varphi) - Q(\varphi + t \varphi) \geq 0. \quad (13)$$

Представлена нерівність (13) може бути у якості відправного пункту для оптимального розподілу пошукових зусиль. Вона може дати можливість у подальшому сформулювати умови, які й визначають оптимальну функцію щільності пошукових зусиль $\varphi(x)$.

ВИСНОВОК

За результатами вищевикладеного можна зробити висновок, що щільність пошуку $\varphi(x)$ у тому випадку максимізує ймовірність виявлення об'єкту пошуку $Q(\varphi)$, якщо в будь-якій точці добуток щільності ймовірності знаходження об'єкта пошуку $P(x)$ на ймовірність його не виявлення $e^{-\varphi(x)}$ буде дорівнювати постійно лише позитивній величині.

ВЫБОР ЦЕЛЕСООБРАЗНОГО СПОСОБА ПОИСКА ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛ И СРЕДСТВ ПОИСКА И СПАСАНИЯ

В.В. Хижняк, А.В. Гурник

Рассмотрено для одномерного (осевого) поиска один из способов улучшения результатов проведения авиационного поиска или авиационных работ по поиску за счет оптимального распределения сил и средств поиска и спасания, имеющихся в распоряжении органов управления ими, который мог бы сделать максимальными шансы выявления и спасания объекта поиска в заданном районе, и обнаружит слабые места для его нахождения, в том числе на относительном траверзе.

Ключевые слова: авиационный поиск, авиационные работы по поиску, силы и средства поиска, способ поиска, плотность поиска, действенность поиска, достоверность выявления, объем поисковых усилий.

CHOICE OF EXPEDIENT METHOD OF SEARCH OF OBJECT ON THE BASIS OF THE OPTIMUM DISTRIBUTING OF FORCES AND FACILITIES OF SEARCH AND RESCUING

V.V. Khizhnyak, A.V. Gurnik

It is considered, for an unidimensional (axial) search, one of methods of improvement of results of leadthrough of aviation search or aviation works on a search due to the optimum distributing of forces and query and rescuing, present at disposal of organs of management by them facilities, which would do maximal chances of exposure and rescuing of object of search in the set district, and to find out weak points for his finding, including on relative traverse.

Keywords: aviation search, aviation works on a search, forces and query facilities, method of search, closeness of search, effectiveness of search, authenticity of exposure, volume of searching efforts.

Звичайно, щоб розрахунки були точнішими (адекватні дійсності), необхідно враховувати по можливості всі існуючі фактори впливу на виконання завдання, перш за все ті, які вдається виразити кількісно (числом). Подальші дослідження закономірностей виявлення об'єктів пошуку, заснованих на логіко-математичному описі прогнозування результату дій сил і засобів пошуку та рятування дозволить їх органам управління вибирати найбільш вигідний спосіб дій для пошуку об'єктів в умовах невизначеності під впливом різних факторів.

Список літератури

1. Коопман В.О. *The theory of search, II. Target detection* / В.О. Коопман // *Operations research*. – 1956. – № 4. – Р. 503–531.
2. Аркин В.И. *Задачи оптимального распределения поисковых усилий* / В.И. Аркин // *Теория вероятностей и её применения*. – 1964. – Т. 9, № 1. – С. 179–180.
3. *Аналіз функціонування системи авіаційного пошуку і рятування в Україні та визначення шляхів підвищення її ефективності* / УкрНДІ ЦЗ НДЦ авіації, НДР “Авіапошук – ефективність”, К. – 2013. – 229 с.
4. *Удосконалення національної нормативно-правової бази з питань авіаційного пошуку і рятування в зоні відповідальності України* / УкрНДІ ЦЗ НДЦ авіації, НДР «Нормативна база – авіа пошук», К. – 2014. – 125 с.
5. *Дос 7333-AN/a59. Руководство по поиску и спасанию. ИСАО*. – Изд.4, 1994.
6. *Абчук В.А. Поиск объектов* / В.А. Абчук, В.Г. Суздаль. – М.: Сов. радио, 1977. – 336 с.
7. Аркин В.И. *Задачи оптимального распределения поисковых усилий* / В.И. Аркин // *Теория вероятностей и её применения*. – 1964. – Т. 9, № 1.
8. Хеллман О. *Введение в теорию оптимального поиска* / О. Хеллман. – М., Наука, 1985. – 248 с.
9. Шишкин И.Ф. *Трёхмерный поиск* / И.Ф. Шишкин, А.Г. Сергушев // *Проблемы машиноведения и машиностроения* // СПб.: СЗТУ, 2003. – Вып. 31. – С. 11–14.
10. *Зангвилл У.И. Нелинейное программирование. Единный поход* / У.И. Зангвилл. – М.: Сов. радио», 1973. – 114 с.

Надійшла до редколегії 30.10.2014

Рецензент: д-р техн. наук проф. Г.В. Певцов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.