

А.В. М'ясоєдова¹, М.М. Дівізінюк², А.О. Хмирова³, Р.І. Шевченко³, О.С. Шевченко³

¹Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Україна

²Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», Україна

³Національний університет цивільного захисту України, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЯВЛЕННЯ МАЛОРОЗМІРНИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ АКТИВНИХ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ

Робота присвячена вирішенню актуального наукового завдання, а саме розробці нової моделі запобігання надзвичайних ситуацій терористичного характеру на об'єктах критичної інфраструктури що охороняються, шляхом своєчасного виявлення та ідентифікації малорозмірних безпілотних літальних апаратів активними оптоелектронними засобами.

Подальші дослідження будуть направлені на проведення натурних експериментів, виконаних з використанням спеціально розробленої лабораторної установки.

Ключові слова: надзвичайна ситуація, малорозмірний безпілотний літальний апарат, порушник, модель, об'єкт, що охороняється.

Постановка проблеми

Україна є ядерною державою. На її території розташовано п'ять атомних електростанцій з п'ятнадцятьма діючими ядерними реакторами. В державі десятки гідроелектростанцій і сотні теплоелектростанцій, десятки хімічних, нафтохімічних і металургійних комбінатів, сотні залізничних і автомобільних мостів та інших гідротехнічних і комунікаційних споруд, які є природоохоронними об'єктами критичної інфраструктури. Зовсім недавно ставилося завдання тільки охорони цих об'єктів. Зараз, в умовах збройної агресії, стоїть завдання охорони і оборони цих об'єктів не тільки проти терористів, але спеціально підготовлених диверсійно-розвідувальних і диверсійних груп, які застосовують різні засоби повітряного нападу.

Існуючі системи фізичного захисту об'єктів, що охороняються критичної інфраструктури використовують радіолокаційні, оптоелектронні, інфрачервоні, контактні електронні і електромагнітні підсистеми контролю периметра і території, що охороняється. Прилеглі до об'єктів санітарні зони контролюються цими засобами, які в свою чергу забезпечують процес управління надзвичайною ситуацією терористичного характеру на об'єкті критичної інфраструктури. Головне завдання цього управління - не допустити зловмисників на об'єкт, що охороняється, своєчасно виявляючи і припиняючи їх дії. Однак,

функціонування цих засобів спостереження залежить від стану приземних шарів атмосфери, наявності природних і штучних перешкод і інших чинників.

Особливу складність в управлінні безпекою об'єктів, що охороняються критичної інфраструктури є запобігання надзвичайним ситуаціям терористичного характеру, а саме процес виявлення та ідентифікації малорозмірних повітряних цілей. Фахівці в області антитерору вважають, що однією з домінуючих тенденцій розвитку терористичних сценаріїв на об'єктах, що охороняються критичної інфраструктури України є використання різних малогабаритних пілотованих і безпілотних літальних апаратів для проведення терористичних актів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Слід звизити область розглянутих терористичних надзвичайних ситуацій (НС) [1-8]. Для цього під охоронюваним потенційно-небезпечним об'єктом будемо мати на увазі державні і недержавні установи, які мають систему фізичного захисту. Розглядаючи НС терористичного характеру на потенційно-небезпечному об'єкті, що охороняється, слід відзначити, що для неї, як і для будь-якої надзвичайної ситуації, характерно п'ять етапів. Перший - це етап прихованого накопичення повсякденних негативних факторів. Другий етап - процес екстремального накопичення і розвитку негативних чинників, який переростає в третій етап

- саме катастрофічна подія, аварія, вибух або інший терористичний акт. Четвертий і п'ятий етапи - це ліквідація наслідків катастрофічної події і віддалених наслідків НС. Два останні етапи характерні для будь-якої техногенної аварії, так як, наприклад, вибух на АЕС і ліквідація наслідків радіоактивного забруднення, а також віддалених наслідків будуть незалежно від того, відбудеться чи ні розрив першого контуру енергоблоку в результаті теракту або технологічного події. Слід зазначити, що достатня велика кількість терактів маскується під технологічні збої.

Мета та завдання дослідження

Розробити математичну модель виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів за допомогою активних оптичних систем.

Для вирішення поставленої мети необхідно:

Визначити математичні закономірності ідентифікації малорозмірних безпілотних літальних апаратів за допомогою відео електронних та інфрачервоних систем;

Сформувати математичну модель виявлення та ідентифікації малорозмірних безпілотних літальних апаратів за допомогою активних оптоелектронних систем.

Виклад основного матеріалу

Визначення математичних закономірностей ідентифікації малорозмірних безпілотних літальних апаратів

Виявлення сигналів, відбитих від малорозмірних безпілотних літальних апаратів за допомогою активних оптичних систем, що використовують явища поглинання і розсіяння світла в оптично прозорих середовищах є результатом процедур послідовного обстеження повітряного простору навколо об'єкту, що охороняється, які прийнято називати пошуком.

Пошук (в широкому сенсі) - це прагнення домогтися або знайти що-небудь, це дії суб'єкту, спрямовані на отримання нових або загублених знань, даних, відомостей, інформації та інше. Відповідно до теорії пошуку, пошук - це процес послідовних операцій, спрямованих на збір, обробку та надання інформації про місцезнаходження цілі або об'єкту пошуку. Відповідно - класична задача пошуку виникає тоді, коли потрібно визначити положення об'єкта, що знаходиться в заданій області мірного евклідового простору, за допомогою пошукових засобів і встановленого на них пошукового обладнання.

Якщо ціль нерухома, то щільність розподілу не залежить від часу і має вигляд $u(x)$, де $x \in \Omega$

Якщо щільність розподілу залежить від часу, то вона має вигляд $u(x,t)$, де $x \in \Omega$ і $t \geq 0$.

В процесі пошуку пошукова система, направляє задані кількості пошукових зусиль в різні точки X області Ω протягом певного проміжку часу, який прийнято називати періодом пошуку. Якщо пошукове зусилля в точці X позначити $\varphi(x)$, то ймовірність виявлення об'єкта пошуку буде залежати від $\varphi(x)$. У загальному випадку ймовірність виявлення також залежить від точки X - координат розташування об'єкту пошуку. Тобто, якщо об'єкт пошуку дійсно знаходиться в точці X , то ймовірність виявлення дорівнюватиме $q(x, \varphi(x))$.

Тут функція $q(x, \varphi)$ має певні типові властивості:

1) якщо пошуку немає, то $\varphi(x) \equiv 0$, і ціль не може бути виявлена, значить $q(x, 0) = 0$ для всіх;

2) якщо функція $q(x, \varphi)$ - певна ймовірність, то $0 \leq q(x, \varphi) \leq 1$ для всіх пошукових зусиль $\varphi(x)$;

3) $q(x, \varphi)$ - зростаюча функція від φ для всіх $x \in \Omega$, так як збільшення $\varphi(x)$ збільшує ймовірність виявлення;

4) існує межа $\lim_{\varphi \rightarrow \infty} q(x, \varphi) = q_{\infty}(x)$, де $q_{\infty}(x) \leq 1$ для всіх $x \in \Omega$.

Для визначення виду функцій $\varphi(x)$ і $q(x, \varphi)$ потрібно докладна інформація про систему пошуку, засоби виявлення, характер області Ω та іншої додаткової інформації. Детальний аналіз цих відомостей і їх математичне узагальнення, що враховує, що в процесі пошуку бере участь людина, зводиться до функції виду:

$$q(x, \varphi) = 1 - e^{-\varphi}. \quad (1)$$

Тоді в якості пошукового зусилля можна вибирати деяку функцію $\varphi(x)$, допускаючи, що знайдеться деяка функція $\lambda(x, t)$, яка задовольнить умові (3.14):

$$\varphi(x) = \int_0^T \lambda(x, t) dt, \quad (2)$$

де T - час, який витрачається на пошук.

Функція $\lambda(x, t)$ є функцією щільності пошуку або стратегією пошуку. Вона передбачається така, що $\lambda(x, t) \geq 0$ для всіх $x \in \Omega$, $t \geq 0$, і

$$\int_{\Omega} \lambda(x, t) dx = L(t) \text{ для всіх } t \geq 0. \quad (3)$$

Стратегія пошуку, що задає програму пошуку, залежить від структури і динамічної поведінки пошукової системи.

Якщо пошукове зусилля $\varphi(x)$, функція $q(x, \varphi)$ і щільність розподілу цілі $u(x)$ задані, то ймовірність виявлення цілі за час T буде визначатися виразом (3.16)

$$P(T) = \int_{\Omega} q(x, \varphi(x)) u(x) dx. \quad (4)$$

Головна ідея запобігання надзвичайним ситуаціям полягає в своєчасному виявленні об'єкта пошуку - виявлення сигналів, відбитих від малорозмірних безпілотних літальних апаратів за допомогою активних оптичних систем.

Виходячи з вищесказаного, конкретизуємо умови вирішення завдання - визначення ймовірності виявлення об'єкта пошуку.

Перше. Ω - область декартового простору, в якому проводиться пошук об'єкта - сигналів, відбитих від малорозмірних безпілотних літальних апаратів за допомогою активних оптичних систем, що наближаються об'єкту, що охороняється.

Друге. $\lambda(x, t)$ - функція, яка визначається стратегією пошуку і є ймовірністю виявлення об'єкта пошуку в інтервалі часу $(t, t + \Delta t)$ за умови, що він знаходиться в точці x і не виявлений до моменту t .

Третє. $u(x, t)$ - щільність розподілу положення (координат) об'єкта пошуку (щільність апостеріорного розподілу), коли вона залежить від часу.

З урахуванням цих трьох умов, $P\{(t, t + \Delta t)/(0, t)\}$ - ймовірність виявлення об'єкта, що знаходиться в малій околиці Δx , яка містить точку x , і не виявлена $(0, t)$ протягом часу, буде визначатися виразом (5).

$$P\{(t, t + \Delta t)/(0, t)\} = 1 - \Delta t \int_{\Omega} \lambda(x, t) u(x, t) dx + o(\Delta t). \quad (5)$$

Беручи до уваги, що пошук здійснюється в двох координатній системі, і час виконання завдання виявлення одно тривалості перебування літального апарату в зоні реєстрації відбитих від цілі сигналів T , то буде справедливо (6).

$$P(T) = 1 - \int_{\Omega} u(x) \exp\left(-\int_0^T \lambda(x, \tau) d\tau\right) dx. \quad (6)$$

Вводячи позначення пошукового зусилля у вигляді з одного боку $\varphi(x, T) = \int_0^T \lambda(x, \tau) d\tau$, а з іншого, з огляду на те, що пошукове устаткування не зовсім автоматичне і вимагає залучення хоча б одну людину-оператора пошукової системи, отримаємо (7).

$$P(T) = 1 - \int_{\Omega} u(x) \exp(-\varphi(x, T)) dx. \quad (7)$$

Пошукове зусилля в цьому випадку буде обчислюватися через функцію загального вигляду $L(t)$ за умови, що $0 < l < \infty$, і існує інтеграл

$\int_0^t L(\tau) d\tau$ для всіх $t > 0$, при цьому

$$\varphi(x, t) = \frac{1}{2\sigma\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^t L(\tau) d\tau}\right).$$

Конкретизуємо умови вирішення завдання. Нехай S - площа горизонтальної поверхні контрольованої території навколо об'єкту, що охороняється. Фактично це площа району пошуку. D_0 - аналітично розрахована очікувана дальність виявлення відбитого сигналу. Допускаючи, що щільність ймовірності знаходження малорозмірного повітряного об'єкта розподілена рівномірно по горизонтальній поверхні контрольованої території навколо об'єкту, що охороняється, то ймовірність виявлення відбитого сигналу в залежності від часу його перебування в зоні виявлення буде визначатися як

$$P(T) = 1 - \exp\left(-\frac{D_0}{S} T\right). \quad (8)$$

Отже, ймовірність виявлення сигналів, відбитих від малорозмірних безпілотних літальних апаратів, оптичними системами визначається експонентною залежністю від співвідношення добутку множення очікуваної дальності виявлення сигналів, відбитих від малорозмірних повітряних цілей скануючою оптичною системою, на час

перебування цієї повітряної цілі в зоні виявлення оптичної системи, до площі горизонтальної поверхні контрольованої території навколо об'єкту, що охороняється.

Математична модель виявлення та ідентифікації малорозмірних безпілотних літальних апаратів

Тепер, об'єднуючи в одну систему аналітичні залежності (8), а також залежність (9) щодо визначення найбільшої енергетичної дальності виявлення сигналу, відбитого від малорозмірного безпілотного літального апарату, залежить від значення енергетичного потенціалу засобу оптичного виявлення та значення закономірності спаду інтенсивності розповсюдження світлової (електромагнітної) хвилі, розрахованої для цієї дистанції, що можна виразити наступною функціональною залежністю:

$$D_3 = f[\Psi(D, f); \Pi_{\text{зсo}}(R_3)] \quad (9)$$

Енергетична дальність виявлення D_3 є розрахунковою або аналітичною величиною, яка не враховує викривлення земної поверхні, обумовленої її формою, особливостей розкриття оптичних пристроїв і способів сканування повітряного простору. Це враховує геометрична дальність виявлення об'єктів.

Також слід додати залежність (10) щодо визначення довжини зони освітленості, яка буде визначатися горизонтальною дальністю дії D_r по і-тому напрямку. Напрямок визначається кутом розвороту оптоелектронного пристрою на кут α від напрямку на N -північ, тобто азимутом. Відповідно, сукупність цих площин є функціональна залежність:

$$D_r = \varphi(D_{\text{лe}}, \alpha, F_{p\alpha}, h_u), \quad (10)$$

де $D_{\text{лe}}$ - дальність видимого горизонту, що враховує висоту антени лідара h_A і умовно проведеною поверхню Землі без обліку позитивних і негативних чинників рельєфу місцевості;

α - поточне значення азимута, що визначає розворот антени лідара на кут щодо направлення на північ;

$F_{p\alpha}$ - функціонал, що оцінює фактори позитивного та негативного рельєфу місцевості по і-тому напрямку, який визначається азимутом антени лідара, тобто α ;

h_u - висота цілі.

Однак геометрична дальність виявлення $D_{\text{лe}}$ не враховує рефракцію електромагнітних (світлових) хвиль, яка визначається станом приземних шарів атмосфери. Це враховує очікувана дальність

виявлення сигналів, яка визначається залежністю (11).

Геометрична дальність виявлення об'єкту помножена на коефіцієнт аномалії A нижніх шарів атмосфери, носить назву очікуваної дальності виявлення об'єкта.

У ряді випадків для визначення очікуваної дальності виявлення використовують не геометричну, а енергетичну дальність виявлення. Це відбувається в тих випадках, коли $D_3 \ll D_r$. У зв'язку з цим справедливо стверджувати, що:

$$D_0 = A \cdot \begin{cases} D_r, \text{ якщо } D_r \approx D_3 \\ D_3, \text{ якщо } D_3 \ll D_r \end{cases} \quad (11)$$

Необхідно зауважити, що і енергетична, і геометрична, і очікувана дальності виявлення є результатом аналітичного розрахунку.

Тоді отримаємо шукану математичну модель, тобто

$$\left. \begin{aligned} P(T) &= 1 - \exp\left(-\frac{D_0}{S} T\right) \\ D_0 &= A \cdot \begin{cases} D_r, \text{ за умови } D_r \approx D_3 \\ D_3, \text{ за умови } D_3 \ll D_r \end{cases} \\ D_r &= \varphi(D_{\text{лe}}, \alpha, F_{p\alpha}, h_u) \\ D_3 &= f[\Psi(D, f); \Pi_{\text{зсo}}(R_3)] \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Висновки

Таким чином, математична модель виявлення сигналів, відбитих від малорозмірних безпілотних літальних апаратів за допомогою активних оптичних систем, що використовують явища поглинання і розсіювання світла в оптично прозорих середовищах являє собою систему з чотирьох аналітичних залежностей. Перша з них дозволяє розрахувати ймовірність виявлення сигналів, відбитих від малорозмірних повітряних цілей, по експонентній залежності співвідношення добутку множення очікуваної дальності виявлення сигналів, відбитих від малорозмірних безпілотних літальних апаратів скануючою оптичною системою, на час перебування цієї повітряної цілі в зоні виявлення оптичної системи, до площі горизонтальної поверхні контрольованої території навколо об'єкту, що охороняється. Друга визначає очікувану дальність виявлення як добуток множення енергетичної або геометричної дальності виявлення на коефіцієнт аномалії нижніх шарів атмосфери в залежності від конкретних умов вирішення завдання пошуку малорозмірних безпілотних літальних апаратів.

Третя описує геометричну дальність виявлення, яка визначається дальністю видимого горизонту, висотою польоту цілі, висотою лідара, і функціоналом, який оцінює фактори позитивного та негативного рельєфу місцевості по і-тому напрямку, що визначається розворотом кута оптичного пристрою виявлення. Четверта - енергетичну дальність виявлення сигналів, відбитих від малорозмірних безпілотних літальних апаратів, оптичними системами, яка визначається відповідністю (рівністю) значення енергетичного потенціалу засобу оптичного виявлення значенням закономірності спаду інтенсивності розповсюдження світової (електромагнітної) хвилі, розрахованому для цієї дистанції.

Література

1. World nuclear industry status report, 2015. Режим доступу: http://www.worldnuclearreport.org/the_world_nuclear_industry_status_report_2015/html
2. Ponomarenko S., Samberg A., Chumachenko S., Popel, V. (2017). A Model of Recreation Management of Abandoned Territories after Armed Conflicts. Proceedings of 24th TIEMS Annual Conference and General Assembly, Kyiv, Ukraine, 4-7 December 2017.
3. Samberg, A., Mikhno, O. (2015) R&D trends in the areas of critical infrastructure and civil protection. The International Scientific Conference on Modelling of Risks and Threats of Critical Infrastructures. The State Emergency Service of Ukraine, The Ukrainian Civil Protection Research Institute, 20-21 April 2015, Kiev, UKRAINE.
4. Robert A. Fowler, Andre Samberg, Martin J. Flood, and Tom J. Greaves. (2007) Topographic and Terrestrial Lidar. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 252 p.
5. World nuclear industry status report, 2014. Режим доступу: <http://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf>
6. Roadmap for Fukushima Daiichi restoration. World nuclear news. 18 april 2011.
7. No significant damage to fuel at unit 4. World nuclear news. 30 april 2011.
8. Filters for Fukushima Daiichi. World nuclear news. 6 may 2011.
9. World nuclear industry status report, 2015. Режим доступу: http://www.worldnuclearreport.org/the_world_nuclear_industry_status_report_2015/html

References

1. World nuclear industry status report, 2015. Retrieved from: http://www.worldnuclearreport.org/the_world_nuclear_industry_status_report_2015/html
2. Ponomarenko S., Samberg A., Chumachenko S., Popel, V. (2017). A Model of Recreation Management of Abandoned Territories after Armed Conflicts. Proceedings of 24th TIEMS Annual Conference and General Assembly, Kyiv, Ukraine, 4-7 December 2017.
3. Samberg, A., Mikhno, O. (2015) R&D trends in the areas of critical infrastructure and civil protection. The International Scientific Conference on Modelling of Risks and Threats of Critical Infrastructures. The State Emergency Service of Ukraine, The Ukrainian Civil Protection Research Institute, 20-21 April 2015, Kiev, UKRAINE.

4. Robert A. Fowler, Andre Samberg, Martin J. Flood, and Tom J. Greaves. (2007) Topographic and Terrestrial Lidar. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 252 p.
5. World nuclear industry status report, 2014. Retrieved from: <http://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf>
6. Roadmap for Fukushima Daiichi restoration. World nuclear news. 18 april 2011.
7. No significant damage to fuel at unit 4. World nuclear news. 30 april 2011.
8. Filters for Fukushima Daiichi. World nuclear news. 6 may 2011.
9. World nuclear industry status report, 2015. Retrieved from: http://www.worldnuclearreport.org/the_world_nuclear_industry_status_report_2015/html

Рецензент: д.т.н., проф., заступник начальника О.М. Мірошник, Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Україна.

Автор: М'ЯСОЄДОВА Альона Володимирівна
викладач-методист навчально-методичного відділу
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України
E-mail - alena991@ukr.net
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6499-9058>

Автор: ДІВІЗІНЮК Михайло Михайлович
доктор фізико-математичних наук, професор,
завідувач відділу цивільного захисту та інноваційної діяльності
Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України»
E-mail - divizinyuk@ukr.net
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5657-2302>

Автор: ХМИРОВА Анастасія Олегівна
кандидат наук з державного управління
Національний університет цивільного захисту України
E-mail - khmyrova.anast@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0680-7505>

Автор: ШЕВЧЕНКО Роман Іванович
доктор технічних наук, професор, начальник кафедри автоматичних систем безпеки та інформаційних технологій факультету пожежної безпеки
Національний університет цивільного захисту України
E-mail - shevchenko605@i.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9634-6943>

Автор: ШЕВЧЕНКО Ольга Станіславівна
кандидат технічних наук, провідний фахівець
Національний університет цивільного захисту України
E-mail - shevchenko01ga2008@gmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2106-5009>

MATHEMATICAL MODEL OF DETECTION OF SMALL UNMANNED AERIAL VEHICLES USING ACTIVE OPTICAL SYSTEMSA. Miasoiedova¹, M. Divizinyuk², A. Khmyrova³, R. Shevchenko³, O. Shevchenko³¹Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Defense of Ukraine, Ukraine²The State Institute "Institute of Geochemistry of Science and Technology of the National Academy of Sciences of Ukraine", Ukraine³National University of Civil Defense of Ukraine, Ukraine

The work is devoted to the solution of an actual scientific task in the field of civil protection, namely, the development of a new model for the prevention of emergency situations of a terrorist nature at the objects of the critical infrastructure of Ukraine, which are protected, by means of timely detection and identification of small unmanned aerial vehicles by active optoelectronic means.

Based on the analysis, it was established that one of the trends in the development of terrorist scenarios at protected critical infrastructure facilities is the use of various small manned and unmanned aerial vehicles to carry out terrorist acts.

This work is a continuation of the cycle of previous works on the development of a structural and logical model for managing an emergency situation of a terrorist nature at an object of critical infrastructure of Ukraine, which is protected, caused by the appearance of small-sized aerial targets, intended for the development and constant implementation of procedures of an organizational and technical nature to ensure the safety of the object to the guarded object, when small air targets appear. A mathematical model for the detection of signals reflected from small aerial targets using active optical systems using the phenomena of light absorption and scattering in optically transparent media has been developed, which represents a system of four analytical dependencies.

Thus, the mathematical model of detecting signals reflected from small unmanned aerial vehicles using active optical systems using the phenomena of light absorption and scattering in optically transparent media is a system of four analytical dependencies. The first of them allows you to calculate the probability of detecting signals reflected from small air targets. The second determines the expected detection range. The third describes the geometric detection range. The fourth is the energy detection range of signals reflected from small unmanned aerial vehicles by optical systems.

Further research will be directed to conducting field experiments, performed using a specially designed laboratory setup, and theoretical calculations of the value of expected target detection activities as part of numerous experiments that should prove the reliability of the results obtained in the work.

Keywords: emergency situation, small unmanned aerial vehicle, violator, model, protected object.