

УДК 519.878

М. О. Ніколаєв

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОНАННЯ ЗАВДАНЬ З ПЕРЕСЛІДУВАННЯ НАЗЕМНИХ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ

Розглянуто деякі аспекти визначення місцезнаходження наземних рухомих об'єктів переслідування у процесі візуального та радіолокаційного спостереження у визначених районах.

Постановка проблеми. Концепція розвитку внутрішніх військ МВС України на період до 2015 р., затверджена наказом МВС України від 29.11.2006 р. № 1167, визначає основні напрями розвитку внутрішніх військ та приведення їх у відповідність до наявних і прогнозованих завдань з урахуванням економічних можливостей держави. Таким завданням є переслідування і затримання осіб, що втекли з-під варти.

Військовослужбовці внутрішніх військ, що залучаються до виконання завдань переслідування, повинні бути відповідним чином екіпіровані необхідними технічними засобами пошуку та виявлення: біноклями, стереотрубками, перископічними бусолями, лазерними далекомірами, нічними і тепловізійними приборами спостереження, радіолокаційними станціями (РЛС) розвідки та ін., озброєні та готові до дій в різних умовах.

Переслідування за допомогою груп, оснащених пошуковими засобами, технічні характеристики яких недосконалі, є достатньо складним процесом. При цьому місце знаходження та елементи пересування об'єктів переслідування визначаються з випадковими похибками, внаслідок чого результати переслідування, що розгортаються у часі, втрачають однозначність і стають випадковими, а закономірності переслідування набувають ймовірного характеру.

Вибрана послідовність дій у процесі переслідування може призводити до різних результатів, тому основною задачею теорії переслідування є вироблення найкращого варіанта дій, що забезпечує виявлення та затримання порушників у найкоротший або заданий час з мінімальними витратами ресурсів і зусиль.

Обґрунтування та розроблення доцільних способів переслідування рухомих об'єктів передбачає вирішення таких дослідних задач:

- розроблення відповідних математичних моделей щодо виявлення причино-наслідкових зв'язків між умовами переслідування та його результатами;
- виявлення кінематичних закономірностей переслідування для конкретних умов;
- визначення оптимальних способів переслідування, що задовольняють обраним критеріям ефективності;
- визначення оптимального розподілу ресурсів між районами можливого знаходження об'єктів переслідування (груп переслідування з їх маневровими якостями, засобами виявлення і т. п.).

Під час вирішення зазначених задач проблемними є питання, пов'язані з візуальним виявленням об'єктів переслідування в умовах лісної місцевості та радіолокаційним спостереженням у визначених районах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню проблем пошуку та переслідування рухомих об'єктів присвячена значна кількість наукових публікацій [1 – 7], в яких розглядаються вельми специфічні особливості виконання таких завдань.

У наведених джерелах пошук формалізований як статистичні та ігрові задачі прийняття рішень на основі геометричних методів визначення ймовірності виявлення, а переслідування розглядається як процес зближення управляємої системи (переслідувача) з деяким рухомих об'єктом, управляємим або неуправляємим. При цьому використовується поточна інформація про параметри відносного місцезнаходження та прямування об'єкта, який переслідують.

Метою статті є визначення особливостей виявлення рухомих об'єктів переслідування у процесі спостереження візуальним способом (у тому числі з використанням оптичних приборів) в лісистій місцевості та за допомогою радіолокаційного спостереження у визначених районах.

Виклад основного матеріалу. Інформація про місце знаходження об'єкта до початку і в процесі переслідування, як правило, має невизначений характер, що і є причиною пошукових дій. Здобуття інформації включає виявлення об'єкта та його розпізнавання серед інших об'єктів, що потрапляють у область виявлення засобів пошуку.

Виявлення – це визначення просторово-часового положення об'єкта, його моделюють за допомогою методів теорії пошуку. Розпізнавання передбачає визначення належності об'єкта до певного класу, його моделюють з використанням методів теорії розпізнавання образів.

Особливе значення має вивчення взаємного переміщення об'єктів пошуку і пошукових систем –

кінематика пошуку та переслідування. Вибір оптимальних способів пошуку під час переслідування ґрунтується на аналізі математичних моделей пошукових ситуацій і зводиться до визначення управляючих параметрів пошуку, що забезпечують оптимальне вирішення пошукової задачі.

У загальному випадку ймовірність того, що об'єкт переслідування матиме швидкість $v_1 \leq v \leq v_2$, кут різниці курсів з пошуковою системою $\xi_1 \leq \xi \leq \xi_2$, дальність до пошукової системи $r_1 \leq r \leq r_2$, кут між курсом пошукової системи і напрямом від неї на об'єкт переслідування $\zeta_1 \leq \zeta \leq \zeta_2$, можна подати у вигляді

$$P(v_1 \leq v \leq v_2, \xi_1 \leq \xi \leq \xi_2, r_1 \leq r \leq r_2, \zeta_1 \leq \zeta \leq \zeta_2) = P(v, \xi, r, \zeta) dv d\xi dr d\zeta. \quad (1)$$

Для визначення ймовірності знаходження об'єкта переслідування відносно переслідувача у певному діапазоні, необхідно проінтегрувати (1) за всіма змінними у заданих межах

$$P(v_1 \leq v \leq v_2, \xi_1 \leq \xi \leq \xi_2, r_1 \leq r \leq r_2, \zeta_1 \leq \zeta \leq \zeta_2) = \int_{v_1}^{v_2} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \int_{r_1}^{r_2} \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} dv d\xi dr d\zeta. \quad (2)$$

У випадку рівномірного розподілення ймовірних місць знаходження об'єкта переслідування з відомою (у допустимих межах) швидкістю, ймовірність знаходження об'єкта переслідування відносно переслідувача на заданій площі S визначатиметься залежністю

$$P(\xi_1 \leq \xi \leq \xi_2, r_1 \leq r \leq r_2, \zeta_1 \leq \zeta \leq \zeta_2) = \frac{1}{2\pi S} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \int_{r_1}^{r_2} \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} r d\xi dr d\zeta. \quad (3)$$

Під час ведення пошуку з переслідуванням можуть уточнюватися значення параметрів ξ, r, ζ (за допомогою представників місцевої влади та населення, шляхом пильного спостереження за дорогами, городами, кущами, кронами дерев, скирдами сіна та іншими об'єктами, що можуть використовувати переслідуємі) таким чином, що з плином часу $P(\xi, r, \zeta) \rightarrow 1$.

Гаусові розподілення ймовірних місць знаходження об'єкта переслідування відповідають випадкам, коли після первісного виявлення був втрачений контакт і необхідно відновити пошукові дії. Така ситуація відповідає повторному пошуку або пошуку "за викликом". Щільність ймовірності розподілення місць знаходження об'єкта пошуку визначатиметься залежністю [1]

$$\varphi(r, t) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + v^2 t^2}{2\sigma^2}\right) J_0\left(\frac{rvt}{\sigma^2}\right), \quad (4)$$

де σ – середньоквадратична похибка визначення місця знаходження об'єкта, яка залежить від точності знання місця пошукової системи і точності визначення координат об'єкта відносно пошукової системи; $J_0(\cdot)$ – функція Бесселя 1-го роду нульового порядку від уявного аргументу.

Формула (4) відповідає випадкам нерівномірного розподілу ймовірних місць знаходження об'єкта переслідування. Курси переслідування рівноймовірні в межах $0 \dots 360^\circ$ на площині. Залежність ймовірності знаходження об'єкта переслідування в межах сектора з радіусом R і центральним кутом Ψ через деякий проміжок часу t після його первинного виявлення можна одержати, якщо (4) проінтегрувати за площею

$$P(R, \Psi, t) = \int_0^R \int_0^\Psi \varphi(r, t) r dr d\psi = \frac{\Psi}{2\pi\sigma^2} \int_0^R \exp\left(-\frac{r^2 + v^2 t^2}{2\sigma^2}\right) J_0\left(\frac{rvt}{\sigma^2}\right) r dr. \quad (5)$$

Обмежуючись першими двома членами розкладання функції Бесселя у степінний ряд,

$$J_0\left(\frac{rvt}{\sigma^2}\right) = \left(\frac{rvt}{2\sigma^2}\right) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k! \Gamma(k+1)} \left(\frac{rvt}{2\sigma^2}\right)^{2k} \cong 1 - \frac{r^2 v^2 t^2}{4\sigma^4},$$

вираз (5) набиратиме вигляду

$$P(R, \Psi, t) \cong \frac{\Psi}{2\pi\sigma^2} \int_0^R \left(1 - \frac{r^2 v^2 t^2}{4\sigma^4}\right) \exp\left(-\frac{r^2 + v^2 t^2}{2\sigma^2}\right) r dr. \quad (6)$$

Певний практичний інтерес має визначення ймовірності знаходження об'єкта переслідування на площі круга ($\Psi = 2\pi$), сектора, кільця або частини кільця, обмежених радіусами $R_2 > R_1$ і центральним кутом Ψ , за умови $R = vt$.

Якщо пошук на площі виконують у межах деякого кута, більшого ніж ширина діаграми спрямування радіолокатора або кута поля зору візуального спостереження, то обстеження розглядають як дискретне. У такому випадку, якщо умови спостереження забезпечують деяку елементарну, скільки-небудь малу, ймовірність p виявлення при одному миттєвому незалежному спостереженні, то згідно з теоремою про повторення незалежних спроб ймовірність виявлення об'єкта переслідування хоча б один раз протягом n миттєвих спостережень визначається формулою

$$P(n) = 1 - (1 - p)^n, \quad (7)$$

з якої виходить, що при $n \rightarrow \infty$, $P(n) \rightarrow 1$.

Однак на практиці частіше виникають умови, коли відстань до об'єкта переслідування спостерігачів групи переслідування має різні значення і, як наслідок, різні умови спостереження, тому елементарні ймовірності p_i виявлення мають різні значення і формула (7) для розрахунку ймовірності у даному випадку буде мати вигляд

$$P(n) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i), \quad (8)$$

що означає ймовірність виявлення об'єкта переслідування в заданому районі хоча б одним спостерігачем.

У лісі об'єкт частково або повністю ховається за деревами. Очевидно, що із збільшенням відстані до об'єкта переслідування ймовірність його виявлення зменшується. За припущення, що об'єкт переслідування у лісі закривають тільки стовбури дерев, діаметри яких є випадковими величинами, для однорідного пуассонівського ансамблю розташування дерев на лінії видимості із середньою щільністю λ дерев/м² елементарні ймовірності виявлення об'єкта будуть визначатися виразом [4]

$$p_i(R) = \exp\left\{-\lambda \left[2A_1 - A_2(l)\right]\right\}, \quad (9)$$

$$A_1 = \bar{B}R,$$

$$A_2(l) = \begin{cases} \frac{D^2}{4} \cos\left(\frac{l}{2R}\right), & \text{tg}\left(\frac{l}{2R}\right) \geq \frac{D}{2R}, \\ \left[DR - \frac{D^2}{4} \sin\left(\frac{l}{R}\right) - R^2 \text{tg}\left(\frac{l}{2R}\right)\right] \left[\cos\left(\frac{l}{R}\right)\right]^{-1}, & \text{tg}\left(\frac{l}{2R}\right) \leq \frac{D}{2R}, \end{cases}$$

де l – стала величина, що дорівнює відстані між очима спостерігача, \bar{B} – середній діаметр дерев, R – відстань до об'єкта переслідування, D – прийнятий діаметр дерева.

У разі радіолокаційного виявлення об'єктів переслідування відповідна ймовірність може бути визначена з урахуванням особливостей цього способу. У багатьох країнах світу: Росії, США, Франції, Великій Британії, Італії, Іспанії, Німеччині, Туреччині, Швеції, Ізраїлі, Данії, Нідерландах, Бельгії, КНР та ін. для виявлення рухомих об'єктів використовують близько 80 різних типів і модифікацій РЛС розвідки наземних рухомих цілей (РНРЦ) ближньої, малої, середньої та великої дальності (табл. 1), що дозволяють виявляти цілі у будь-які час доби і пору року, в умовах обмеженої оптичної видимості (туман, задимленість та запилення атмосфери, опади), за наявності густої рослинності з високою точністю визначення координат. Широко застосовують також переносні малогабаритні РЛС високої мобільності і надійності, з малим часом розгортання, простим обслуговуванням, можливістю застосування у будь-який час доби за умов різної видимості. Подальше удосконалення РЛС наземної розвідки має відбуватися у напрямках повної автоматизації пошуку, виявлення,

Дальності виявлення об'єктів за допомогою РЛС РНРЦ

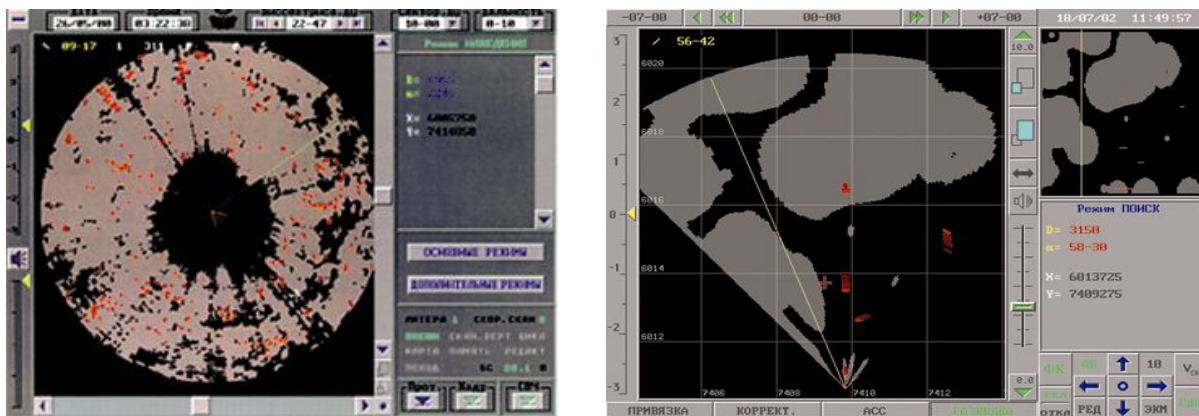
РЛС (за дальністю дії)	Дальність виявлення, м		
	Людини		Транспортного засобу
	що йде	що пластує	
Ближньої	130 – 1600	200 – 500	2000 – 3000
Малої	1500 – 5000	300 – 500	5000 – 10000
Середньої	4000 – 14000	до 2000	12000 – 25000
Великої	15000 – 26000	до 7000	30000 – 60000

розпізнавання і відображення цілей, а також удосконалення переносних малогабаритних РЛС.

Спеціальні типи РЛС РНРЦ широко використовують у антитерористичних операціях та системах охорони об'єктів і територій.

Особливості спостереження оператором відмітки цілі на індикаторі РЛС (рис. 1) розглянуто у [8], вони зводяться до такого:

- спостереження проводять за умов слабкої освітленості через те, що яскравість зображення на індикаторі незначна;
- спостереження утруднені циклічною зміною яскравості зображення екрана;
- безперервні зміни яскравості зображення спричиняють постійну переадаптацію зорової системи оператора, внаслідок чого її пороговий контраст збільшується (цією особливістю можна знехтувати, якщо середня яскравість зображення не менше $3 \cdot 10^{-2}$ кд/м²);
- для прийняття рішення оператору необхідно 2 – 3 рази відстежити повторюєму відмітку цілі на індикаторі РЛС;
- виділення оператором відмітки цілі з шуму відбувається в результаті своєрідного накопичення повторюємих на індикаторі зображень у пам'яті, на що потрібно близько 2 хв.



а

б

Рис. 1. Зображення на індикаторах яскравості переносних РЛС РНРЦ “Кредо-1” (а) і “Кредо-М1” (б)

Спрощена функціональна схема прийняття рішення оператором у процесі виявлення цілі представлена на рис. 2.

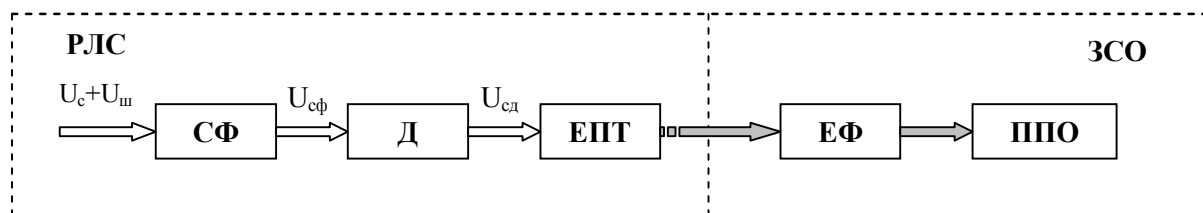


Рис. 2. Спрощена функціональна схема прийняття рішення оператором РЛС:

РЛС – радіолокаційна станція; ЗСО – зорова система оператора; U_c – напруга приймаемого сигналу; $U_{ш}$ – напруга білого шуму; $U_{сф}$ – напруга на виході смугового фільтра СФ; $U_{сд}$ – напруга на виході лінійного детектора Д; ЕПТ – електронно-променева трубка; ЕФ – еквівалентний фільтр ЗСО; ППО – еквівалентний пороговий пристрій оператора

У схемі враховується, що нелінійність світлової характеристики ЕПТ і нелінійність характеристики сприйняття яскравості ЗСО значною мірою взаємно компенсуються [8].

Ймовірність виявлення сигналу оператором P_{ec} визначається, як ймовірність перевищення сигналом на виході ЕФ певного порога h_0 , що задається величиною ймовірності помилкової тривоги P_{nt} ,

$$P_{ec} = \int_{h_0}^{\infty} W_{cn}(h) dh, \quad (10)$$

де $W_{cn}(h)$ – щільність ймовірності флуктуацій сигналу з невідомою початковою фазою ξ_c і шуму n_{uu} на виході еквівалентного фільтра $h = \xi_c + n_{uu}$, що може бути визначена залежністю [8]

$$W_{cn}(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi n_{uu}^2}} \exp\left[-\frac{(h - \xi_c)^2}{2n_{uu}^2}\right]. \quad (11)$$

Після підстановки (11) у (10) ймовірність виявлення сигналу оператором набирає вигляду

$$P_{ec} = 0,5 \left[1 + \Phi(\eta - h_{он}) \right], \quad (12)$$

де $\Phi(\cdot)$ – табульований інтеграл ймовірності, $\eta = \sqrt{E_c / S_{uu}(0)}$ – відношення сигнал/шум на виході ЕФ, $h_{он} = h_0 / \sqrt{n_{uu}^2} = h_0 / \sqrt{E_c S_{uu}(0)}$ – нормований поріг; $\overline{n_{uu}^2}$ – середній квадрат шумового складника на виході ЕФ за наявності сигналу.

З урахуванням того, що на виході лінійного детектора енергія сигналу $E_c = U_c^2 N k \tau$, а спектральна щільність шуму за наявності сигналу $S_{uu}(0) = \sigma_{вих}^2 / \Delta f$, тоді $\eta = U_c \sqrt{N k \tau \Delta f} / \sigma_{вих}$ і ймовірність виявлення сигналу оператором набирає вигляду

$$P_{ec} = 0,5 \left[1 + \Phi\left(U_c \sqrt{N k \tau \Delta f} / \sigma_{вих} - h_{он} \right) \right], \quad (13)$$

$$h_{он} = \sqrt{\overline{n_{uu0}^2} / \overline{n_{uu}^2}} \Phi^{(-1)}(1 - 2P_{nt}),$$

де N – число радіоімпульсів у позначки цілі; k – коефіцієнт, що визначає зменшення енергії радіоімпульсів внаслідок обмеження ширини спектра при проходженні через СФ, з [8] відомо, що при $\Delta f \tau > 3 \Rightarrow k \rightarrow 1$; τ – тривалість радіоімпульсів; Δf – смуга пропускання СФ; $\sigma_{вих}^2$ – середній квадрат шуму на виході лінійного детектора; $\overline{n_{uu0}^2}$ – середній квадрат шумового складника на виході ЕФ за відсутності сигналу; $\Phi^{(-1)}(\cdot)$ – функція обернена інтегралу ймовірності.

Вираз (4) дозволяє розраховувати ймовірність виявлення відмітки цілі оператором в залежності від параметрів РЛС і ЗСО. При цьому, якщо збільшення $N \tau$ призводить до збільшення P_{ec} , то збільшення Δf призводить до збільшення середньоквадратичного значення шуму на виході Д. Отже, існує оптимальне значення Δf_{ef} , при якому $P_{ec} \rightarrow 1$.

Для визначення ймовірностей виявлення оператором цілей на індикаторі РЛС можуть також використовуватися психометричні функції, що пов'язані з розподіленням Пуассона, вирази і порядок застосування яких наведено в [9].

Висновки

Наведені результати можуть бути основою для пошуку рішень практичних задач щодо обґрунтування та розроблення доцільних способів переслідування рухомих об'єктів.

З використанням електронних карт місцевості на основі наведених залежностей з'являється можливість розроблення методик організації дій груп переслідування, розташування постів і засад, удосконалення систем захисту важливих об'єктів, а також оптимального, в деякому розумінні,

розподілення ресурсів. Виконання таких завдань є напрямками подальших досліджень з визначеної проблематики.

Список використаних джерел

1. Абчук В. А. Поиск объектов [Текст] / В. А. Абчук, В. Г. Суздаль. – М.: Советское радио, 1977. – 215 с.
2. Горбунов В. А. Эффективность обнаружения целей [Текст] / В. А. Горбунов. – М.: Воениздат, 1979. – 160 с.
3. Альсведе Р. Задачи поиска [Текст] / Р. Альсведе, И. Вегенер: пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 368 с.
4. Хеллман О. Введение в теорию оптимального поиска [Текст] / О. Хеллман: пер. с англ. – М.: Наука, 1985. – 246 с.
5. Ким Д. П. Методы поиска и преследования подвижных объектов [Текст] / Д. П. Ким. – М.: Наука, 1989. – 336 с.
6. Ніколаєв М. О. Оцінка ефективної ширини обстеження авіаційних пошукових магнітометрів [Текст] / М. О. Ніколаєв // Збірник наукових праць Харківського інституту льотчиків ВПС України. – Вип. 1. – Х.: ХІЛ ВПС, 1999. – 123 с.
7. Чхартишвили А. Г. Динамический поиск объектов. Геометрический взгляд на проблему [Текст] / А. Г. Чхартишвили, Е. В. Шикин // Фундаментальная и прикладная математика. – 1995. – Т. 1, вып. 4. – С. 827 – 862.
8. Абрамянц Т. Г. Об одной игровой задаче уклонения групповой цели в трехмерном пространстве [Текст] / Т. Г. Абрамянц, Е. П. Маслов, В. П. Яхно // Изв. РАН, ТиСУ. – 2005. – № 5. – С. 62 – 65.
9. Красильников Н. Н. Теория передачи и восприятия изображений. Теория передачи изображений и ее приложения [Текст] / Н. Н. Красильников. – М.: Радио и связь, 1986. – 248 с.
10. Иган Дж. Теория обнаружения сигналов и анализ рабочих характеристик [Текст] / Дж. Иган : пер. с англ. – М.: Наука, 1983. – 368 с.

Стаття надійшла до редакції 31.10.2009 р.