

УДК 629.735.051

С.Л. Данилюк

Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України, Київ

## ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ МОБІЛЬНИХ РАДІОМЕРЕЖ НА ОСНОВІ БПЛА ДЛЯ ЗАВДАНЬ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ В ЗОНІ ВЕДЕННЯ БОЙОВИХ ДІЙ

У роботі розглядаються підходи до підвищення продуктивності мобільних радіомереж у зоні ведення бойових дій на основі управління положенням телекомунікаційних аероплатформ в умовах швидкого та непередбачуваного переміщення мобільних абонентів, що здійснюють екологічний моніторинг довкілля. Пропонується подальший розвиток методу підвищення продуктивності радіомереж у зоні проведення адаптивного моніторингу, а саме, удосконалення підсистеми керування польотом мережі безпілотних літальних апаратів, що дозволить оперативно відпрацьовувати отримані на попередньому етапі координати місцеположення за мінімізацією енерговитрат на керування.

**Ключові слова:** радіомережа, моделювання, градієнтний спуск, функція Ляпунова, адаптація, оптимальний адаптивний спостерігач.

### Вступ

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Головними критеріями ефективності системи цивільного захисту під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного чи техногенного характеру є оперативність та економічність, тобто мінімізація витрат часу та ресурсів на здійснення екологічного моніторингу в зоні ведення бойових дій, виявлення та локалізацію потенційно небезпечних об'єктів тощо.

Це можливо шляхом розгортання мобільних епізодичних мереж (МЕМ) із використанням телекомунікаційних аероплатформ (ТА) (рис.1), які здійснюватимуть збір, часткову обробку та передачу інформації в спеціалізовані координаційні центри [1]. Абоненти таких мереж (рятувальники, екологічні сенсори чи транспортні засоби) можуть з'єднуватись між собою (або з координаційним центром) на основі тимчасових зв'язків із ретрансляцією через проміжні вузли наземного чи повітряного базування.

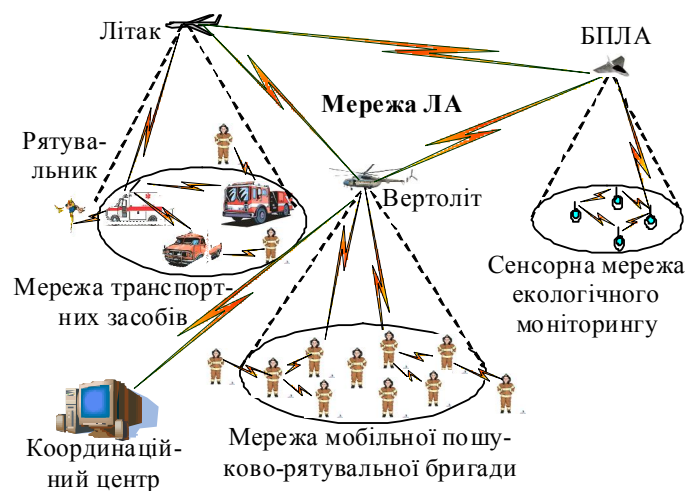


Рис. 1. Приклад організації мобільної епізодичної мережі із використанням повітряних ретрансляторів

Однак функціонування таких МЕМ неможливе без ефективної системи управління (СУ), яка б дозволяла швидко реагувати на структурні та функціональні зміни, пов'язані з веденням бойових дій, забезпечуючи ті чи інші цілі управління, зокрема підвищення продуктивності мережі, зв'язності абонентів, надійності, живучості та ін.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Над проблемою підвищення зв'язності працювало багато

відомих вітчизняних та іноземних науковців [2 – 4]. Зокрема в [5] була запропонована функціональна модель системи оперативного управління мережею БПЛА. В роботах [6, 7] було запропоновано метод управління топологією МЕМ. Робота [8] розкриває сучасний стан та досліджувані шляхи побудови адаптивних систем керування польотом ЛА. Об'єднання налаштувань за параметрами середовища з параметричною адаптацією розглянуто в [9].

**Формулювання цілей статті (постановка завдання).** На основі розвитку методу підвищення продуктивності радіомереж у зоні проведення адаптивного моніторингу пропонується удосконалення підсистеми керування польотом мережі безпілотних літальних апаратів, що дозволить оперативно відпрацьовувати отримані на попередньому етапі координати місцеположення за мінімізації енерговитрат на керування.

### Виклад основного матеріалу досліджень

Нехай об'єкт керування (ОК) (БПЛА) описується рівнянням стану:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= A(t)X(t) + B(t)U(t) + \eta(t); \\ Y &= CX(t) + \xi(t), \end{aligned} \quad (1)$$

де  $X \in R^n$  – вектор стану ОК;

$U \in R^m$  – вектор керування;

$Y$  – вектор вимірювань  $A(t)$ ,  $B(t)$  –  $n \times n$  і  $n \times m$  матриці параметрів ОК;

$\eta$  та  $\xi$  – вектор шумів збурень та шумів вимірювання.

Розглянемо задачу забезпечення ОК бажаної динаміки за мінімізації енерговитрат на керування. Бажану динаміку ОК за мінімізації енерговитрат на керування будемо задавати за допомогою еталонної моделі

$$\dot{X}_M = A_M X_M(t) + B_M R(t), \quad (2)$$

де  $X_M \in R^n$  – вектор стану еталонної моделі,

$R \in R^m$  – вектор вхідних дій.

Формалізуємо ціль керування (ЦК), вимагаючи, щоб

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E(t) = 0, \quad (3)$$

де  $E(t) = X(t) - X_M(t)$  – похибка системи.

Таким чином, ставиться задача синтезу самонастроювальної системи з явною еталонною моделлю. Нехай на ОК впливають вимірювані збурення (задані дії)  $R=R(t)$ , збурення, які не вимірюються  $N=N(t)$  і керуючі дії  $U=U(t)$ . Спостереженню доступні вихідні змінні об'єкта  $X_B=X(t)$ . Задано ціль керування (3), яка визначає бажану поведінку ОК. Необхідно синтезувати алгоритм керування, який використовує вимірювані чи обчислені на основі вимірювань величини, що не залежать від  $\zeta \in \Xi$ , і забезпечуючи для кожного  $\zeta \in \Xi$  досягнення заданої цілі керування. Вектор  $\zeta$  вважається таким, що змінюється повільно.

Тоді постановку задачі можна сформулювати таким чином.

Знайти такий алгоритм керування

$$U(t) = U_1(X(t), U(t), \Theta(t), R(t)); \quad (4)$$

$$\Theta(t) = \Theta_1(X(t), U(t), \Theta(t), R(t)), \quad (5)$$

який забезпечує досягнення цілі керування (3) в системі (2) – (5) для кожного  $\zeta \in \Xi$ . Тут  $\Theta(t)$  – вектор параметрів регулятора.

**Метод підвищення продуктивності мобільних епізодичних мереж.** В основу методу покладе на ідея підвищення продуктивності мобільних радіомереж на основі управління положенням телекомунікаційних аероплатформ.

Суть ідеї полягає в тому, що оптимальне розміщення телекомунікаційних аероплатформ у просторі дозволяє створити таку структуру мережі, що має більшу кількість незалежних маршрутів передачі даних між абонентами, а згідно теореми Форда-Фалкерсона це дозволяє збільшити мінімальний перетин та максимальний потік, що мережа може пропустити в одиницю часу, тобто підвищити її продуктивність.

Схема-алгоритм розробленого методу представлена на рис. 2.



Рис. 2. Схема-алгоритм методу підвищення продуктивності MEM із ТА

Вона включає в себе такі етапи: збір інформації про стан та параметри функціонування мережі (блок 1); розрахунок та оцінка параметрів її структури та функціонування (блоки 4,7); знаходження нового місцеположення БПЛА у випадку відхилення пара-

метрів функціонування від допустимих значень, що реалізує задану ціль управління (максимум продуктивності) (блоки 6, 9, 10); виконання отриманого рішення (вивід або переміщення БПЛА у задану точку простору) (блок 11) та адаптація до реальних умов функціонування (блок 12).

Даний цикл реалізується послідовно й оперативно для кожного БПЛА в залежності від того, наскільки суттєво змінилася топологія мережі по відношенню до її попереднього стану (визначається характером та рівнем мобільності абонентів [9]).

Алгоритм знаходження нового положення БПЛА у загальному випадку зводиться до перебору всіх можливих варіантів розміщення БПЛА. Однак ця задача належить до класу NP-повних, тому для скорочення повного перебору варіантів розміщення БПЛА запропоновано використовувати попередньо розроблену сукупність правил відбору варіантів такої зміни зв'язності мережі, що підвищують її пропускну здатність, а також зменшують час обчислень.

Проведена оцінка ефективності запропонованого методу дозволяє зробити такі висновки:

- 1) середній вииграш запропонованого методу відносно існуючих становить 15 – 20%;
- 2) середнє відхилення продуктивності відносно методу повного перебору становить 5 – 7%;
- 3) середній час отримання рішення для запропонованого методу становить од./дес. секунд на відміну від десятків хвилин для існуючих методів, що дозволяє виконувати управління положенням ЛА (БПЛА) в режимі реального часу.

**Синтез комбінованої адаптивної системи керування.** Узагальнена процедура синтезу адаптивного алгоритму керування з еталонною моделлю складається з таких етапів: Етап 1. Постановка задачі синтезу; Етап 2. Синтез оптимальної еталонної моделі; Етап 3. Синтез оптимального спостерігача стану (фільтра Калмана); Етап 4. Вибір структури регулятора (синтез основного контура); Етап 5. Вибір настроюваних параметрів; Етап 6. Вибір алгоритму адаптації; Етап 7. Загрублення; Етап 8. Налаштування адаптера.

На етапі 2 докладно розглянуто процедуру синтезу оптимальної неперервної та дискретної еталонної моделі.

У процесі синтезу оптимальної (з точки зору енерговитрат на управління) еталонної моделі застосовується лінійний оптимальний квадратичний регулятор (ЛОКР), який використовується для корегування динаміки об'єкта керування (БПЛА).

Для синтезу оптимального квадратичного регулятора розглядається номінальна лінійна стаціонарна модель детермінованого об'єкта керування у вигляді простору станів.

Тоді задача оптимального регулятора визначається як функція знаходження оптимального управ-

ління  $u(t)$  на інтервалі  $[t_0, t_f]$ , такого, щоб була мінімальна функція вартості.

Оскільки для застосування адаптивного закону керування необхідно знати повний вектор стану ОК, то на третьому етапі синтезується оптимальний спостерігач стану. Однак основне стохастичне збурення, що діє на БПЛА в польоті, – турбулентний вітер, а він не є білим шумом. Тому для застосування процедури синтезу оптимального спостерігача стану необхідно об'єкт керування описати в просторі станів у вигляді послідовного з'єднання формуючого фільтра, який описує дію турбулентного вітру на БПЛА, та моделі детермінованого об'єкта керування. Для опису турбулентності вітру використовується модель Драйдена MIL-F-8785C. На етапі 4–7 розглядаються процедури синтезу оптимальної адаптивної системи керування аероплатформою з використанням функцій Ляпунова та методу градієнтного спуску.

Задача синтезу основного контура вирішується за умови припущення, що параметри ОК відомі. Для отримання структури “ідеального” регулятора запишемо рівняння у відхиленнях

$$\dot{E}(t) = A_M E(t) + (A - A_M)X(t) + BU(t) - B_M R(t). \quad (6)$$

Ідеальне керування, яке задовольняє співвідношенню (6), описується рівнянням:

$$U_*(t) = K_*^X X(t) + K_*^R R(t),$$

$$\text{або } U_*(t) = \bar{K}_*^X X(t) + \bar{K}_*^R R(t), \quad (7)$$

де  $K_*^X, K_*^R, \bar{K}_*^X, \bar{K}_*^R$  – матриці ідеальних коефіцієнтів регулятора.

Структура основного контуру обирається у вигляді

$$U_*(t) = \bar{K}^R(t) \bar{K}^X(t) X(t) + \bar{K}^R(t) R(t), \quad (8)$$

де  $\bar{K}^X(t), \bar{K}^R(t)$  – матриці коефіцієнтів регулятора, які підлягають налаштуванню.

У якості функції Ляпунова візьмемо квадратичну скалярну функцію вигляду

$$V = 0,5E^T H E + 0,5\text{tr}(\Theta^T \Gamma^{-1} \Theta); \quad H = H^T. \quad (9)$$

Якщо алгоритм адаптації вибрати у вигляді

$$\dot{\Theta} = -\Gamma B_M^T H E \Sigma^T(t); \quad \Gamma = \Gamma^T > 0, \quad (10)$$

то функція  $V$  має властивості  $V < 0$  і  $\dot{V} < 0$ , тобто є функцією Ляпунова.

У результаті алгоритм налаштування матриць  $\bar{K}^X(t)$  і  $\bar{K}^R(t)$

$$\begin{aligned} \dot{\bar{K}}^X(t) &= -\Gamma_1 B_M^T H E(t) X^T(t), \\ \dot{\bar{K}}^R(t) &= -\bar{K}^R \Gamma_2 B_M^T H E(t) (R + \bar{K}^X X(t))^T (\bar{K}^R)^T \bar{K}^R. \end{aligned} \quad (11)$$

Структурна схема адаптивної системи з урахуванням структури УНО наведена на рис. 3.

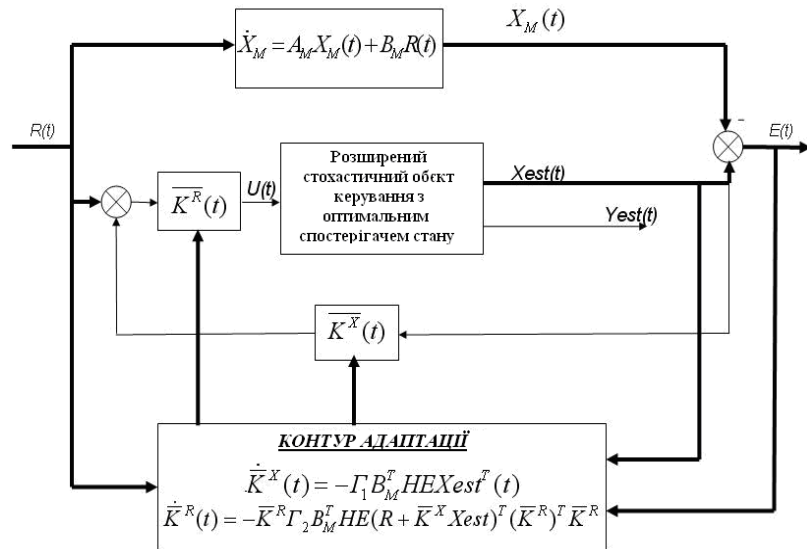


Рис. 3. Структурна схема оптимальної адаптивної системи керування

У зазначеному алгоритмі зовнішні збурення  $w_1$  та шуми датчиків вимірювання  $w_2$  можна розглядати як випадкову зміну параметрів ОК, яку повинен відслідковувати контур адаптації для досягнення цілі керування.

Для забезпечення працездатності оптимальної адаптивної системи керування БПЛА в умовах інтенсивної дії зовнішніх стохастичних збурень використовується процедура синтезу оптимальної адаптивної системи керування з явною еталонною моделлю на основі методу градієнтного спуску.

Процедура ідентифікації проводиться періодично.

Під час розрахунку матриць параметрів ОК система керування запам'ятовує значення матриць коефіцієнтів  $K^X$  та  $K^R$  та згідно з гіпотезою квазістаціонарності на час ідентифікації закон керування стає стаціонарним, відповідно до того, який адаптивний регулятор використовується в даний момент.

Графіки зміни миттєвого відносного зменшення паливних витрат та енерговитрат на управління керуючими поверхнями для режиму керування швидкістю при стабілізації висоти представлені на рис. 4, 5.

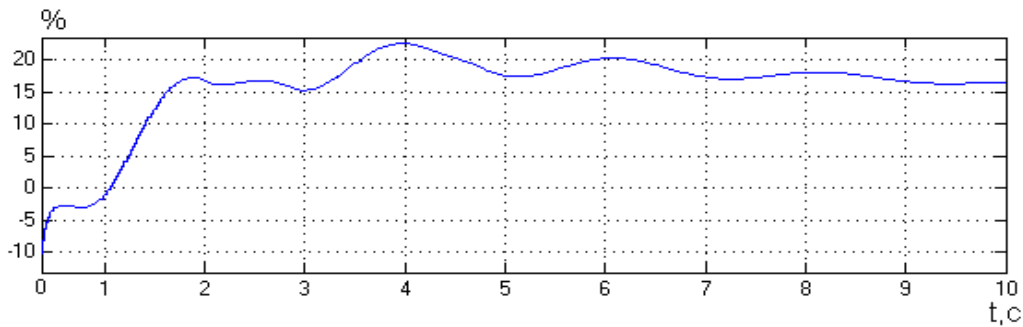


Рис. 4. Зміна миттєвого відносного зниження паливних витрат

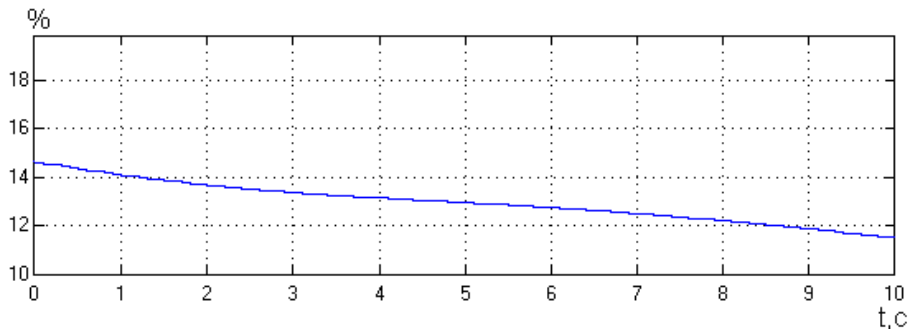


Рис. 5. Зміна миттєвого відносного зниження енерговитрат на управління керуючими поверхнями

## Висновки

В роботі розглядається метод підвищення продуктивності мобільних радіомереж на основі управління положенням телекомунікаційних аероплатформ в умовах швидкого та непередбачуваного переміщення мобільних абонентів, що здійснюють екологічний моніторинг у зоні ведення бойових дій. Пропонується подальший розвиток цього методу, а саме, удосконалення підсистеми керування польотом мережі безпілотних літальних апаратів, що дозволить оперативно відпрацювати отримані на попередньому етапі координати місцеположення за мінімізації енерговитрат на керування.

Запропоновані підходи дозволять підвищити продуктивність інформаційно-телекомунікаційної мережі екологічного моніторингу на 15–20% при цьому знизити паливні витрати у середньому на 13–15%, а також підвищити оперативність планування та перепланування мережі на порядок, зменшити вартість створення інформаційно-телекомунікаційної мережі в зоні ведення бойових дій або стихійного лиха, що проектується, у середньому до 10% у порівнянні з кращими раніше відомими методами.

## Список літератури

1. Самоорганизующиеся радиосети со сверхширокополосными сигналами [Текст] / С.Г. Бунин, А.П. Войтер, М.Е. Ильченко, В.А. Романюк. – К.: Наукова думка, 2012. – 444 с.
2. Basu P. Coordinated Flocking of UAVs for Improved Connectivity of Mobile Ground Nodes [Текст] / P. Basu, J. Redi, V. Shurbanov // IEEE MILCOM'04: Military Communications Conference, October 31 – November 3 2004: proceedings. – Monterey, 2004. – Vol. 3. – P. 1628-1634.

3. Chandrashekar J.S. Providing full connectivity in large ad-hoc networks by dynamic placement of aerial platforms [Текст] / J.S. Chandrashekar, K. Dekhordi, M.R. Baras // Proceedings of IEEE MILCOM'04. – 2004. – V. 3. – P. 1429-1436.

4. Han Z. Smart deployment / movement of unmanned air vehicle to improve connectivity in MANET [Текст] / Z. Han, A.L. Swindlehurst, K.J.R. Liu // in Proc. IEEE Wireless Commun. network conference. – 2006. – V.1. – P. 252-257.

5. Міночкін А.І. Задачі управління топологією мережі безпілотних літальних апаратів мобільного компоненту мереж зв'язку військового призначення [Текст] / А.І. Міночкін, В.А. Романюк // Збірник наукових праць ВІПІ НТУУ «КПІ». – 2005. – № 2. – С. 83-90.

6. Lysenko O. The optimal control of UAV network topology [Текст] / O. Lysenko, S. Valuiskyi // Aviation in the XXI-st century – Safety in Aviation and Space Technologies.: fourth world congress, 21 – 23 September 2010: proceedings. – Kyiv, 2010. – P. 1637-1640.

7. Lysenko O.I. A method of controlling the topology of aerial repeaters network to improve structural information connectivity of wireless ad hoc networks [Текст] / O.I. Lysenko, I.V. Uryadnikova, I.O. Nechyporenko // Military & Science. – 2012. – Vol. 7. – № 1. – P. 62-70.

8. Lysenko O.I., Capacity increasing of sensor telecommunication networks [Текст] / O.I. Lysenko, S.V. Valuiskyi // Telecommunication Sciences. – 2012. – vol. 3. – № 1. – P. 5-11.

9. Буков, В.Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления [Текст] / В.Н. Буков. – М.: Наука, 1987. – 230 с.

Надійшла до редколегії 19.08.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.І. Лисенко, НТУ України «КПІ», Київ.

## ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МОБИЛЬНЫХ РАДИОСЕТЕЙ НА ОСНОВЕ БПЛА ДЛЯ ЗАДАНИЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА В ЗОНЕ ВЕДЕНИЯ БОЕВЫХ ДЕЙСТВИЙ

С.Л. Данилюк

В работе рассматриваются подходы к повышению производительности мобильных радиосетей в зоне ведения боевых действий на основе управления положением телекоммуникационных аероплатформ в условиях быстрого и непредсказуемого перемещения мобильных абонентов, которые осуществляют экологический мониторинг окружающей среды. Предлагается последующее развитие метода повышения производительности радиосетей в зоне проведения адаптивного мониторинга, а именно, усовершенствование подсистемы управления полетом сети беспилотных летательных аппаратов, которая позволит оперативно обрабатывать полученные на предыдущем этапе координаты местоположения за минимизации энергозатрат на управление.

**Ключевые слова:** радиосеть, моделирование, градиентный спуск, функция Ляпунова, адаптация, оптимальный адаптивный наблюдатель.

## RAISING OF PRODUCTIVITY OF MOBILE RADIO NETWORKS ON THE BASIS OF UNMANNED AIRCRAFTS FOR ACCOMPLISHMENT OF TASKS OF ENVIRONMENTAL MONITORING IN A ZONE OF CONDUCTING OPERATIONS (ENGAGEMENT)

S.L. Daniluk

We consider approaches to a raising of productivity of mobile radio networks in a zone of conducting operations (engagement) on the basis of management of location of telecommunication aero platforms in the conditions of rapid and unpredictable movement of mobile subscribers, carrying out environmental monitoring. Further development of the proposed method by productivity raise of broadband zone of adaptive monitoring (by developing of subsystems of flight control of a net of unmanned aircrafts) is offered. It will allow to complete operatively the co-ordinates of a location at the previous stage gained at minimization of power inputs and managements.

**Keywords:** broadband, modeling, gradient descent, Liapunov function, adaptation, optimal adaptive observer.